

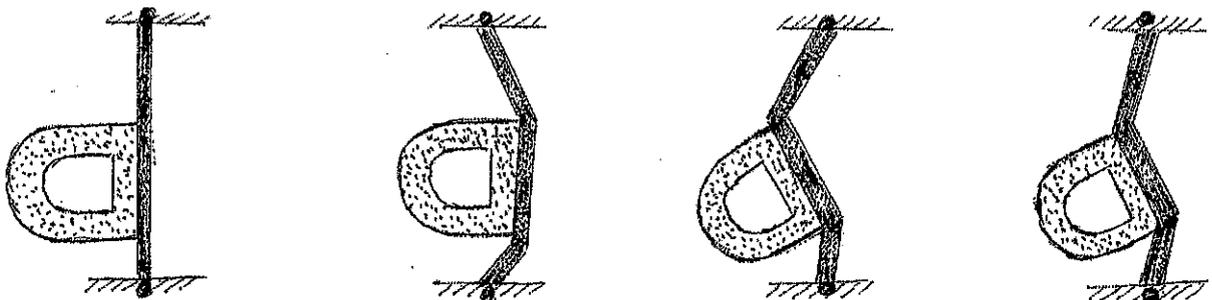
E. LEIPP



REFLEXIONS

SUR

LA MÉCANIQUE ET L'ACOUSTIQUE
DE L'OREILLE MOYENNE



BULLETIN N° 49

GAM

BULLETIN DU GROUPE d'ACOUSTIQUE MUSICALE
FACULTE DES SCIENCES. PLACE JUSSIEU, TOUR 66. PARIS 5°.

G. A. M.
GROUPE D'ACOUSTIQUE MUSICALE
Laboratoire d'Acoustique
Faculté des Sciences
Place Jussieu Tour 66
5° étage

Paris, 15 Septembre 1970

Adresse postale :
9 Quai Saint Bernard PARIS 5°

BULLETIN N° 49

Réunion du 26 Juin 1970

Thème : REFLEXIONS SUR LA MECANIQUE ET L'ACOUSTIQUE
DE L'OREILLE MOYENNE

M. le Vice Doyen GAUTHIER nous avait honoré de sa présence, et a bien voulu accepter la présidence de la réunion, en l'absence de M. le Professeur SIESTRUNCK, retenu par les examens de l'agrégation.

Etaient présents :

M. E. LEIPP Secrétaire général
Melle M. CASTELLENGO, Secrétaire.

Puis, par ordre d'arrivée

M. VAL (J.L) (chimiste, informaticien); M. CHENAUD (président de l'AFARP); M. GEUENS (Professeur à l'Ecole de prise de son belge); M. FORET (F) (compositeur); M. BERNARD J.H. (Maître de conférence, Faculté des Sciences de Caen); Mme CHARNASSE (C.N.R.S.); M. DUPREY (architecte); M. TRAN VAN KHE (musicologue, maître de recherche au C.N.R.S.); MM. JOSSERAND, AZAIS, GUILMOT (de l'Université de Toulouse); Dr DORGEUILLE; Melle M. PAILLE (professeur de musique); Soeur Marguerite (neuro-psychiatre); M. LANGEVIN P.G. (Faculté des Sciences); M. MARTY (informatique); Melle GRANCHE (orthophoniste); Melle ROCHE (étudiante en orthophonie); Mme BOREL-MAISONNY (orthophoniste); M. Serge DUNA (traducteur musical); M. BAERD (ingénieur ONERA); M. RONDELEUX (Directeur du Laboratoire de la voix); Dr PERROT; M. AROM (musicologue); M. CALINET (informaticien, CCA, CNRS); M. BATISSIER (Secrétaire du SIERE); M. JOUHANEAU (CNRS); M. CONDAMINES (Laboratoire d'Acoustique de l'ORTF); M. CHAILLEY Dominique (AFSDA); M. DELAMARE (ORTF); M. POUBLAN (médecin biologiste).

Plusieurs personnes ont omis de porter leur nom sur cette liste à leur arrivée; nous nous excusons donc de ne pouvoir leur faire suivre le bulletin.

EXCUSES :

Melle Gis-le BARREAU; M. J.E. MARIE; M. LEHMANN; Mme STRAUS; Dr VALLANCIEN;
M. P. LIENARD; M. J. CHAILLEY; M. GILOTAUX; M. COME SERGENT; M. SAMIE; Mme BIZAGUET;
Dr VEIT.

PERIODIQUE : 6 numéros annuels

Prix de vente : service gratuit

Imprimeur : Laboratoire de Mécanique Physique de la Faculté des Sciences de Paris.

Nom du Directeur : M. le Professeur SIESTRUNCK.

N° d'inscription à la commission paritaire : 46 283

P L A N

	<u>Pages</u>
I. <u>POSITION DU PROBLEME :</u>	
Généralités	1
L'oreille interne	3
II. <u>MECANIQUE ET ACOUSTIQUE DE L'OREILLE MOYENNE :</u>	
1°) L'étrier	4
2°) L'oreille externe et le tympan	7
3°) Le marteau	8
4°) L'enclume	9
5°) Le système ossiculaire global et sa fonction....	10
6°) Le cas des basses fréquences	11
7°) Variabilité des systèmes ossiculaires	12
III. <u>CONSEQUENCES PRATIQUES</u>	13
IV. <u>CONCLUSIONS</u>	16

REFLEXIONS SUR LA MECANIQUE
ET L'ACOUSTIQUE DE L'OREILLE MOYENNE

E. LEIPP

I - POSTION DU PROBLEME

1°) GENERALITES.

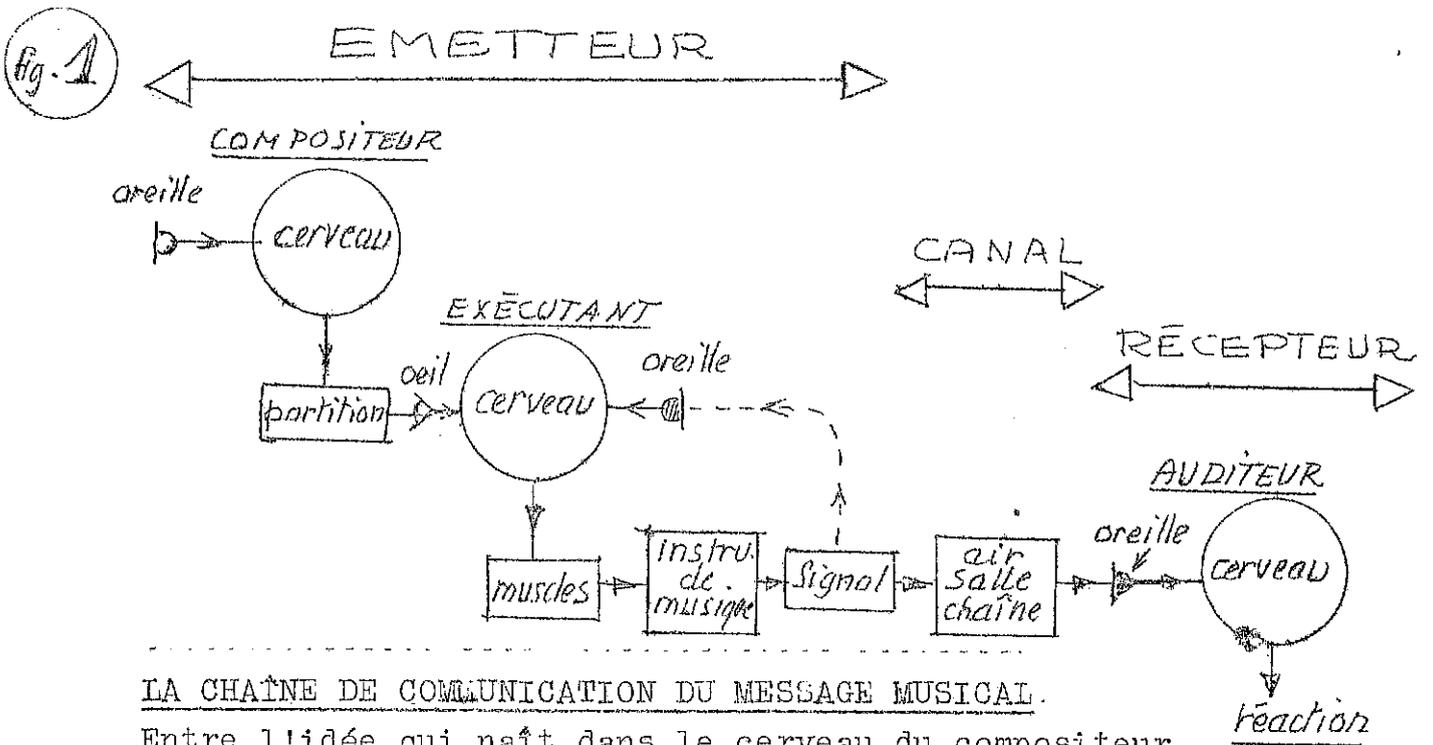
Tous les problèmes acoustiques que nous étudions; sont, en dernière analyse, des problèmes de communication de messages, qu'il s'agisse de musique, de parole ou de bruit. Un message implique toujours l'existence d'une "chaîne" comportant un émetteur, un canal de communication et un récepteur. Si ces trois grandes parties sont bien adaptées les unes aux autres, le message peut être capté et décrypté par le récepteur, et on aboutit normalement à une réaction de celui-ci. Mais en fait chaque partie se subdivise en un grand nombre de maillons : des conditions nombreuses sont donc nécessaires pour que le message atteigne son but.

Prenons le cas, particulièrement intéressant, ^{celui} de la musique (fig.1). L'émetteur conçoit le message musical à transmettre et le matérialise sous forme de vibrations aériennes. Ce peut être une seule personne (cas de l'organiste improvisateur par exemple); mais, plus généralement, le travail est partagé entre un compositeur qui fournit une partition, et un exécutant qui fabrique le signal acoustique corrélatif.

Le compositeur s'est au préalable servi de son oreille pour apprendre les sons musicaux et leurs règles d'association et d'exclusion dont il imagine une combinatoire qui est transcrite à l'aide de signes codés sur la partition. Celle-ci représente un véritable programme de mouvements destiné à l'exécutant, et dont la réalisation aboutit au signal acoustique.

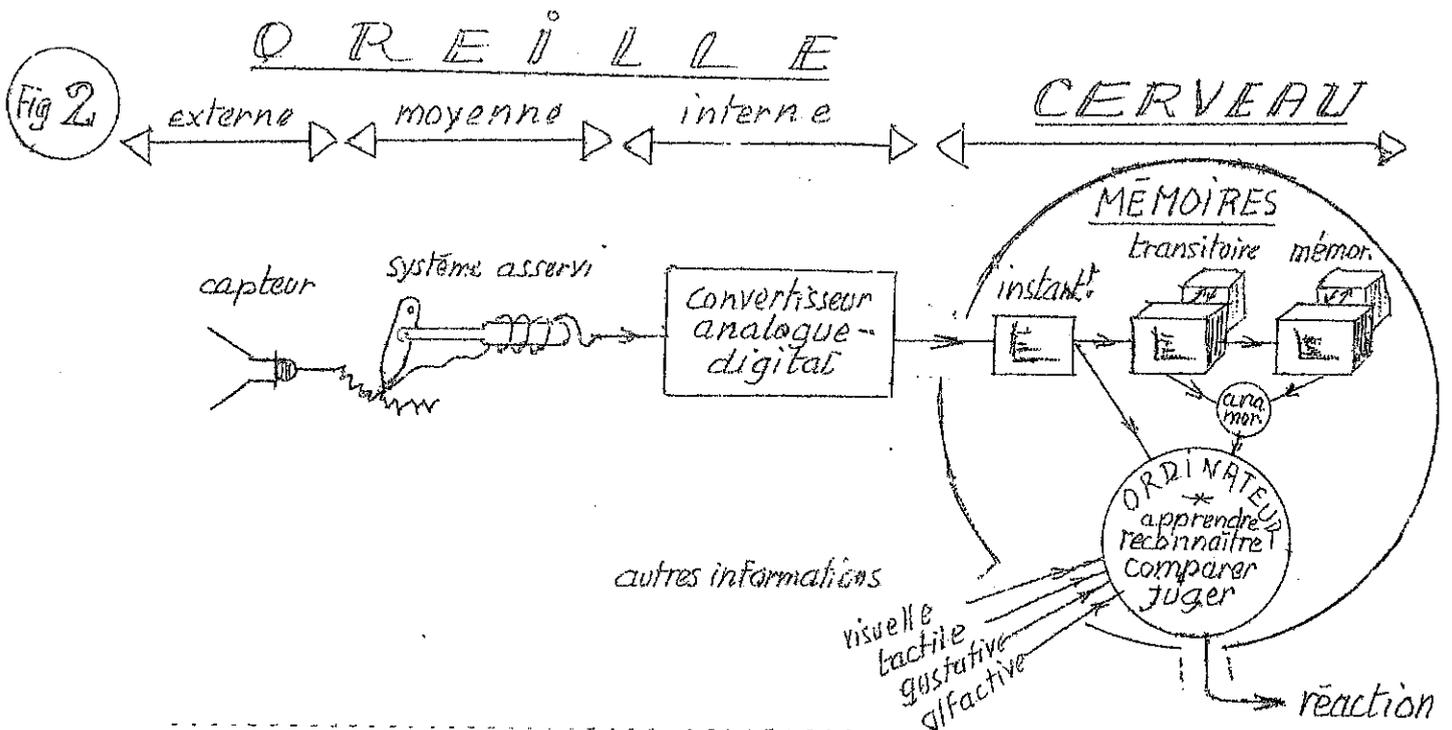
Une partie de ce signal retourne à l'exécutant; cette "boucle" de feed back permet de régler le jeu, d'envoyer éventuellement des ordres de corrections aux muscles; mécanisme important, où l'oreille intervient de façon décisive, pour la deuxième fois dans la chaîne. L'autre partie est envoyée dans le canal, qui peut être relativement simple (air libre) ou plus compliqué (salle). Entre le signal et la salle peuvent éventuellement être intercalés des maillons électro-acoustiques variés (microphones, haut-parleurs etc...). Finalement le signal, plus ou moins déformé par le canal, est capté par l'oreille du récepteur humain, et convoyé de là, après codage, vers le cerveau qui déclenche la réaction : le message a atteint son but. Insistons tout de suite sur le fait que l'oreille humaine intervient au moins trois fois dans la chaîne. Son rôle est donc déterminant dans la communication des messages acoustiques, et il serait par conséquent important d'en connaître les mécanismes de fonctionnement. Or on en est loin. Nous possédons certes des descriptions très détaillées et précises de son anatomie, mais sa physiologie reste encore largement hypothétique. Il n'est donc pas surprenant que, dans l'état actuel des choses, nous ne réussissions autant dire jamais à raccorder les théories en cours avec les faits, et lorsque nous tentons de comprendre ou de justifier la réalité sonore, en particulier la pratique empirique des musiciens, nous allons de paradoxe en contradiction. Des efforts sérieux de recherche restent donc à faire en ce domaine, et en attendant que l'on nous fournisse une théorie cohérente et suffisante, nous avons par nécessité, élaboré à notre usage un modèle fonctionnel indépendant de la réalité anatomique, mais définissant les fonctions associées nécessaires et suffisantes pour réaliser une simulation correcte de notre système auditif (fig.2). Tel qu'il est, ce modèle s'est avéré précieux comme "outil à penser et à comprendre"; son utilité est évidente dans notre propos et c'est pourquoi nous en donnons un schéma simplifié (fig.2).

...../



LA CHAÎNE DE COMMUNICATION DU MESSAGE MUSICAL.

Entre l'idée qui naît dans le cerveau du compositeur et la réaction du récepteur s'intercalent de nombreux "maillons". Le rôle de l'oreille, présente trois fois au moins, est déterminant.



UN MODÈLE FONCTIONNEL DE L'AUDITION.

La fonction de l'oreille est de capter dans les meilleures conditions les messages acoustiques que nous envoie le monde extérieur et de les convertir en informations digitales susceptibles d'être traitées par notre cerveau, véritable centre de traitement de l'information.

La fonction auditive se décompose en deux grandes parties : un système " périphérique " permettant de capter l'information et de la transformer en données utilisables par la suite; puis un "centre de calcul" où cette information, traitée selon des " programmes " variés, aboutit à la réaction du récepteur.

Le système capteur comporte d'abord une sorte de "cornet acoustique" destiné à amplifier la pression acoustique au niveau de la membrane du "microphone" : c'est l'oreille externe, dont nous dirons quelques mots.

Puis vient l'oreille moyenne, qui représente une sorte de "régulateur de tension", plus exactement d'adaptateur d'impédance entre le microphone et un convertisseur analogue-digital particulier : la "cochlée". Ici, le signal acoustique est codé en impulsions électriques qui sont ensuite convoyées vers le centre de traitement de l'information, c'est-à-dire vers le cerveau. Un tel centre suppose nécessaire en premier lieu des mémoires, dont nous distinguons trois types. C'est d'abord une mémoire instantanée où s'inscrit, continuellement, sous forme de configuration d'impulsions, une tranche de la réalité acoustique du moment. C'est une espèce de "mémoire tournante" dont la durée de rétention d'information est de l'ordre de quelques secondes. Lorsqu'un signal acoustique y apparaît, qui présente un certain intérêt pour le récepteur, il est alors stocké soit dans une mémoire transitoire, effaçable à volonté et par conséquent réutilisable indéfiniment; soit dans une mémoire mémorisante, non effaçable, où nous conservons une fois pour toutes ce que l'expérience nous a montré comme étant d'importance vitale à une certaine époque.

Cet ensemble de mémoires permet donc de stocker l'information à toutes fins utiles. Pour la traiter, un ordinateur est connecté aux trois mémoires. Un système anamorphoseur, convenablement disposé, permet de ramener les diverses variantes d'une même "forme impulsionnelle", d'un même son, par conséquent, à des dimensions standardisées.

Tel qu'il est, ce modèle permet de simuler toutes les opérations que fait notre système auditif. Apprendre, par exemple, c'est stocker les "formes" acoustiques codées dans les mémoires transitoire ou mémorisante. Reconnaître un signal acoustique c'est comparer l'"image" impulsionnelle qui apparaît actuellement sur l'écran de la mémoire instantanée, avec une forme similaire déjà apprise et contenue dans l'une des deux autres mémoires. Porter un jugement, c'est entrer dans l'ordinateur, à partir des mémoires, telles images impulsionnelles et procéder sur elles, à des opérations de corrélation, de comparaison etc. La réponse trouvée, l'ordinateur envoie un ordre, par exemple à certains muscles : nous pouvons dès lors observer la réaction du sujet au signal acoustique.

Nous n'entrerons pas plus avant dans les détails de ce schéma simplifié mais suffisant pour nous permettre de bien situer le maillon de la chaîne dont il sera question ici, à savoir l'oreille moyenne, et pouvoir comprendre la signification.

Insistons tout de suite sur l'importance exceptionnelle de ce maillon. Placé à l'entrée du système auditif, il constitue un véritable "filtre" de l'information. On ne peut donc acquérir et traiter que l'information acoustique susceptible de "passer" dans ce filtre; des performances brillantes au niveau des mémoires ou de l'ordinateur ne sont d'aucune utilité si ce maillon d'entrée est defectueux. L'étude de l'oreille moyenne est donc particulièrement intéressante; comparativement à celle de l'oreille interne ou du cerveau, elle est d'ailleurs relativement plus facile, car on dispose ici de données tangibles, relevant essentiellement de la mécanique. On peut escompter par conséquent, à défaut de résultats quantitatifs précis, obtenir au moins des renseignements réalistes sur la signification et l'allure des phénomènes en cause, renseignements sans lesquels il est de toute évidence vain de chercher à comprendre le fonctionnement et le rôle de l'oreille interne ou des organes auditifs des centres supérieurs.

Revenons à la fonction de l'oreille moyenne. Elle est clairement définie par le schéma précédent : il s'agit de capter et de transformer les vibrations aériennes

fig 3

Ce schéma montre les dispositions du système qui permet de capter les sons et de les "coder" en impulsions électriques utilisables par le cerveau.

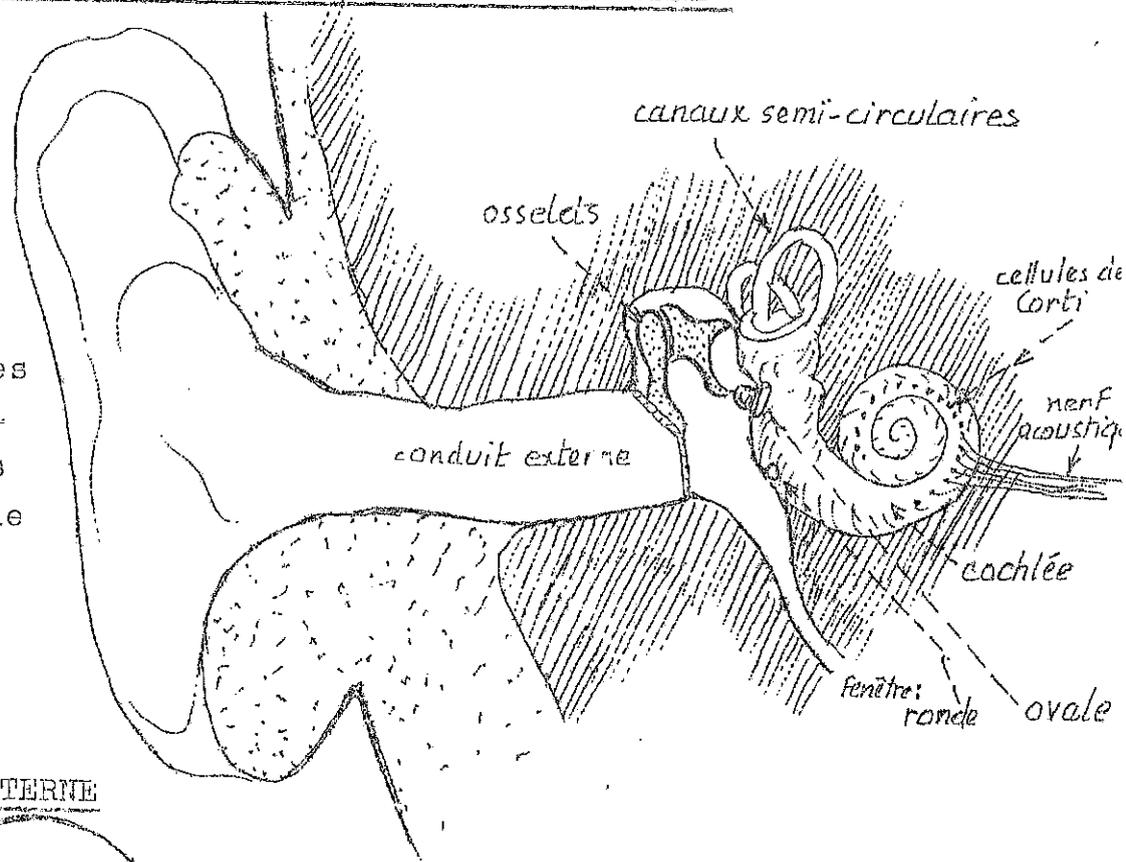
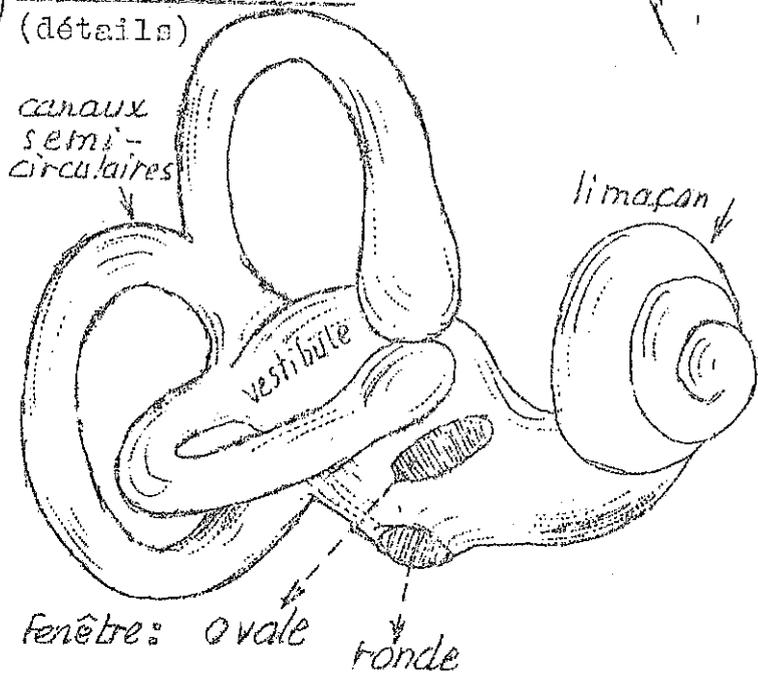


Fig 4a

L'OREILLE INTERNE (détails)



Lorsqu'un fluide passe dans un conduit de section variable, la pression est plus faible aux étranglements.

Fig 4c

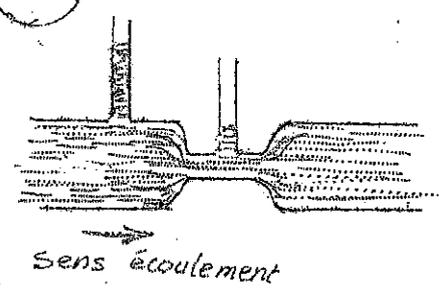
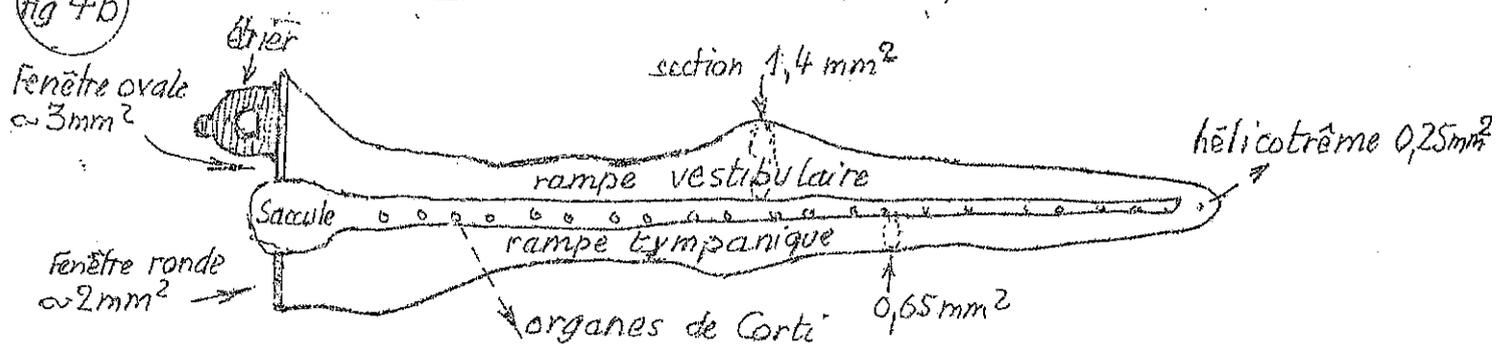


fig 4b

COCHLEE DEROULEE (longueur environ 32 mm)



Les sections des rampes sont loin d'être constantes... On retrouve le schéma 4c ci-dessus.

nes, de telle manière que l'information véhiculée par elles soit transmissible au maillon suivant. Comment la nature a-t-elle résolu ce problème dans la pratique ? C'est ce que nous allons essayer de préciser à la lumière, des données utilisables connues, auxquelles nous rajouterons quelques idées nouvelles, issues de nos propres expériences et observations.

Reprenons pour commencer un schéma bien familier (fig.3). Il représente l'ensemble du système auditif, à l'exclusion du cerveau. Le diamètre du tympan, quelque 10 mm, donne une idée suffisante des dimensions réelles.

Le but ultime du système pavillon-conduit-tympan-ossélets est de faire vibrer au mieux la membrane qui recouvre la fenêtre ovale, derrière laquelle se trouve l'organe sensible (cochlée). Celle-ci, à son tour, va coder en impulsions électriques la "forme" du signal acoustique actuel. Quoique l'oreille interne ne soit pas l'objet de notre propos ici, il convient cependant de donner quelques précisions à ce sujet.

2°) QUELQUES PARTICULARITES DE L'OREILLE INTERNE.

La figure 4a donne de l'oreille interne une représentation conforme à la réalité. Le volume compliqué que nous voyons ici est en fait une cavité, creusée dans un milieu osseux, et remplie de liquide (pérlimpe) dans lequel sont "noyés" de nombreux organes. On distingue en particulier le limaçon où sont disposées les cellules sensibles (de Corti), les trois canaux semi-circulaires, et les deux ouvertures, obturées par une membrane : la fenêtre ovale (quelque 3 mm² de section) et la fenêtre ronde (2 mm² environ). C'est par la fenêtre ovale que vont "entrer" les vibrations.

Pour plus de clarté, donnons un schéma simplifié de l'oreille interne, limaçon déroulé (fig. 4b). La pérlimpe remplit complètement les canaux semi-circulaires, la rampe vestibulaire - qui communique avec la rampe tympanique par une petite ouverture, l'hélicotreme (0,25 mm² environ). La colonne de pérlimpe s'appuie finalement sur la membrane de la fenêtre ronde. Un autre conduit rempli d'endolimpe, le canal cochléaire, contenant les cellules sensibles de Corti, débouche dans une vésicule particulière, le saccule.

Les cellules de Corti peuvent être assimilées à de petits cristaux piézo-électriques. Si on appuie dessus, à partir d'une certaine force, d'un certain "seuil", la cellule se déclenche et envoie une impulsion électrique dirigée par le nerf acoustique vers le cerveau.

La cavité occupée par l'oreille interne dans l'os est indéformable et les liquides sont incompressibles. Par conséquent, si on exerce une force sur la fenêtre ovale, on ne pourra "enfoncer" la membrane que s'il existe quelque part une "soupape de sécurité"; c'est la fenêtre ronde. Un appui graduel sur la fenêtre ovale va donc pousser le "piston liquide" coudé que représentent les rampes vestibulaire et tympanique : la membrane de la fenêtre ronde sortira alors vers l'extérieur. Comme la fenêtre ronde a une section plus faible que la fenêtre ovale, une "impédance" plus grande, un appui sur la fenêtre ovale déterminera des forces appliquées latéralement sur le canal cochléaire. C'est comme si on pinçait le canal cochléaire à la manière d'un compte-goutte. Mais les forces exercées localement aux divers points du canal cochléaire, seront différentes, car les sections des rampes vestibulaire et tympanique sont très irrégulières. Ce problème est bien connu en physique, et voici une expérience classique à ce sujet (fig. 4c). Si on fait passer un liquide dans une conduite dont la section se rétrécit, il est évident que la vitesse du liquide sera plus grande au point d'étranglement. En disposant deux manomètres, on vérifie corrélativement que la pression est plus faible en ce point qu'aux points de plus grande section.

Appliquons cette observation aux sections irrégulières des rampes : la conclusion est immédiate. Si on appuie sur la fenêtre ovale, on détermine des forces latérales variées sur les cellules de Corti. Celles pour lesquelles la force correspon-

dante sera supérieure au seuil de déclenchement, vont se mettre en action; les autres ne fonctionneront pas. En appuyant graduellement de plus en plus fort, sur la fenêtre ovale, on va donc mettre les cellules en route, les unes après les autres, dans un ordre apparemment arbitraire, mais dépendant en fait strictement des variations de section de la cochlée. A chaque instant on aura ainsi une "configuration" particulière de cellules en fonction, différente de l'instant suivant. Les impulsions électriques délivrées corrélativement traduiront à chaque instant l'état électrique de la cochlée, c'est-à-dire les variations de la force exercée sur la fenêtre ovale. A la limite, toutes les cellules fonctionnent. Il n'y a plus, alors, de configuration particulière; c'est du "bruit". Et rien ne change si l'on augmente encore la force d'appui; l'appareil électronique que représente la cochlée est saturé, et, par conséquent le supplément de force n'apporte plus d'information.

Prenons un deuxième cas. Au lieu d'une force graduellement croissante exerçons à présent sur la membrane de la fenêtre ovale relaxée, de toutes petites variations de force. Si elles sont trop faibles, aucune cellule ne fonctionne; aucune configuration d'impulsions ne chemine dans le nerf auditif. Peut-être certaines cellules seront-elles tout près du seuil et un supplément minime de force suffirait à les déclencher. Mais enfin, rien ne se passe.

Considérons maintenant un troisième cas. Appliquons à la fenêtre ovale exactement les mêmes variations de force que précédemment, mais après avoir légèrement forcé la membrane vers l'intérieur par un appui préalable supplémentaire. Dès lors, les cellules qui étaient près du seuil vont fonctionner: on capte maintenant l'information ^{Véhicule par} ces infimes variations de force, parce qu'on a "tendu l'oreille" et rajouté le supplément nécessaire pour les dépassements de seuil.

Prenons enfin un dernier cas. Remplaçons la membrane de la fenêtre ovale par une autre beaucoup plus épaisse, plus raide en un mot. Il est bien évident qu'il faudra à présent appliquer à cette membrane des forces beaucoup plus considérables pour obtenir le même résultat et faire fonctionner telles ou telles cellules. On notera qu'en utilisant une membrane plus raide, on modifie l'impédance mécanique du système liée à sa "résistance" à l'enfoncement. Mais par la même occasion, on change sa fréquence propre de résonance; elle "sonne" plus aigu si on l'excite par un choc, et, se mettra à résonner par "sympathie" pour des fréquences plus aiguës que précédemment. Toutes les considérations précédentes, que nous espérons avoir clairement formulées, nous devons les avoir constamment présentes à l'esprit par la suite, car elles sont indispensables pour comprendre la signification et le fonctionnement de l'oreille moyenne, que nous allons à présent essayer d'élucider.

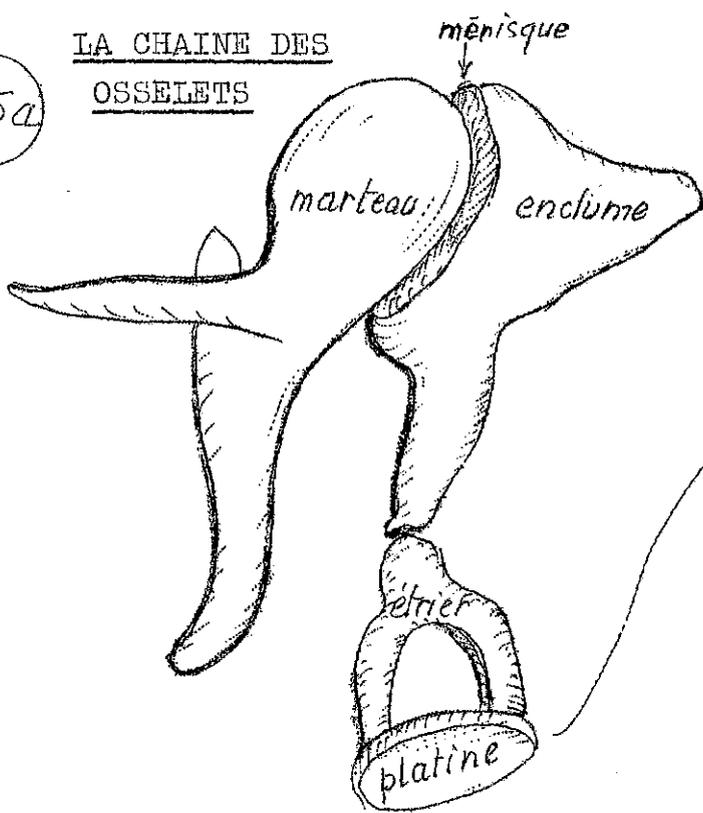
II - MECANIQUE ET ACOUSTIQUE DE L'OREILLE MOYENNE

1°) L'ETRIER.

Ce petit osselet, bien nommé, est gros comme un grain de riz à peine. Sa base, la "platine", a une section d'environ 3 mm². Nous avons vu plus haut que la fenêtre ovale avait une section du même ordre de grandeur: il est donc évident que la platine de l'étrier recouvre à peu près intégralement la membrane, avec laquelle elle est d'ailleurs solidarisée par un ligament annulaire (fig. 5a). Mais la platine n'est pas exactement centrée sur la membrane et les ligaments sont plus longs d'un côté que de l'autre (fig. 5b). Dans ces conditions, si on exerce une force perpendiculairement au milieu de la platine, celle-ci ne va pas s'enfoncer tout droit comme un piston, mais va simultanément tourner un peu à la manière d'un volet (fig 5c et d). Cette dissymétrie entraîne nécessairement de la distorsion harmonique: si l'on applique à la fenêtre ovale une force, une vibration sinusoïdale on percevra des harmoniques. La cochlée ne peut donc "entendre" de sons "purs", et même avec un son aérien sinusoïdal, la cochlée présentera un "état impulsionnel" déjà compliqué; à fortiori si on attaque la fenêtre

LA CHAÎNE DES OSSELETS

Fig 5a



LA PLATINE SUR LA FENÊTRE OVALE

Fig 5b

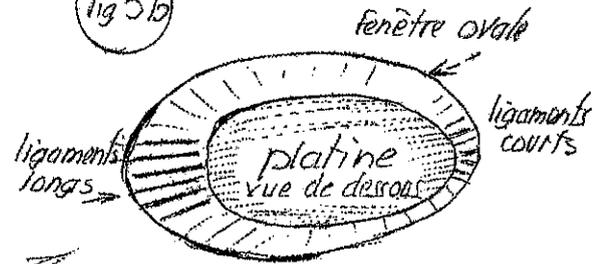


Fig 5c

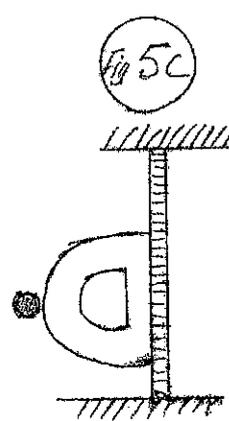
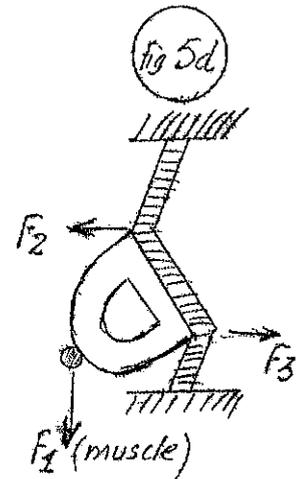


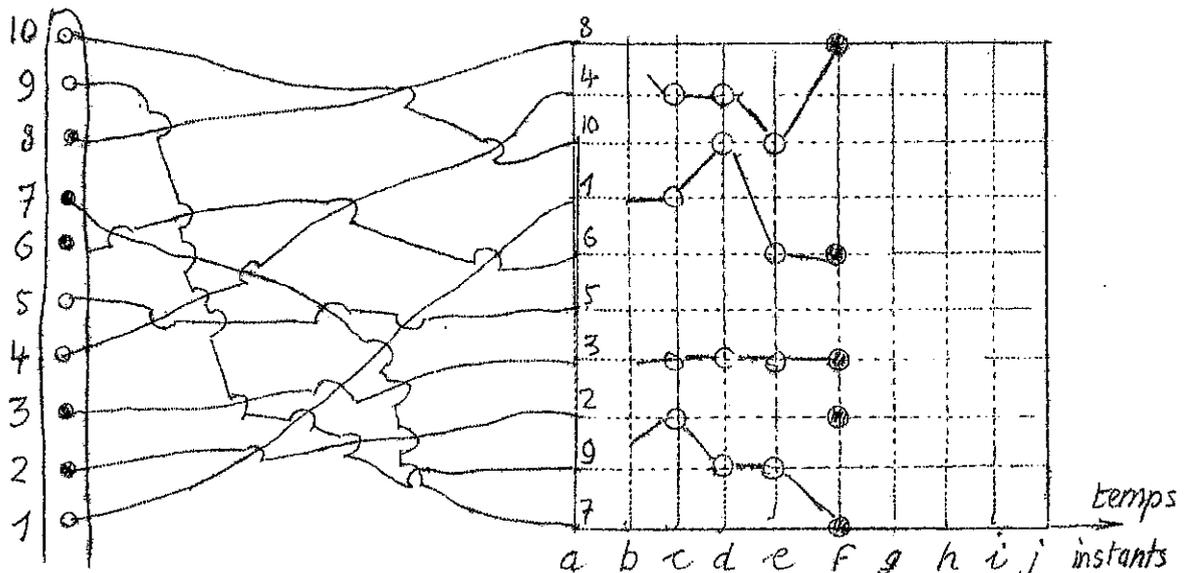
Fig 5d



Une traction du muscle "bride" la membrane de la fenêtré ovale, qui devient plus raide.

Fig 6

MECANISME DE CODAGE ENTRE LA COCHLEE ET LA MEMOIRE INSTANTANEE.



cochlée à l'instant f

mémoire im médiate

Les branchements entre les cellules sensibles de la cochlée et les "lignes" horizontales de la mémoire instantanée sont faits au hasard. Le système semble anarchique, mais à un même signal acoustique, correspond toujours la même "configuration" sur la cochlée à l'instant f et la même configuration sur la mémoire instantanée: on peut ainsi "apprendre" les sons.

Fig 7a

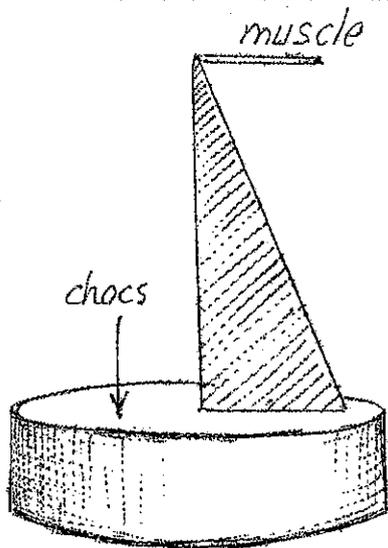
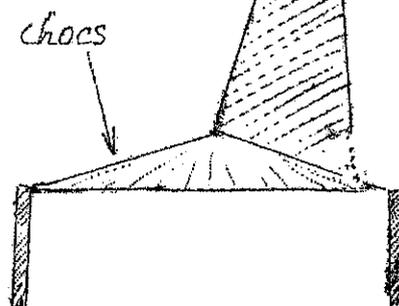


Fig 7b



Sur la peau d'un tambourin, on a fixé une équerre représentant l'étrier. Une traction sur le "muscle" qui est ici un élastique, fait basculer l'équerre et "tord" la membrane qui affecte une forme plus ou moins cônica. Les propriétés acoustiques du système considéré comme transducteur sont largement modifiées.

Fig 7c

MODIFICATIONS ACOUSTIQUES D'UNE MEMBRANE SOUS TENSION CROISSANTE.

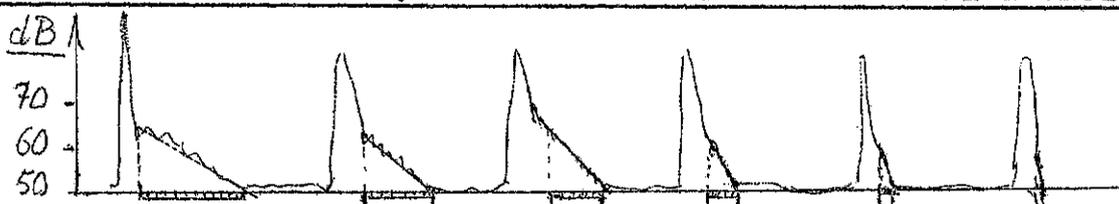
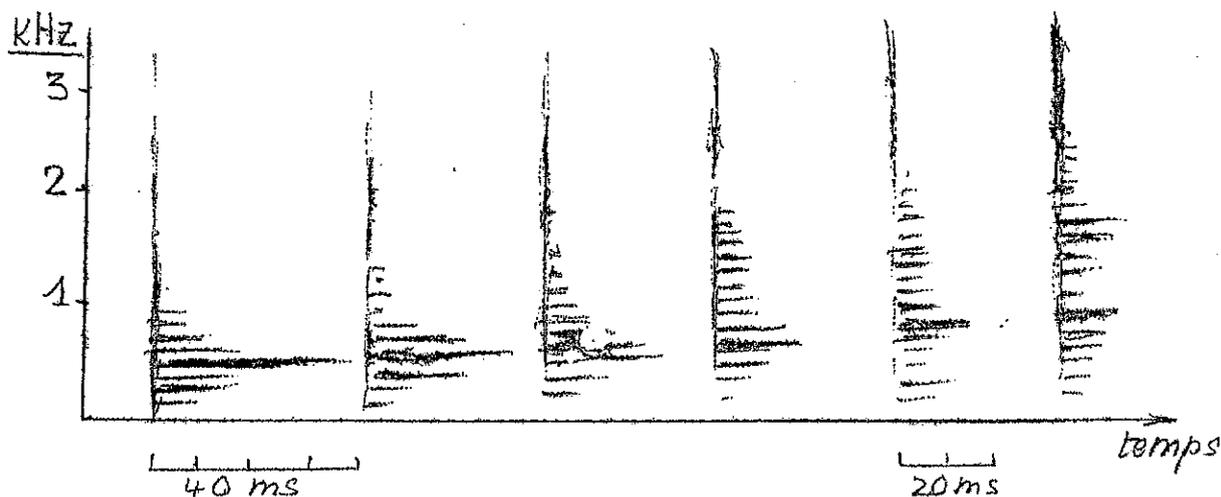


Fig 7d



On a excité la membrane (fig 7a) par la méthode des impulsions mécaniques et on relève les signaux acoustiques rayonnés par le système. On vérifie que la pente d'extinction devient de plus en plus raide et le signal plus bref (Fig 7c). Corrélativement, les son "monte" (les partiels s'écartent graduellement), et le timbre général devient de plus en plus aigu. Si cette membrane sert à capter des sons, ceux-ci sont donc plus ou moins largement déformés: la transmission n'est pas "fidèle".

ovale avec une vibration complexée. Pour les raisons physiques que nous avons précisées plus haut (irrégularité des sections des rampes), il est de toutes façons exclu que la configuration inscrite sur la cochlée puisse présenter une allure systématique, similaire à un "spectre" classique de décibels-hertz, où les composantes seraient alignées par ordre de fréquence, du grave (du côté de l'hélicotréme) vers l'aigu (du côté de la fenêtre ovale). Bref, contrairement à ce que l'on continue à répéter depuis HELMHOLTZ et indépendamment du fait qu'on ne voit pas comment un organe aussi amorti que l'oreille interne pourrait être sélectif, il ne peut se produire d'analyse fréquentielle au niveau de la cochlée. La meilleure preuve en est que personne à notre connaissance n'a jamais su définir la place et les intensités relatives des 20 ou 30 composantes (cas très habituel) d'un son normal de notre environnement. L'oreille n'est pas une machine à analyser les sons. Cette analyse ne nous serait pas très utile dans la vie courante... Par contre c'est un appareil à reconnaître des formes, et pour cela il n'est absolument pas besoin qu'il se projette une configuration organisée systématiquement sur la cochlée (fig 6). Ce qui est important, c'est qu'un certain signal acoustique extérieur donne sur la cochlée une configuration, une "image" contenant autant d'information que le son lui-même. Cette image peut être complètement "codée" et n'avoir pas davantage de ressemblance avec la "forme" réelle du son qu'il n'y a de ressemblance entre le mot "chat" écrit en lettres quelconques et la forme de l'animal réel. Le tout est d'avoir appris le code. La forme codée n'est pas le signal acoustique, mais elle le représente. Ce qui est simplement important, c'est que le même signal acoustique produise chaque fois sur la cochlée la même "forme", la même "image", le même état. Dès lors nous pouvons reconnaître les signaux extérieurs, même si nous en ignorons complètement la structure physique.

Dans ces conditions, bien entendu, notre système auditif n'a pas besoin d'être "fidèle", dans le sens que l'on attribue à ce mot en technologie électro-acoustique. Par contre, il est capital, que ce système soit sensible, car cela nous permettra de capter le maximum d'information dans notre environnement sonore normal.

Mais qui dit "sensible" dit fragile... En fait le système est fragile mécaniquement : une pression trop forte de l'étrier risque d'endommager ou de détruire la cochlée. Le système est aussi "fragile" électriquement : il comporte des composantes physiologiques assez imparfaites, faciles à "saturer" en particulier ! Mais la nature a pourvu à la protection de l'oreille interne ! Pour cela, elle a disposé un muscle au bon endroit (fig. 5c). Le tonus de ce muscle peut être largement réglé. Nous n'avons pu obtenir de renseignements sur les forces susceptibles d'être développées par ce muscle, mais on peut estimer celles-ci à quelques grammes. Une chose est sûre : lorsque le muscle se tend, il fait basculer latéralement la semelle de l'étrier, ce qui détermine sur la membrane une force f_2 qui la tire vers l'extérieur, et une force f_3 qui la pousse vers l'intérieur. Ce faisant la membrane s'enraidit, et corrélativement les amplitudes diminuent pour une même excitation. Ce muscle assume donc un rôle de protection contre la destruction et la saturation de la cochlée.

Mais en modifiant la raideur de la membrane on modifie simultanément l'impédance acoustique du système. Ceci se traduit, pour un certain signal, par une déformation lors de sa transmission au maillon suivant. En effet, comme il a été précisé, si on tend une membrane, on modifie à la fois sa courbe de réponse, et aussi son amortissement. Une surtension détermine donc non seulement des altérations dans les spectres des signaux transmis, mais aussi des changements dans l'amortissement.

Pour le montrer, nous avons fait l'expérience simple suivant (fig.7). Une équerre, simulant plus ou moins l'étrier est fixée sur la peau d'un tambourin; un élastique, fixé au sommet de l'équerre, simule le muscle tenseur (fig. 7a). Pour relever la courbe de réponse du système, on excite la peau par des impulsions mécaniques, selon une méthode que nous avons souvent utilisée en lutherie pour définir les propriétés acoustiques des tables de violon. On tend graduellement le "muscle" (fig.7g) et on relève le signal acoustique sur bande magnétique, d'où on tire :

- un relevé de la courbe de niveau (fig. 7c). On y vérifie immédiatement que la pente d'extinction du son, significative de l'amortissement du système, augmente graduellement avec la tension - ce qui était prévisible. Cela signifie que le "traînage" du

...../

son lors d'un choc devient de plus en plus bref lorsque la tension augmente : la "constante de temps" change donc; plus la tension est forte, plus le "pouvoir séparateur temporel" du système augmente.

- un relevé du sonagramme, qui apporte de nombreux compléments d'information. Le sonagramme confirme d'abord ce qui vient d'être précisé sur le "traînage". Avec la peau détendue, le signal se prolonge au delà de 40 millisecondes; avec une tension plus forte, cette durée baisse à quelque 20 ms. D'autre part, on vérifie - ce que l'on perçoit à l'oreille - que le son monte. En effet, avec l'augmentation de tension les raies spectrales entre 100 et 1000 Hz en particulier s'écartent de plus en plus. Le "timbre" général devient plus aigu : au début de l'opération, le spectre est peu fourni au-dessus de 2500 Hz; mais la bande située entre 2000 et 4000 Hz devient graduellement de plus en plus dense.

La modification de la raideur de la membrane se traduit donc par une forte distorsion du signal transmis tant en niveau qu'en fréquence et durée, bref par une modification importante de la "forme" de la vibration. Mais rappelons-le, la haute-fidélité ne joue ici aucun rôle : l'important est de pouvoir protéger l'oreille interne en cas de besoin et d'autre part, de disposer d'une possibilité de modifier la courbe de réponse, pour pouvoir éventuellement favoriser un signal faible en plaçant la "bosse" de la courbe de réponse au bon endroit.

Une question a soulevé déjà pas mal de disputes : l'action de ce muscle (comme celle du tenseur tympanique, dont nous parlerons plus loin) est-elle volontaire ou non ? Les travaux de divers chercheurs (WAAR, en particulier, en 1923) ont montré que chez certains sujets, le tonus est commandé volontairement. Ceci peut résulter de dispositions naturelles. Mais l'entraînement systématique, conscient ou non, permet sûrement d'agir systématiquement sur ce muscle; c'est probablement le cas pour la quasi totalité des musiciens ou des gens soumis à des bruits fluctuants dans leurs activités professionnelles.

Quoi qu'il en soit :

- Si la tension est réflexe, l'oreille interne est efficacement protégée à condition que la durée d'établissement du transitoire du son soit plus longue que celle de l'établissement du tonus musculaire et dans la mesure où les performances dynamiques du muscle sont suffisantes. Dans le cas contraire, l'oreille n'a pas le temps ou la "force" de s'accomoder, avec tous les dégâts que cela risque de causer au système auditif.
- Si la tension est volontaire, on peut alors prérégler la tension de façon, soit à protéger volontairement l'oreille interne, soit à "tendre l'oreille" au mieux pour percevoir des sons faibles. Comme ce "préréglage" modifie les propriétés du système, il est évident que, pour un même son, la sensation d'intensité, de timbre, de hauteur et de durée ^{varie corrélativement} et directement ^{en} fonction de :

- la prévisibilité du signal
- du contexte du signal.

Les musiciens exploitent cette propriété de l'audition depuis toujours ! Ils savent très bien qu'un mezzo-forte venant immédiatement après un pianissimo semble beaucoup plus fort et a une autre sonorité "subjective" que le même mezzo-forte venant après un fortissimo.... Cette observation exclut toute possibilité de chiffrer en décibels les intensités sur une partition, comme le proposait autrefois STOKOWSKI !

La possibilité de régler la tension du muscle de l'étrier correspond en fait à un élargissement de la dynamique. Sans ce mécanisme, le champ dynamique de l'oreille, c'est-à-dire l'écart en décibels entre le point où l'on commence à percevoir quelque chose et le point où l'oreille est saturée serait beaucoup plus faible et nous

...../

Fig 8

LA PAVILLON,
LE CONDUIT,
LA CAISSE TYMPANIQUE

en coupe. Le tympan, dont le diamètre est voisin de 1 cm, donne l'échelle.

(d'après GREGOIRE ET OBERLIN)

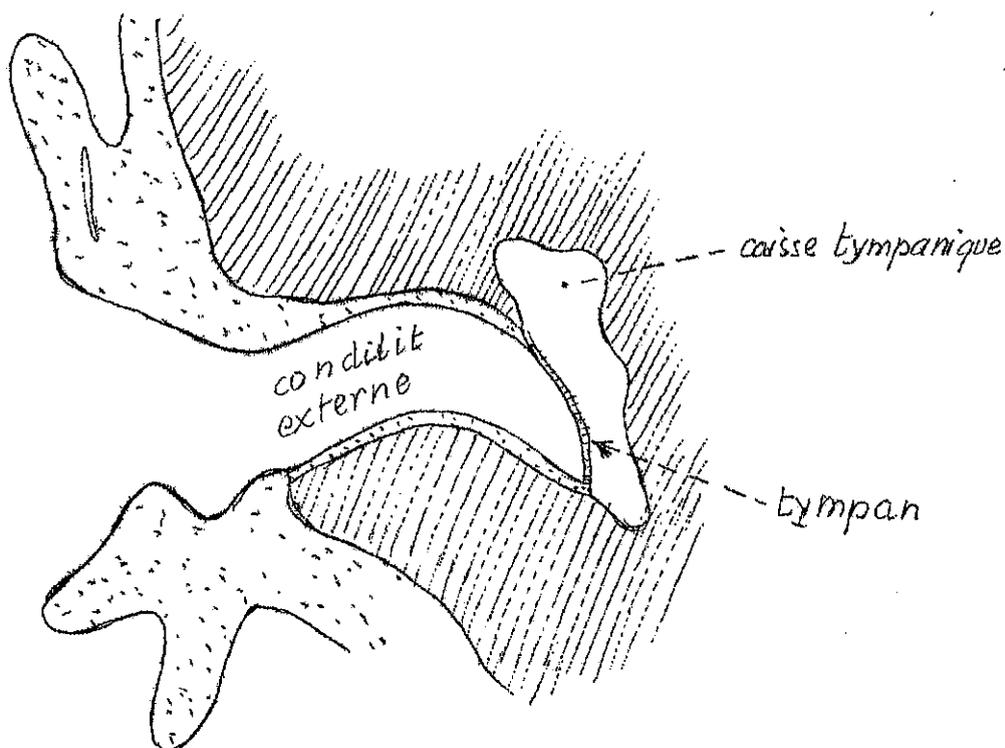
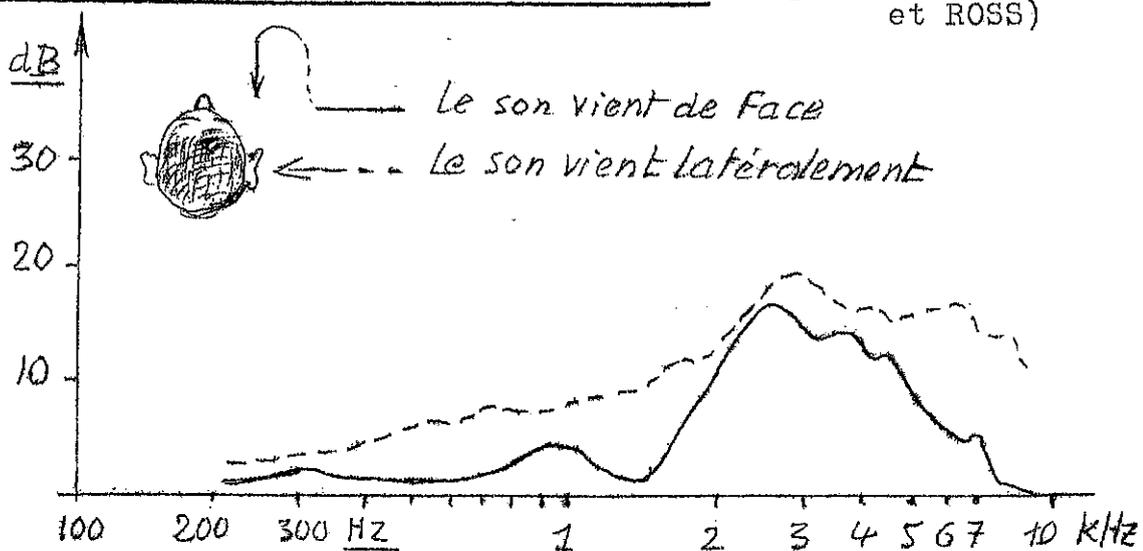


Fig 9

LE CONDUIT EXTERNE, AMPLIFICATEUR DE PRESSION (Expérience de WIENER et ROSS)



En prenant simultanément la pression acoustique ambiante donnée par des sons sinusoïdaux de fréquence variable et en la comparant avec la pression au niveau du tympan, au fond du conduit, on vérifie que cette pression est plus forte au fond du conduit, dans des proportions variables avec la fréquence, mais de l'ordre de 15 dB dans la zone de résonance du conduit (2-3000 Hz). Il est évident que si la source est directionnelle, on trouve des différences avec l'expérience précédente, mais l'allure du phénomène reste la même et montre le rôle important du conduit. Ce phénomène est sans doute responsable en grande partie de l'allure générale des courbes d'isotonie de FLETCHER

ne supporterions certainement pas des variations dynamiques de 70 ou 80 dB comme c'est le cas normalement. De ce point de vue, on sait bien que la paralysie du muscle de l'étrier entraîne de l'hyperacousie : les sons paraissent tout de suite trop forts. De même on s'explique facilement l'impossibilité pour les personnes âgées ou fatiguées physiquement, de supporter des bruits intenses, plus exactement des variations importantes de dynamique. Sans doute le "recrutement" est-il lié également à des déficiences musculaires, limitant la possibilité de "tendre l'oreille", soit pour mieux percevoir, soit pour atténuer un signal. Il n'est pas impossible, encore, que le phénomène bien connu de la cocktail-party soit lié à ces mécanismes. On sait de quoi il s'agit. Nous réussissons à suivre parfaitement le discours d'un locuteur parlant dans un mélange de conversations. Une certaine "accomodation" de la courbe de réponse de notre oreille permet probablement de mieux centrer les pointes de résonance de cette courbe sur les régions spectrales particulières à tel locuteur. Tout cela resterait à étudier, mais un fait est certain : la disposition si particulière du système : fenêtre ronde-étrier-muscle tenseur, représente un moyen remarquable pour protéger et "optimiser" notre système auditif, dont l'efficacité est encore accrue grâce à d'autres dispositions de l'oreille interne dont nous allons parler maintenant, à savoir le système oreille externe-tympan-marteau-enclume.

2°) L'OREILLE EXTERNE ET LE TYMPAN. (fig.8)

Pour matérialiser des vibrations aériennes, le plus simple et le plus économique consiste à disposer dans le champ acoustique une membrane qui se mettra à vibrer sous son influence. Cette membrane est ici le tympan. D'un diamètre d'environ 1 cm et d'une épaisseur irrégulière, voisine en moyenne de $1/20^{\circ}$ de mm, le tympan est un organe complètement dissymétrique du point de vue de ses propriétés mécaniques; et cela d'autant plus qu'un osselet est fixé radialement sur sa face intérieure ! Il est important que cette membrane soit sensible pour une large gamme de fréquences, ce qui implique un organe amorti. D'autre part il est bon qu'elle se mette en branle pour des sons très faibles. De ce point de vue, le tympan bénéficie dès le départ de conditions favorables dues aux particularités de l'oreille externe. En effet, le pavillon est un véritable "collecteur d'ondes". Sa surface de contact avec le champ acoustique ambiant est relativement grande, et comme sa section se réduit graduellement, il joue plus ou moins le rôle de "concentrateur d'énergie", en collaboration avec le conduit, d'ailleurs. On peut se demander pourquoi sa forme est si torturée et irrégulière. Nous avons bien le sentiment que la fonction essentielle du pavillon est celle de "coupe-vent". Si l'homme, placé dans la nature, doit entendre au mieux un bruit, comprendre la parole, repérer la direction d'où vient un signal etc... le pavillon lui est déjà précieux, car en tournant la tête d'une certaine manière, et en orientant le pavillon correctement on peut augmenter assez nettement l'intensité perçue du son. Si le pavillon était lisse ce serait sans doute encore mieux... Mais s'il y a du vent, le problème change notablement : avec cette forme compliquée du pavillon les filets d'air sont déviés dans tous les sens et se perdent par frottement dans les replis. D'autre part, cette petite bosse, en avant de l'entrée du conduit, le tragus, tel un tremplin, dévie tout jet d'air arrivant tangentiellement sur l'oreille.

De son côté, le conduit, qui suit le pavillon a une longueur de 25 à 35 mm, un diamètre variable entre 7 et 10 mm environ. C'est un véritable petit tuyau quasi cylindrique bouché à une extrémité par le tympan, et qui présente des propriétés de résonateur. Un calcul simple montre que la fréquence propre de ce tuyau-résonateur, variable selon les individus, est voisine de 3000 Hz. Il est certain que cette fréquence de résonance détermine une amplification des fréquences correspondantes du signal acoustique qui entre dans l'oreille. Mais comme il s'agit d'un système très amorti, à courbe très plate, cette résonance n'est pas une fréquence discrète, mais couvre toute une large bande de fréquences. Elle est certainement responsable de l'allure de la courbe de FLETCHER au seuil d'audition. Mais ce conduit joue également un rôle d'amplificateur de pression acoustique. WIENER et ROSS, en 1946 ont fait une série d'expériences qui l'ont clairement mis en évidence (fig.9). Ils ont produit un champ acoustique fixe, et à l'aide d'une sonde, ils ont mesuré le rapport entre la pression au voisinage du tympan et la pression en champ libre. Dans l'axe du conduit, par exem-

...../

ple, ce rapport varie avec la fréquence. Autour de 3 ou 4000 Hz, le niveau au fond du conduit dépasse de 15 décibels celui du champ extérieur... Les auteurs ont d'ailleurs refait la même expérience pour des angles d'incidence variés des "rayons" sonores.

De notre côté, nous avons fait une expérience non moins démonstrative. Un microphone de faible diamètre (1/2 pouce BRUEL et KJAER) est passé à travers une plaque d'expansé de nylon (fig. 10a). On prépare un large entonnoir de verre (longueur 30 cm, petit diamètre 3 cm, grand diamètre 20 cm environ). Une phrase, préparée au préalable sur boucle magnétique est diffusée par une chaîne de bonne qualité. On enregistre la phrase sur un autre magnétophone, une première fois en disposant l'entonnoir devant le microphone, une autre fois en l'enlevant. L'enregistrement de niveau indique, avec l'entonnoir, un niveau supérieur de près de 20 dB avec l'entonnoir (fig. 10b). Le sonagramme (fig. 10c) montre le gain considérable de densité et de netteté de l'image acoustique lorsqu'on utilise l'entonnoir. Tout cela confirme les expériences de WIENER et ROSS, donc le rôle de concentrateur d'énergie de l'oreille externe.

Nous avons fait une deuxième expérience intéressante en procédant de la façon suivante. On utilise un tambour arabe, simulant assez bien le conduit externe et le tympan à l'échelle 10 environ. Un accéléromètre est collé sur la membrane dont il capte les mouvements. On émet alors un son riche en harmoniques (trompette d'orgue) et on enregistre simultanément sur deux pistes magnétiques séparées le son aérien et le signal donné par l'accéléromètre (fig. 11a). On vérifie, en tirant le sonagramme (11b), que les deux images acoustiques obtenues sont très différentes. La hauteur, c'est-à-dire l'écartement des raies est bien entendu la même, mais la composition spectrale diffère profondément. Alors que le son aérien est très riche et possède une trentaine d'harmoniques jusqu'à 6000 Hz (fig. 11b 1), le spectre de la membrane est fortement filtré au-dessus de 3000 Hz, et l'intensité relative entre les divers harmoniques inférieurs est fortement modifiée (fig. 11b 2). On note en particulier une région favorisée, entre 2000 et 3000 Hz, qui correspond à une "bosse" de la courbe de réponse de la membrane; les harmoniques de la bande 3000-6000 Hz existent cependant toujours, quoique fortement affaiblis. Bref, la "fidélité" vibratoire de la membrane est assez faible; par contre sa sensibilité est bonne, puisque toutes les composantes du son s'y retrouvent. Toutes les conditions sont réunies pour pouvoir reconnaître des sons quelconques avec ce dispositif, puisque le même signal aérien donnera toujours le même spectre au niveau de l'accéléromètre. Si, par contre on diminue la sensibilité du système, par exemple en bourrant le "conduit" de coton hydrophile, le système perdra beaucoup en efficacité, comme le montre alors le sonagramme (11b 3), le grave du spectre "passe" assez bien; cette région spectrale est distordue mais ceci ne serait pas gênant. Par contre tout est coupé au dessus de 2500 Hz, et nous perdons ici beaucoup d'information à cause de la baisse de sensibilité du système.

En résumé, l'oreille externe et le conduit jouent le rôle de coupe-vent, de concentrateur d'énergie, de filtre, tout en facilitant éventuellement le repérage de la direction d'où vient le signal. Tout est donc organisé pour que le tympan vibre au mieux. Le problème, à présent, va consister à communiquer ces vibrations dans les meilleures conditions à la tête de l'étrier : ce sera le rôle du marteau et de l'enclume.

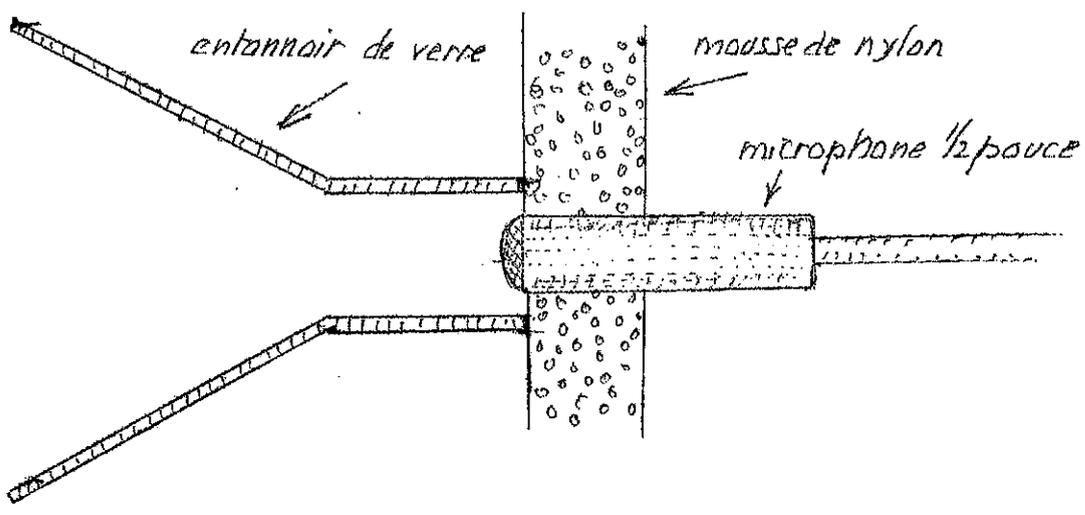
3°) LE MARTEAU.

C'est un osselet de forme très particulière, où l'on distingue la tête, le manche et deux apophyses latérales que l'on voit bien, schématisées sur la figure 12a qui représente le tympan vu de l'intérieur. Cet osselet est maintenu en place par trois ligaments, dont un seul est visible ici, et par un muscle à peu près perpendiculaire au plan de la figure dont nous indiquons le point d'insertion. Le manche de l'osselet est inséré radialement sur le tympan, de la même manière que l'étrier l'est sur la fenêtre ovale. Si l'on tire sur le muscle, le marteau tourne plus ou moins autour de l'axe constitué par les apophyses. Mais cet axe ne reste en réalité pas fixe; il se déplace plus ou moins dans le sens de la force exercée par le muscle. Corrélativement, le tympan se creuse plus ou moins en entonnoir, comme le montrent les figures 12b et c, où le marteau est maintenant vu de côté. Etant donné l'irrégularité

...../

Fig 10a

SIMULATION EXPERIMENTALE DU PAVILLON ET DU CONDUIT



Un entonnoir de verre représente pavillon et conduit simultanément. Dans un coussin de mousse de nylon, on fait passer un microphone de petit diamètre. On produit un son complexe, comprenant de nombreux harmoniques, par exemple de la parole, et on enregistre successivement la même phrase, avec et sans entonnoir ; à la simple écoute des enregistrements, la différence est considérable ; pour la préciser on analyse le phénomène au sonographe.

Fig 10b

SONAGRAMMES AVEC ET SANS PAVILLON

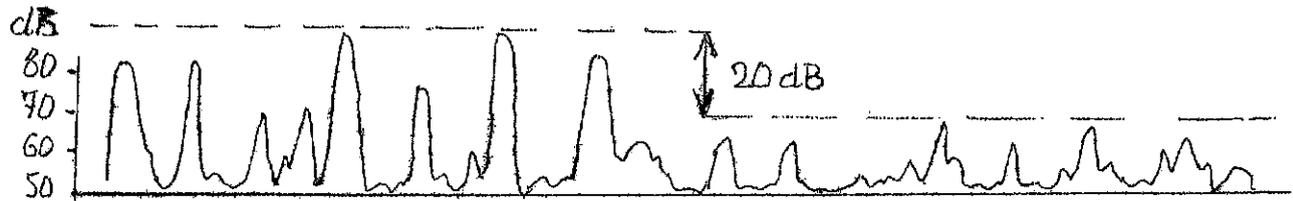
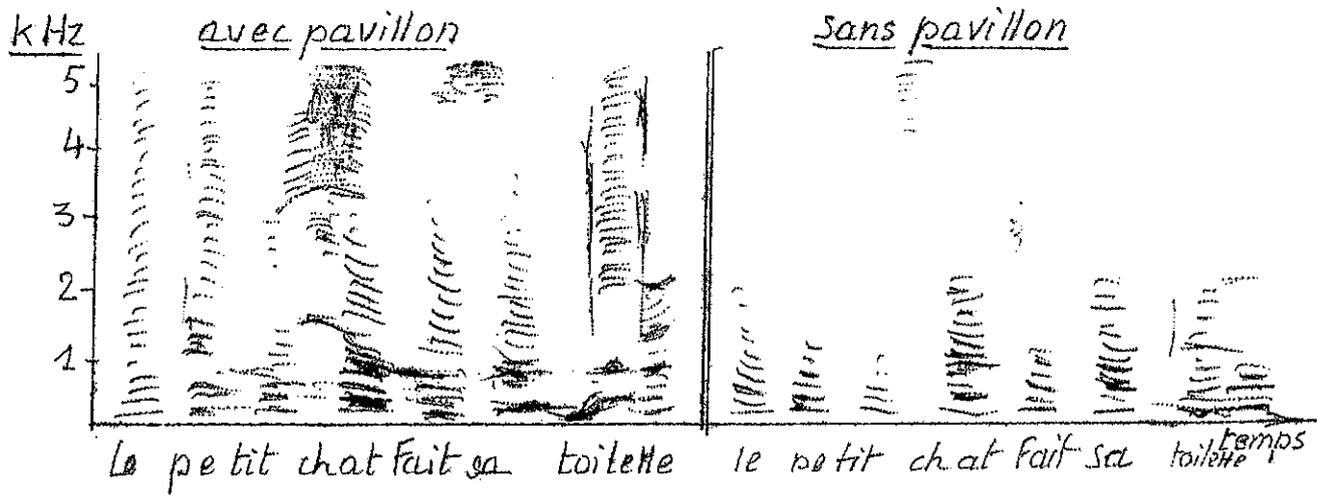


Fig 10c

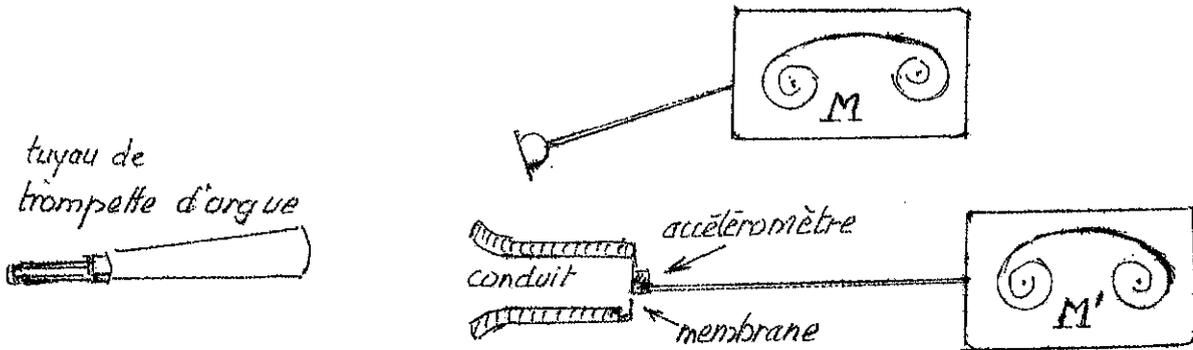


Le petit chat fait sa toilette le petit chat fait sa toilette

La phrase est enregistrée, toutes choses égales (distance est intensité); sans pavillon, tout est filtré audessus de 2000 Hz pratiquement et les "formes acoustiques" sont beaucoup moins nette (on "entend" moins bien la parole...)

Fig 11a

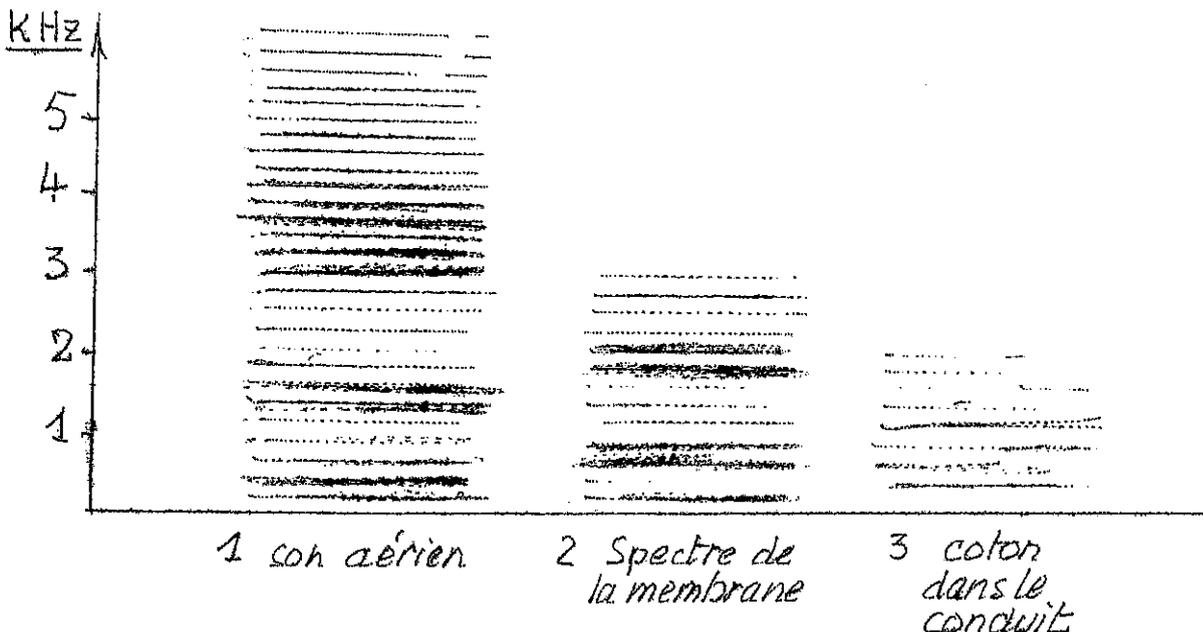
DISPOSITION EXPERIMENTALE POUR MONTRER LA DEFORMATION DU SIGNAL PAR LA MEMBRANE et le conduit.



On produit une note musicale stable, riche en harmoniques (trompette d'orgue, par exemple). On enregistre simultanément sur bande le signal à une certaine distance, avec un microphone normal, puis à l'aide d'un accéléromètre collé sur la membrane d'un système simulant l'oreille externe conduit et membrane, à l'échelle 10). On met ainsi en évidence les déformations du son tel qu'il est capté par le marteau, par exemple.

Fig 11b

SONAGRAMMES COMPARATIFS correspondant à l'expérience ci-dessus.



La différence entre son aérien et spectre de la membrane est énorme: filtrage, déplacement des régions formantiques; de la qualité du son primitif, on ne conserve que la hauteur: spectres et (nécessairement) transitoires sont totalement différents. Si on met du coton dans "l'oreille" ci-dessus, le filtrage est encore plus important; mais la hauteur (l'équidistance des raies harmoniques) reste perceptible.

Fig 12a

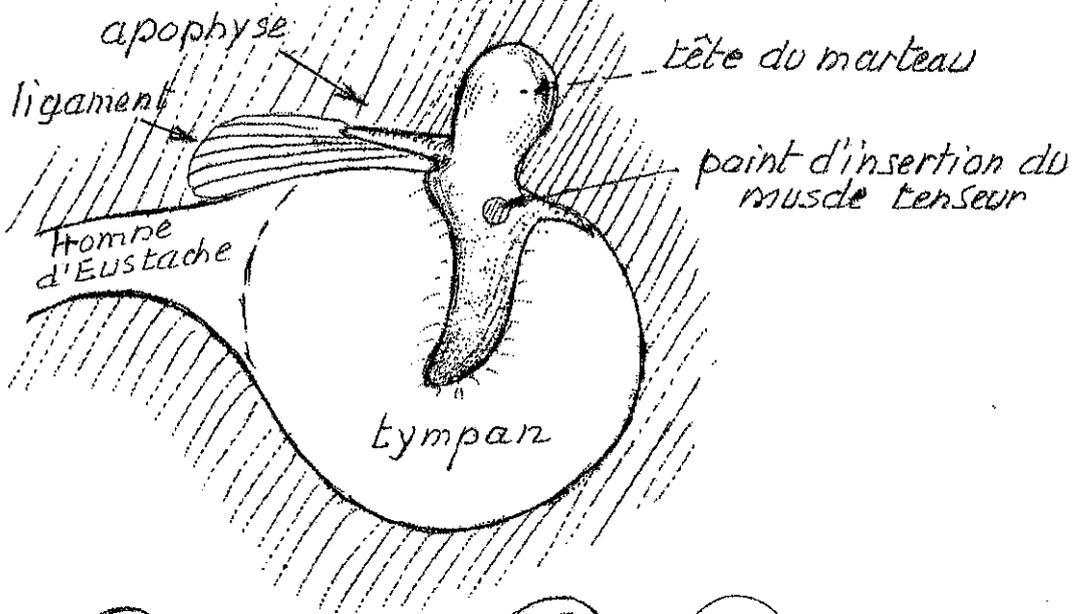


Fig 12b

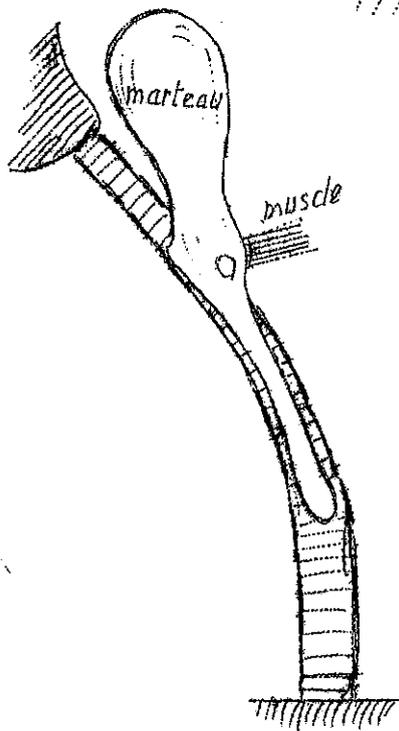
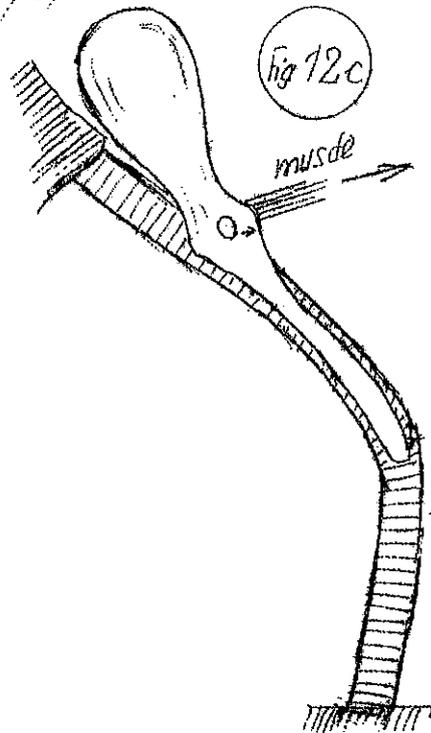


Fig 12c



Sous l'effet de la traction du muscle le marteau bascule, son axe étant tiré légèrement en dedans; le tympan se creuse en entonnoir irrégulier.

Fig 12e

PROFIL DU TYMPAN

(d'après les courbes de niveau ci-contre, données par BEKESI.

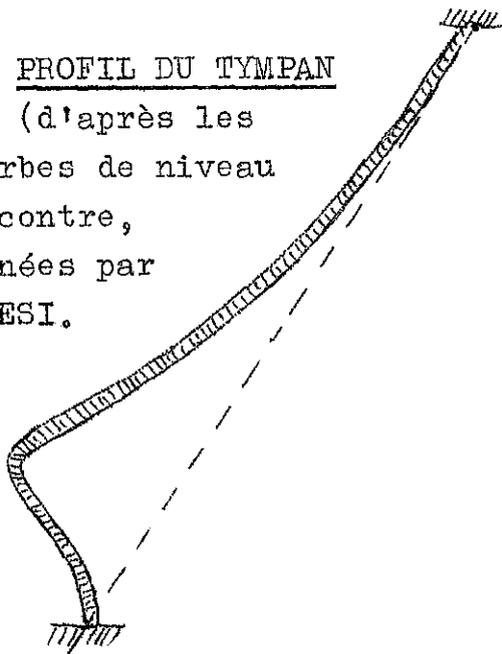
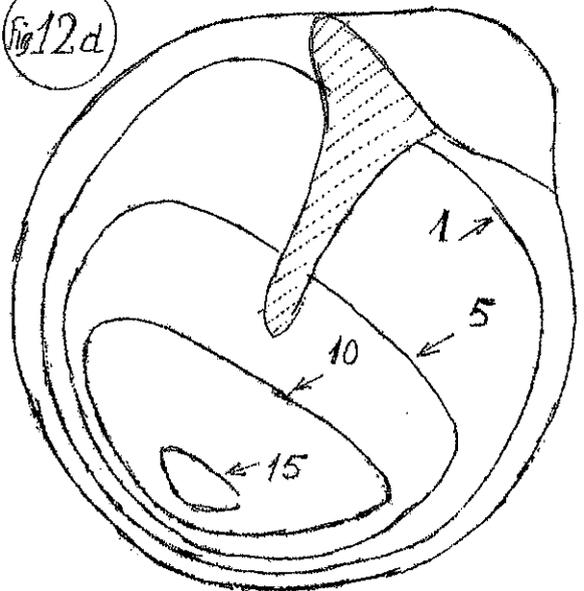


Fig 12d



Lignes de niveau du tympan tendu par le marteau.

d'épaisseur et de raideur du tympan, et la présence du manche du marteau, l'"entonnoir" est loin d'être régulier. La figure 12d nous donne une idée de ce qui se passe dans la réalité (selon BEKESI). Les nombres, sur les "courbes de niveau" représentent des rapports : sur la ligne (1) par exemple, la membrane "sort" 15 fois plus que sur la ligne (15), etc... Nous avons tracé le profil de l'"entonnoir" en question, qui est encore plus parlant (fig. 12e).

Pour le tympan, le marteau et le muscle tenseur, on peut répéter strictement tout ce qui a été dit plus haut au sujet de la fenêtre ovale de l'étrier et de son muscle. Sous l'effet de la tension du muscle, la raideur, la courbe de réponse, l'amortissement, la constante de temps du système se modifient tous. Le muscle tenseur du tympan joue, lui aussi, un rôle de protection contre les trop grandes amplitudes extérieures; lui aussi contribue à la faculté de "tendre" l'oreille, pour mieux faire émerger un certain signal. Il en découle de même des altérations corrélatives des sensations d'intensité, de timbre, de hauteur, de durée et variables selon la prévisibilité du signal et de son contexte acoustique, comme on l'a vu précédemment dans le cas de l'étrier et de la fenêtre ovale. Il se pose encore ici la question : action volontaire ou réflexe du muscle; et la même réponse : coexistence des deux modes d'action, dans des proportions variables avec les individus et leur entraînement. Une fois de plus il est certain que le système tympan-marteau, étant donné ses caractéristiques physiques et ses dispositions ne peut être un système transducteur fidèle. Comme tout y est dissymétrique, il y a nécessairement des distorsions importantes du signal. Mais ici encore le système est sensible : le marteau bouge aux moindres sollicitations aériennes du tympan. Ici encore, le système réglable, est efficace pour explorer un large champ dynamique : bref, on retrouve exactement les mêmes mécanismes et les mêmes effets : le message est acheminé jusqu'au marteau dans les meilleures conditions.

Il reste à présent à raccorder le marteau avec l'enclume pour boucler la chaîne. Le maillon qui va remplir ce rôle est l'enclume.

4°) L'ENCLUME.

Sa longueur est voisine du centimètre, son poids de quelque 50 milligrammes. Elle est maintenue en place dans la chambre tympanique par deux ligaments, mais il n'existe ici aucun muscle. L'enclume est donc un organe passif, dont les mouvements sont commandés indirectement par le muscle de l'étrier et celui du marteau.

On trouve couramment dans les manuels des figures représentant la disposition des osselets de l'oreille moyenne associés, mais ces représentations sont généralement inadéquates pour expliquer le fonctionnement mécanique du système. De même, on nous affirme couramment que les trois osselets représentent un système de leviers articulés; mais on ne nous donne aucune précision quant à l'ordre de grandeur des forces agissantes, ^{quant à} leurs points d'application ^{et} aux points d'appui. Parfois on nous indique bien les ligaments, dont la fonction est très secondaire, mais on oublie de dessiner l'important, c'est-à-dire les muscles et leur direction etc...

Nous avons trouvé un seul schéma correct, et qui permet de comprendre les mouvements et mécanismes en cause, donc la signification de l'oreille moyenne. C'est la figure que nous donne GELLE, dans un ouvrage déjà ancien (bib.5) (fig.13), et qui montre la caisse tympanique vue d'en haut. L'enclume est solidarisée, couplée de façon plus ou moins lâche avec la tête du marteau par l'intermédiaire d'un ménisque. La tête du marteau se meut donc à la façon d'une rotule, d'un pilon dans un mortier. Disons tout de suite que du fait de la mobilité relative de l'axe des apophysiques du marteau, la surface de contact (point d'application des forces déterminées par le tenseur tympanique est difficile à préciser de façon rigoureuse...

Le point d'appui de l'enclume sur la paroi de la chambre tympanique est clairement indiqué (a), et on comprend parfaitement comment cet osselet oscille autour de ce point, qui est d'ailleurs plus ou moins mobile. En effet, l'extrémité de la branche longue de l'enclume, (apophyse lenticulaire) est couplée plus ou moins lâchement avec la tête de l'étrier par des ligaments. Si le muscle de l'étrier exerce une traction latérale, on conçoit aisément que l'apophyse lenticulaire (b) de l'enclume soit également tirée peu ou prou vers le bas. Dans ces

conditions, le ligament qui fixe le point (a) contre la caisse se distend plus ou moins; le point d'appui se déplace donc légèrement, et corrélativement les mouvements de bascule du marteau deviennent plus difficiles.

Nous possédons à présent les éléments nécessaires pour comprendre le mécanisme global et la fonction acoustique du système ossiculaire.

5°) LE SYSTEME OSSICULAIRE COMPLET ET SA FONCTION.

Le système ossiculaire est assemblé avec ses deux muscles. Que se passe-t-il lorsque les muscles entrent en action ?

Si on tend le muscle du marteau seul, le tympan s'enfonce et le marteau tourne autour de son axe. Pour une rotation trop forte, (30° environ) on a montré qu'il se produit pratiquement une déconnection entre la tête du marteau et l'enclume. Les vibrations du tympan, sous l'effet de la vibration aérienne, cessent alors pratiquement d'être communiquées à l'enclume : le signal ne "passe" plus. Pour une position intermédiaire, par contre, le marteau fait basculer l'enclume autour de son point d'appui, et l'apophyse lenticulaire applique une force sur la tête de l'étrier, quasi-perpendiculairement à la fenêtre ovale. Celle-ci va s'enfoncer en biais avec un mouvement de piston-volet, comme il a été précisé (fig. 14a et 14b). Plus le tonus du muscle tenseur est grand, plus l'ensemble du système ossiculaire deviendra raide; de surcroît, les frottements au niveau du ménisque et des autres articulations vont augmenter. Il en résulte nécessairement une diminution des amplitudes, avec toutes les conséquences sur la distorsion du signal que nous connaissons. Pour fixer les idées, voici un ordre de grandeur des phénomènes en cause, selon les expériences faites par divers chercheurs :

- WEVER, LAWRENCE et SMITH, en 1948 ont montré qu'en déconnectant l'enclume de l'étrier on observait une chute de 60 dB dans l'audition.
- HUGHSON et CROWE, en 1933 utilisent la méthode de la réponse cochléaire. Ils exercent une tension de 50 g sur le tenseur tympanique; l'enraidissement détermine un filtrage de l'aigu du spectre transmis; au-dessus de 2000 Hz il ne reste pratiquement rien.
- WIGGERS fait des expériences similaires et trouve une chute de 45 décibels à 100 Hz, consécutive à l'enraidissement du système.

Le muscle du tenseur tympanique agit donc indirectement sur la fenêtre ovale sous l'aspect d'une force F_1 (fig.14b). Mais si on tend simultanément le muscle de l'étrier, la force F_2 provoquera, de plus, la "torsion" de la membrane de la fenêtre ovale (fig.14c). La tension du muscle de l'étrier déplace bien entendu le point d'application (p) de la force F_1 vers (p'). Au niveau de la membrane de la fenêtre ovale cela se traduira de même par un déplacement des forces d'appui vers le bord, et nécessairement par une diminution des amplitudes vibratoires. Bref, en appliquant simultanément les deux forces F_1 et F_2 (fig.14d) résultant respectivement du muscle tenseur tympanique et du muscle de l'étrier, on augmente considérablement l'efficacité de "freinage" du système ossiculaire, et ces dispositions représentent une solution très raffinée pour obtenir le maximum d'effet avec le minimum de moyens. En fait, les deux muscles travaillent synergiquement. Le freinage s'accompagne bien entendu de distorsions cumulées : lorsqu'un son excite le tympan, toutes les parties de l'oreille ont des mouvements dissymétriques, y compris les osselets. Pour ceux-ci, DAHMANN l'a montré depuis bien longtemps (1929) en fixant sur chaque osselet d'un modèle conforme à la réalité un petit miroir dont il enregistrerait photographiquement les mouvements selon une méthode classique (fig.15). Insistons encore une fois sur le fait que les distorsions résultantes ne présentent aucun inconvénient, si le système transducteur est sensible à tous les détails de la forme acoustique en présence, car rappelons-le, le problème ultime, pour notre système auditif est de reconnaître une forme à travers un code appris.

En résumé, la nature s'est arrangée pour cumuler des sécurités destinées à empêcher la destruction ou la saturation de l'organe sensible de l'audition; la cochlée.

Fig 13

Le croquis de Gellé est clair et explicite; muscles et point d'appuis sont indiqués; on peut comprendre dès lors le mécanisme. On n'a pas indiqué les ligaments qui ne feraient qu'embrouiller le dessin; ce n'est pas gênant de toutes façons: les ligaments ne servent qu'à maintenir le système en place de façon souple. Contrairement à ce qu'on dit parfois, la fonction de la chaîne ossiculaire n'est pas celle d'un levier; c'est un dispositif à impédance réglable.

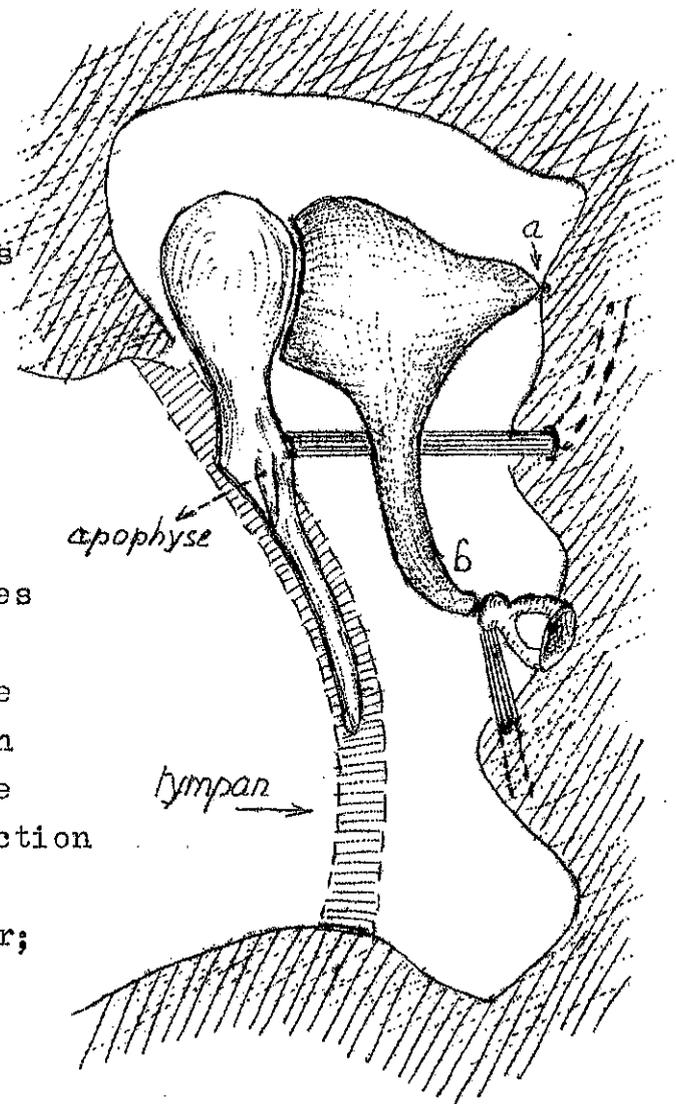
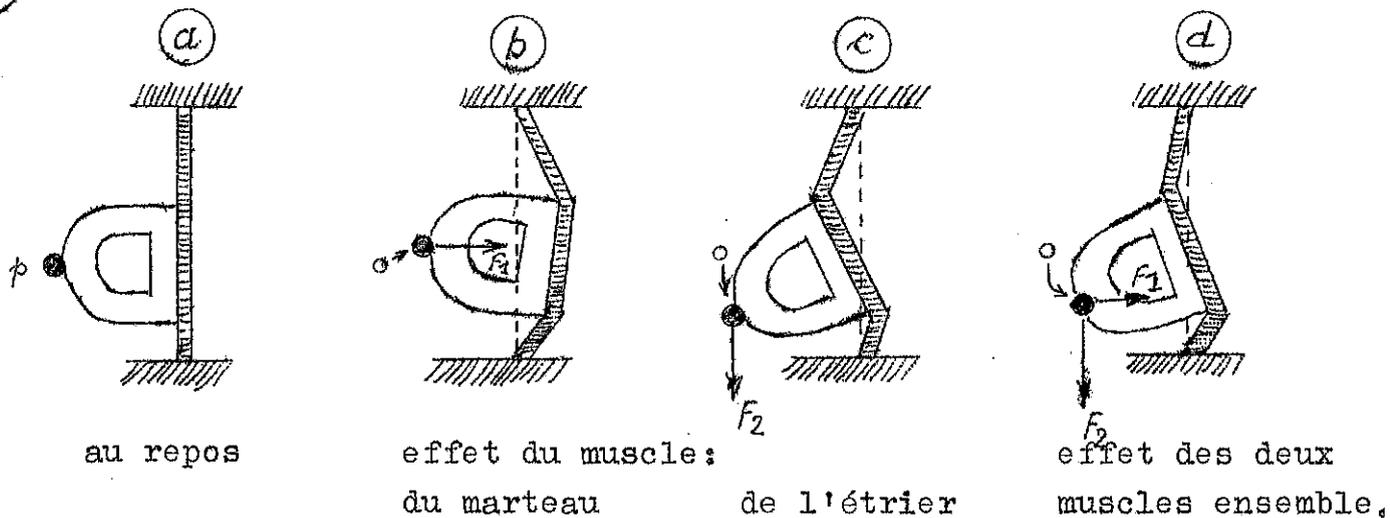


Fig 14

MOUVEMENTS DE LA FENETRE OVALE SOUS L'EFFET DES DEUX MUSCLES



Le muscle tenseur du marteau enfonce (irrégulièrement) la membrane de la fenêtre ovale; le muscle de l'étrier la "tord"; l'effet des deux muscles s'ajoute pour enraidir au mieux le système et freiner les trop grandes amplitudes. Corrélativement le signal est distordu, ce qui n'a pas d'importance si le système reste sensible.

Mais l'appareillage utilisé a une double fonction : il permet aussi de faire émerger éventuellement des signaux extrêmement faibles par réglage adéquat de sa courbe de réponse. L'efficacité tutélaire du dispositif est d'ailleurs encore accrue par la possibilité, lorsqu'un signal est prévisible, de déboucher la trompe d'Eustache. C'est une expérience bien connue des artilleurs, qui évitent ainsi la destruction du tympan par des ondes intenses à front raide. En effet, l'onde qui entre par la bouche annule alors plus ou moins celle qui entre par l'oreille, en agissant en sens inverse sur la face interne du tympan. Ce mécanisme, volontaire, complète donc celui de la musculature ossiculaire - à condition bien entendu que le signal soit prévisible. S'il ne l'est pas, cas du "bang" supersonique, il est beaucoup plus nocif.

Une observation importante doit être formulée ici. L'accommodation de la chaîne ossiculaire par modification volontaire ou réflexe du tonus des muscles, se produit continuellement lors de l'écoute d'un phénomène acoustique normal, dont l'intensité varie toujours plus ou moins largement, la musique en particulier, où la dynamique est de quelque 70 ou 80 dB. Cette "accommodation" est un phénomène macroscopique : les déplacements du tympan, par exemple, peuvent être de l'ordre du millimètre. Il ne faudrait absolument pas confondre ces mouvements des osselets avec les vibrations acoustiques qu'ils propagent simultanément, qui sont ultra-microscopiques et échappent pratiquement à toute observation directe, au microscope. Nous insistons sur ce point car on a réalisé des films montrant des mouvements d'osselets qui ne peuvent manifestement pas être ceux qui véhiculent le message acoustique. Pour s'en convaincre, il suffit de considérer le diagramme des amplitudes vibratoires au seuil de perception pour les différentes fréquences, (fig.16). Dans la gamme normale des messages acoustiques de notre environnement, entre 100 et 15000 Hz environ, on vérifie que ces amplitudes tournent autour du diamètre de la molécule d'hydrogène (10^{-7} mm), et sont encore beaucoup plus faibles dans la région de maximum de sensibilité de l'oreille (2000 Hz). Il ne peut donc être question d'observer au microscope des osselets vibrant, d'autant moins qu'à de tels grossissements, la profondeur de champ serait nulle... On retiendra donc que, lors de l'audition, le système ossiculaire est l'objet des deux types de mouvements tout à fait distincts, qui peuvent exister de façon autonome et dont les rôles, éventuellement combinés, sont tout à fait différents. D'une part les muscles ossiculaires adaptent continuellement le système sur le niveau du signal évolutif, en le plaçant dans des positions variables; d'autre part les déplacements alternatifs, microscopiques, qui correspondent aux vibrations du signal et qui se font autour de ces positions. Les premiers de ces mouvements ont un rôle tutélaire; les autres transmettent le message. Il s'agit d'une distinction importante et qui remet en cause de nombreuses expériences faites depuis HELMHOLTZ.

Il nous reste à dire à présent quelques mots au sujet d'un cas particulier, celui des basses fréquences.

6°) LE CAS DES BASSES FREQUENCES.

Les basses fréquences, en dessous de quelque 20 Hz ne sont plus appréhendées par la cochlée, et pourtant de nombreux indices montrent qu'elles sont perçues par l'homme. Le problème est complexe. Une très basse fréquence, un "infra-son" peut mettre en vibration un objet quelconque, situé dans son champ. Cet objet est susceptible de vibrer plus ou moins à sa fréquence propre, audible. C'est par exemple le cas d'un verre posé sur une table. Le bruit produit par les vibrations de ce verre est évidemment perçu par la cochlée : son spectre est situé dans la gamme sensible de l'oreille comme il est facile de le vérifier. L'infra-son est donc "entendu", mais indirectement. Autre cas similaire : le plancher, la chaise ou le banc sur lequel on est assis se met à vibrer. L'infra-son est alors perçu par sensation tactile (inertie de nos organes internes). On peut encore imaginer d'autres modes d'appréhension des infra-sons. Ainsi, les différences de pression lente qu'ils provoquent peuvent agir sur la cage thoracique par exemple. Mais il semble bien que l'oreille interne puisse percevoir directement les infra-sons, quoique la cochlée ne soit manifestement pas organisée pour cela. On possède quelques indices de ce point de vue. On sait par exemple qu'un sujet, soumis à des basses fréquences, est victime de troubles variés, en particulier d'équilibre, dont on sait qu'ils

...../

sont liés à la présence des canaux semi-circulaires. Or ces organes baignent dans le même circuit périlymphatique que la cochlée et sont donc, eux aussi, soumis aux effets de l'accomodation ossiculaire, mouvements du tympan sous l'effet de son muscle tenseur en particulier. Lorsqu'on observe les dispositions de l'oreille interne (fig.17) on voit bien que tous les organes baignant dans l'endolymphe : cochlée, saccule, sac endolyphatique, utricule, canaux semi-circulaires communiquent entre eux et sont tous simultanément soumis aux effets des vibrations aériennes sur la fenêtre ovale. Or, certains de ces organes, dont le rôle est mal connu, pourraient bien jouer un rôle en perception des infra-sons. Ainsi, les deux vésicules, l'utricule et le saccule. Le saccule, avec le "sable" qu'il contient, est sans doute lié à la sensation de verticalité. Mais l'utricule, lui, ne contient pas de sable; les dispositions générales de l'organe suggèrent, par contre, une grande similitude avec un classique manomètre à membrane. Cet organe pourrait donc bien être sensible aux basses fréquences et enregistrer, par sa macule, des variations lentes de pression.

On pourrait de même admettre que l'utricule serve à jauger continuellement l'état de tension du système ossiculaire, bref la force exercée par la platine sur la fenêtre ovale, et l'utricule permettrait ainsi d'apprécier le niveau moyen des phénomènes acoustiques que nous écoutons; ce serait une espèce de décibelmètre très amorti (inertie), qui mesurerait l'intensité de façon grossière pour cela : ce serait l'organe du sens de l'intensité. Accessoirement l'utricule pourrait ainsi expliquer certains "restes auditifs" chez des sourds. Mais alors la perception des basses fréquences serait nécessairement soumise aux variations de tonus des muscles ossiculaires, en particulier du tenseur tympanique. Les signaux de basse fréquence serait alors bien entendu soumis aux mêmes lois que l'audition normale : distorsion du signal, rôle important de la prévisibilité, du contexte, etc... Quoiqu'il en soit, la perception des très basses fréquences est, dans le cas normal, d'importance secondaire. Un infra-son ne peut, par définition, véhiculer beaucoup d'information puisque les changements d'état des organes sont alors très lents car c'est ce qui change dans le temps qui véhicule l'information acoustique....

Les éléments qui précèdent, auront apporté, nous l'espérons, quelques idées fondamentales claires sur la mécanique et l'acoustique de l'oreille moyenne, au moins en ce qui concerne l'allure des phénomènes en présence. Mais l'observation courante nous montre, pour un même message acoustique, des réactions humaines très variables, souvent opposées. Il nous manque donc maintenant des données importantes que nous allons essayer de préciser à présent.

7°) VARIABILITE DES REACTIONS INDIVIDUELLES AUX PHENOMENES ACOUSTIQUES.

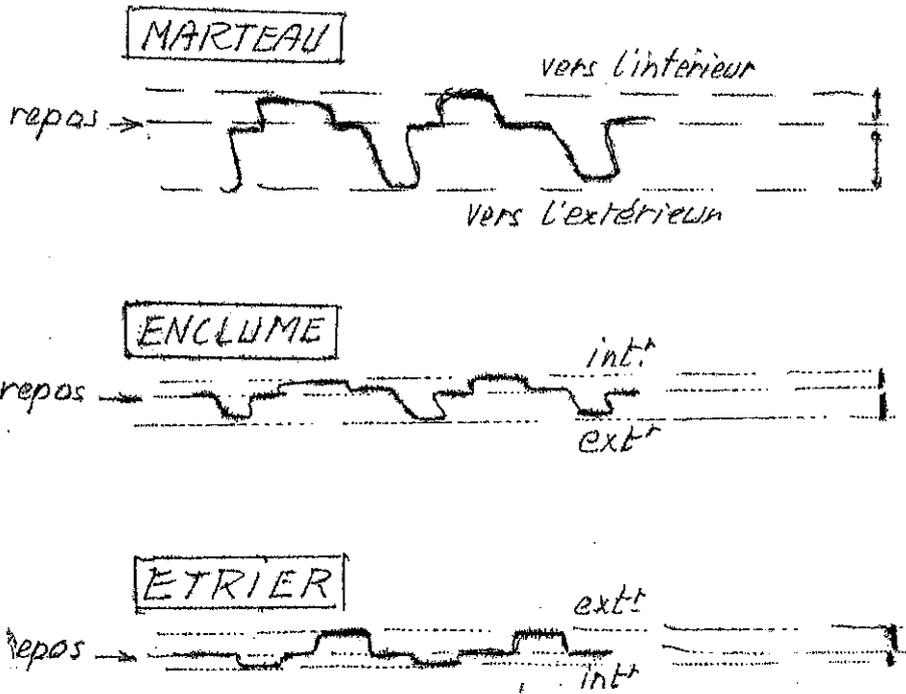
Elles tiennent d'abord à la variabilité de l'anatomie et de particularités physiques des divers organes de l'oreille moyenne de chacun. De naissance, tout diffère d'un individu à l'autre : disposition des osselets, dimensions, masse de l'ensemble du système, raideur des éléments en présence, amortissement, performances des muscles ossiculaires répartition des forces, couplages, etc...

Il est donc bien évident que le même signal acoustique détermine pour chaque individu des sensations variables, dont il est impossible de préciser les différences, car les sensations sont incommunicables, sauf très grossièrement. Cela n'a finalement aucune importance : chaque individu fait son propre apprentissage, élabore son propre code et nous sommes tous d'accord pour dire : "voilà un son de violon, d'accordéon, voilà un chant d'oiseau". Il n'y a pas de quoi en être surpris : on peut appeler mentalement un concept donné à partir de bien des "signes" codés de façon quelconque. Je puis "voir" mentalement une maison à partir du graphisme du mot écrit, de la photographie d'un croquis etc... Il n'y a donc pas de problème de ce point de vue.

Plus important est le problème de la variabilité de perception d'un même signal chez un même individu, et qui ont pour cause son état de fatigue ou son âge en particulier. L'explication vient de soi : le rendement de notre musculature varie précisément dans les conditions précitées. Il en est de même pour certaines maladies susceptibles d'altérer notre oreille interne : paralysie des muscles, ossification

DISSYMETRIE VIBRATOIRE DES OSSELETS (selon DAHMANN)

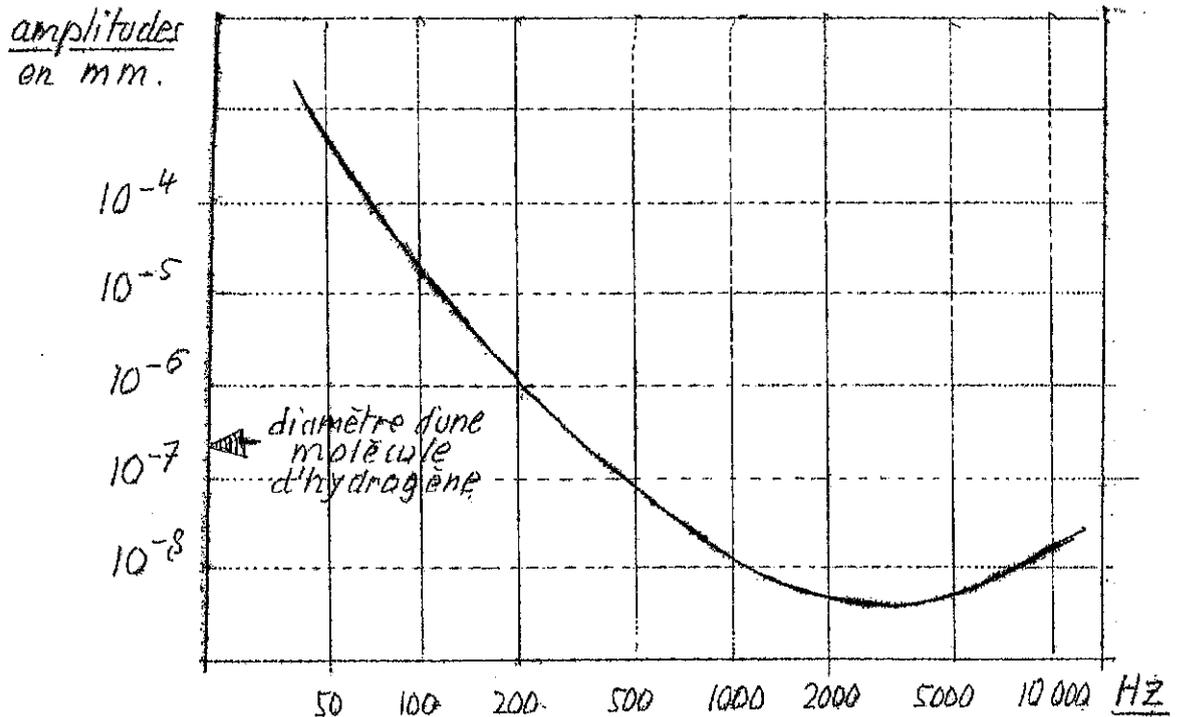
Fig 15



Dès 1929, DAHMANN montrait, en collant sur les 3 osselets d'un modèle d'oreille moyenne de petits miroirs dont il relevait les mouvements, que la vibration des trois osselets était dissymétrique, ce qui détermine nécessairement des distortions du signal transmis.

AMPLITUDE DES VIBRATIONS PERÇUES, AU SEUIL (Stevens)

Fig 16



Au voisinage du seuil d'audition, les amplitudes nécessaires pour qu'il y ait perception, sont infimes, inférieures au diamètre d'une molécule d'hydrogène dans la zone sensible de l'oreille. Les phénomènes échappent donc à l'observation directe au microscope!

autour du pied de l'étrier etc.. toutes choses qui se traduisent en particulier par l'apparition d'un syndrome bien précis : l'incapacité croissante de supporter une large dynamique ou, plus simplement les bruits intenses, qui saturent l'oreille sans recours.

D'autres différences de réaction individuelles à un même signal acoustique ont des causes psychologiques. On le conçoit facilement; puisque la musculature ossiculaire peut être préréglée, c'est-à-dire tendue d'une certaine manière sous l'effet d'incitations internes. Dans ces conditions, lorsque pour des raisons variées je désire entendre un même phénomène acoustique ou au contraire je ne veux pas l'entendre, l'état mécanique de l'oreille moyenne sera différent dans les deux cas. Comme cet état détermine largement la sensation d'intensité et de timbre en particulier, il est évident que je n'entendrai positivement pas la même chose. Cette différence de sensation "subjective", correspond bel et bien à un phénomène objectif au niveau de la fenêtre ovale. Un cas particulier qu'il m'a souvent été donné d'observer est celui de la suggestion chez les musiciens. Le violoniste qui a été "conditionné" préalablement par des on-dits relatifs à la qualité des instruments de tel luthier, et qui, de plus a payé un prix élevé pour son instrument, l'entendra réellement d'une autre façon qu'un auditeur "vierge". Un "Stradivarius" ne sonne comme un Stradivarius que si l'on a annoncé au préalable que c'était un Stradivarius !

On pourrait montrer bien d'autres cas de variabilité découlant des mécanismes d'accommodation de l'oreille moyenne. Etudions plutôt quelques conséquences pratiques de ce phénomène en musique, parole et bruit.

III - QUELQUES CONSEQUENCES PRATIQUES DE L'ACCOMMODATION OSSICULAIRE

Tout ce qui précède montre bien que l'oreille moyenne constitue effectivement un filtre d'information réglable, intercalé entre le monde extérieur et notre cerveau. Les conséquences qui en découlent en musique, parole et bruit sont nombreuses et importantes, comme nous allons essayer de le montrer par quelques exemples.

1°) EN MUSIQUE.

Une fois de plus attirons l'attention sur l'intérêt qu'il y a d'étudier la pratique empirique des musiciens et facteurs d'instruments. On y trouve des renseignements sans prix, trahissant une connaissance empirique, parfois inconsciente, mais souvent remarquable des propriétés de l'audition, en particulier en ce qui concerne la sensation d'intensité, de timbre et de hauteur donc relevant de notre sujet ici. Voici quelques points intéressants :

- sensation d'intensité : Nous avons déjà signalé la tentative de normaliser en décibels les nuances d'intensité inscrites sur les partitions, et suggérée par STOKOWSKI. Le fait que personne n'ait suivi, montre tout simplement que les musiciens, connaissent bien le rôle du contexte dans la sensation d'intensité d'un son : tous les compositeurs, tous les chefs d'orchestre habiles jouent justement avec les possibilités de contraste dynamique, donc avec l'accommodation ossiculaire. De leur côté, les bons amateurs de musique enregistrée savent bien qu'ils n'obtiendront jamais, quoiqu'on fasse à la prise de son, les mêmes effets qu'en concert. En effet, pour un morceau que l'on ne connaît pas, en salle de concert, la prévisibilité des passages intenses est évident on voit les gestes significatifs du chef d'orchestre au moment où ils "annoncent" un fortissimo ou un pianissimo; la vue nous prévient aussi du coup de cymbale éclatant... et nous fournit de nombreux autres indices nous permettant de préréglager notre oreille moyenne, et dès lors nous n'entendons plus de la même façon, ni les contrastes dynamiques, ni les timbres. Le même phénomène se produit lorsqu'on connaît bien telle ou telle œuvre à forts contrastes. L'attente, prévisible, des passages très faibles ou forts modifie encore l'audition. En musique, une autre conséquence de l'accommodation de l'oreille moyenne peut être observée, relativement aux différences de goûts pour tel ou tel type de musique : on aime la musique romantique à forts contrastes dynamiques si la musculature ossiculaire possède de hautes performances; on aime la musique classique,

...../

le quatuor à cordes dans le cas contraire. L'âge peut provoquer des changements de goût pour des raisons évidentes. On pourrait justifier de même l'attraction ou la répulsion que nous pouvons avoir pour tel ou tel instrument à forte ou faible dynamique. Un individu asthénique n'aura jamais les mêmes goûts qu'un individu dynamique, ^{selon le cas,} car la capacité d'atténuation par l'oreille moyenne respective peut être nulle, ou dépasser 25 ou 30 dB. En définitive, tout ceci justifie l'impossibilité de définir par une grandeur physique l'intensité perçue d'un son.

- sensation de hauteur. Les modifications de raideur du système ossiculaire peuvent amener des déviations dans la sensation de hauteur : nous avons déjà été confrontés plusieurs fois avec ce problème qui présente des aspects très curieux. Il est bien connu que si l'on coupe un grand nombre d'harmoniques aigus d'un son riche, sa hauteur semble baisser, alors que la fréquence du fondamental ne change pas ! Ce problème est à la base des innombrables discussions entre musiciens jouant respectivement dans la fosse d'orchestre ou dans les coulisses. Les premiers accusent les autres de jouer trop bas, alors que c'est le filtrage de l'aigu des spectres par les coulisses qui est en cause. Comme l'oreille moyenne est aussi un filtre éventuellement "coupe aigu", on ne peut être surpris de constater que dans certains cas particuliers tel son joué trop faible ou trop fort sonne trop bas ou trop haut. Mais si nous écoutons exactement le même passage un jour où nous sommes très fatigués ou très décontractés, le jugement de "fausseté" peut changer ! Nous avons même entendu un compositeur déclarer que tel jour, en tel passage d'un disque, le musicien jouait faux, alors que le lendemain, tout lui semblait juste...

Mais il est un autre cas de déviation de sensation de hauteur qui nous a beaucoup intrigué et sur lequel nous avons fait des recherches systématiques; c'est celui de la diplacousie.

Pour étudier ce phénomène, on dispose un casque sur les deux oreilles; un commutateur permet d'envoyer alternativement sur l'une ou l'autre oreille un signal "sinusoïdal" réglable en fréquence, délivré par un générateur basse fréquence classique. On vérifie alors que, pour certaines fréquences, variables selon les individus, et à des degrés plus ou moins marqués selon l'intensité du signal, l'oreille gauche "entend" nettement plus haut - ou plus bas - que l'autre. La différence dépasse souvent le demi-ton. La diplacousie est un cas pathologique connu, et nous avions pensé alors qu'il était intéressant de faire une série d'expériences systématiques, avec des sujets normaux de tous âges. A des degrés divers, on a constamment retrouvé le même résultat. Voici, à titre d'exemple, la dispersion des résultats pour vingt mesures, à deux niveaux différents, sur mes propres oreilles (fig.18). On voit que l'écart de sensation de hauteur varie selon le moment... l'état psychique ou physique etc... Le paradoxe est qu'en écoutant le même son "sinusoïdal" simultanément avec les deux oreilles, on ne remarque aucune discordance ou fausseté... Il n'est cependant pas exclu que c'est parce que nous y sommes habitués depuis notre naissance; peut-être qu'un trop grand "désaccord" fait percevoir les sons musicaux harmoniques comme dissonants, et ceci pourrait alors expliquer dans une certaine mesure la répulsion de certains sujets pour la musique... Cependant il fallait trouver une explication plus générale, et voilà celle que nous proposons

La sensation de hauteur comporte deux aspects, sur lesquels nous avons attiré l'attention plusieurs fois déjà, en particulier à l'occasion de notre réunion sur la guimbarde, ce curieux instrument de musique, comportant une lame d'acier (ou de bambou que l'on pince et que l'on fait vibrer entre les dents pendant que l'on modifie le volume de la cavité buccale, qui joue le rôle d'un résonateur. Avec un peu d'attention, on entend en fait deux sons : un son grave de hauteur, quasi fixe (une espèce de "bourdon") qui, l'expérience le montre, traduit le spectre quasi harmonique de la lame vibrante. Mais simultanément, si l'on réduit graduellement la cavité buccale, on entend "quelque chose" monter. L'analyse au sonographe met très clairement en évidence ce qui se passe (fig.19a). Le sonagramme montre en effet le spectre de raies quasi fixe de la lame, comportant des raies de partiels horizontales. Mais on observe qu'en tel ou tel point, où la cavité est accordée sur tel partiel de la lame, celui-ci se "gonfle". L'ensemble détermine une espèce de bande ascendante : il y a bien "quelque chose qui monte", et ce qui monte, c'est un "formant". La musique de guimbarde est donc une musique de formant

fig 17

LE CIRCUIT PÉRILYMPHATIQUE de l'oreille interne. (d'après GREGOIRE-ABERLIN)

Canal cochléaire
 saccule
 sac endolymphatique
 utricule
 canaux semi-circulaires
 tout est couplé!
 Tous ces organes
 sont donc soumis
 aux effets de la
 force exercée par
 l'étrier sur la
 Fenêtre ovale.

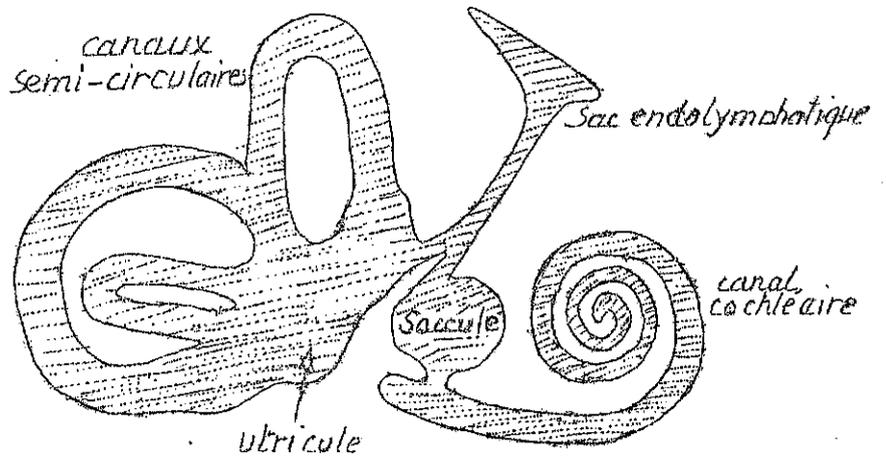
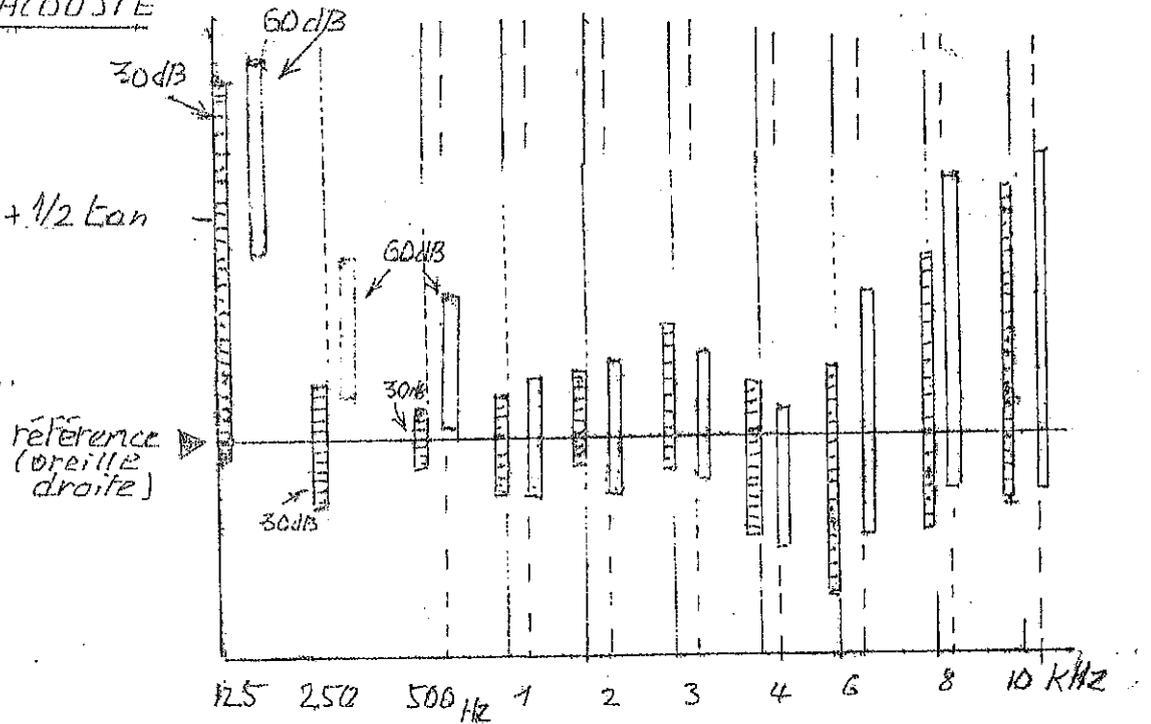


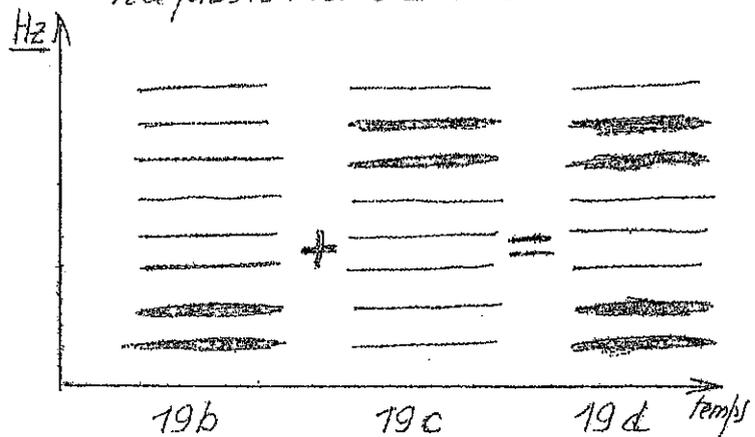
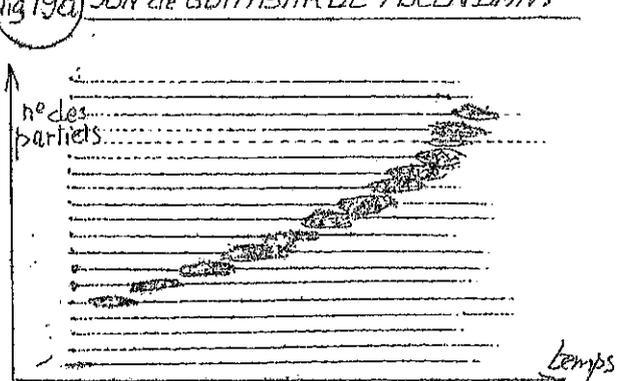
fig 18 LA DIPLACOUSIE

Selon la fréquence
 et l'intensité (30
 et 60 dB. ici)
 L'oreille gauche
 entend plus
 haut ou plus
 bas que l'oreille
 droite; la dif-
 férence dépasse
 souvent 1/2 ton...
 Mais c'est une
 illusion venant
 du timbre perçu
 différemment
 par chaque
 oreille.



Les trois sons b, c, d ont la même
 fréquence, mais b sonne plus bas que c
 à cause des formants. La "somme"
 n'a plus le même timbre.

fig 19a) SON de GUINBARDE ASCENDANT



Le spectre de raies reste fixe.
 le "formant" monte on a simul-

et dans un son de ce type, il existe bien deux "hauteurs" de nature différente, mais que l'on discerne nettement à l'audition.

Considérons maintenant ce qui se passe au niveau de nos deux fenêtres ovales lorsque nous entendons un son comportant plusieurs harmoniques. Nos deux oreilles moyennes présentent nécessairement des différences anatomiques et physiologiques plus ou moins marquées selon les individus, et filtrent par conséquent différemment le spectre considéré puisque leurs courbes de réponse respectives diffèrent. Imaginons que l'une de nos oreilles moyennes présente une résonance, un formant, dans le grave; l'autre dans l'aigu (fig. 19b et 19c). Les deux sons perçus, respectivement par l'oreille gauche et droite ont exactement la même fréquence, mais leur timbre est différent, et dans le cas considéré, le formant détermine

une sensation de hauteur différente : le son semble effectivement ^{plus} grave à gauche. Si on écoute par contre simultanément avec les deux oreilles le même son de générateur, mais sur haut-parleur, on additionne en fait les deux spectres et le son résultant n'a plus alors qu'une hauteur unique (fig. 19d). Par contre, les deux formants réunis dans le même spectre donnent simplement un certain timbre, différent de ce que l'on entendait avec les écouteurs : une sensation de discordance n'a aucune raison d'exister, puisque les deux spectres ont, pour leurs harmoniques respectifs, exactement les mêmes fréquences. Des différences de caractéristiques entre les deux oreilles moyennes, ne jouent donc pratiquement aucun rôle en audition. Elles conditionnent par contre notre perception du timbre, mais passent évidemment inaperçues (quoique l'on puisse les mettre en évidence au laboratoire), et c'est probablement fort heureux pour la musique...

2°) EN PAROLE :

Les capacités d'accommodation de l'oreille moyenne jouent certainement un rôle important dans l'intelligibilité de la parole. Un réglage adéquat permet en effet de faire émerger au mieux les signaux de parole sur le bruit de fond, par adaptation de la courbe de réponse de la chaîne ossiculaire sur le signal. Comme l'accommodation commande simultanément la constante de temps du système (traduite par le trainage variable des sons que nous avons observé plus haut), il est assez probable qu'un réglage correct permette de mieux saisir les plosives, phénomènes très brefs et dont la perception conditionne largement l'intelligibilité.

3°) EN BRUIT :

On cherche depuis des décennies à normaliser les niveaux des bruits pour en définir la gêne ou la nuisance. Si on admet que l'accommodation de l'oreille moyenne permet une atténuation voisine de 30 dB selon le cas, ce qui est raisonnable dans le cas normal, il est évidemment tout à fait vain de vouloir définir la gêne et la nuisance à un décibel près sans définir simultanément le contexte et la prévisibilité. Il est par conséquent impossible dans ces conditions de "mettre au point" une méthode réaliste de mesure des bruits ayant quelque chance de pouvoir accorder ses résultats avec la réalité, (enquêtes auprès des victimes en particulier), en faisant de simples mesures de niveau à l'aide du classique décibelmètre, aussi perfectionné fut-il. Ce n'est pas en raffinant sur des fractions de décibel qu'on tranchera le problème ! Nous savons maintenant pourquoi ! ce qu'il faut, c'est réaliser un appareillage incluant une simulation de la fonction de l'oreille moyenne, c'est-à-dire comportant une autorégulation par feedback. L'électronique sait à présent fabriquer de tels appareillages; mais il faudrait évidemment repenser et remanier tout ce qui a été dit et fait par les innombrables commissions de normalisation du bruit depuis des décennies. De même, les spécialistes de la psycho-physiologie auditive pourraient utilement reconsidérer certains aspects des problèmes qu'ils étudient. A cause des mécanismes d'accommodation, il est évident que les résultats de tests sur l'intensité, la hauteur, le timbre, sont largement liés à la prévisibilité et au contexte des sons utilisés, et dès lors l'ordre de présentation des échantillons sonores et la façon de faire faire les tests influencent les résultats au point qu'il devient généralement impossible de tirer des conclusions applicables à la pratique de l'audition normale.

On pourrait épiloguer longuement encore sur les conséquences des particularités mécaniques et acoustiques de l'oreille moyenne, mais nous pouvons d'ores et déjà conclure.

IV - CONCLUSIONS

Nous avons tenté de dégager ici ce qui nous a semblé important relativement au mécanisme et à la fonction de l'oreille moyenne. Nous avons montré que celle-ci, tout comme l'iris dans l'oeil, réalisait un système asservi, différent pour chacune de nos oreilles, variable selon les individus et selon les circonstances : contexte, prévisibilité, attitude mentale du sujet envers le signal etc... Ce système est d'autre part réglable, aussi bien de façon réflexe que volontaire, à des degrés divers. Mais dans tous les cas, ce réglage modifie nécessairement les caractéristiques physiques du transducteur : raideur et résistance en particulier, donc son impédance acoustique. D'où il résulte que la sensation d'intensité, de timbre, de hauteur et de finesse temporelle est largement conditionnée par l'oreille moyenne, la prévisibilité et le contexte d'un son jouant un rôle déterminant sur sa qualité "subjective".

On retiendra en particulier une conclusion remarquable. La nature résout généralement ses problèmes en appliquant des solutions efficaces et économiques, dont l'étude présente le plus grand intérêt. Souvent ces solutions nous semblent étrangement grossières : nos organes sont apparemment de mauvaises machines si on les considère du point de vue purement mécanique ou électrique; cependant leur efficacité est incroyable. Malgré la modicité des moyens employés la machine humaine défie, en performances de fonctionnement et en efficacité nos meilleures conceptions mécaniques actuelles et nos meilleurs appareillages électroniques, ordinateurs compris. Notre système auditif est un cas particulièrement typique à cet égard. Sensible, captant dans un champ dynamique énorme les informations les plus tenues ou les plus "grosses", sachant se protéger automatiquement contre des "surcharges" mécaniques et électriques considérables, il représente, grâce à l'oreille moyenne, un système optimisé à l'extrême, avec lequel l'homme extrait de son environnement acoustique l'information qui lui permet de vivre et de survivre.

BIBLIOGRAPHIE

- 1°) LEIPP (E) - Mesures physiques et perception des sons.
Conférences des Journées d'Etude du Festival International du son.
Chiron. Paris 1970.
- 2°) GREGOIRE (R) et OBERLIN - Précis d'Anatomie
Baillière et Fils. Paris 1964.
- 3°) GELLE (M.E.) - L'audition et ses organes.
Félix Alcan. Paris 1899.
- 4°) STEVENS (S.S.) and DAVIS (H) - Hearing. Wiley - New-York 1938.
- 5°) KOSTELIJK (P.J.) - Theories of hearing.
Universitaire Pers Leiden, 1950.
- 6°) HELMHOLTZ (H.V.) - Die Lehre von den Tonempfindungen (5° éd.)
Vieweg'sohn ; Braunschweig 1896.

DISCUSSION

Mme BOREL MAISONNY - J'ai vu naguère un film de KOBRAK qui montrait les mouvements des osselets pendant que l'on passait de la musique : c'était assez impressionnant !

M. LEIPP - Pourriez-vous me dire si le sujet était un animal, un cadavre ou un individu vivant ? Connaissez-vous les conditions du filmage ? Car il doit exister de grandes difficultés venant des trois dimensions du système ossiculaire conjointement avec la profondeur de champ des optiques employées !

Mme BOREL MAISONNY - Le film a été fait à l'occasion d'une intervention chirurgicale sur un homme.

M. LEIPP - Je persiste à penser que les mouvements filmés et observés traduisaient la continuelle adaptation du système ossiculaire au niveau du signal d'entrée; mais je serais surpris que l'on ait pu montrer les vibrations acoustiques du système dont les amplitudes sont infimes, comme je l'ai précisé. On ne peut donc guère espérer d'observation directe que pour les très basses fréquences et les très fortes intensités. BEKESY a procédé ainsi, mais je pense qu'aux niveaux utilisés le fonctionnement de la mécanique ossiculaire change de nature. Le film dont vous parlez a sans doute bien montré précisément ce qui était en cause dans mon exposé, c'est-à-dire les mécanismes de l'accomodation.

X..... - Ce que vous avez dit de l'accomodation s'applique-t-il au cas du sommeil ?

M. LEIPP - On peut admettre que lors du sommeil, la musculature ossiculaire est en état de relaxation. A l'occasion d'études que nous avons faites sur les problèmes de bruit, nous avons déjà formulé l'hypothèse qu'un individu, soumis à un certain bruit pendant son sommeil, est d'abord réveillé par celui-ci. Mais si la chose se répète, il "apprend" le signal, c'est-à-dire qu'il stocke dans une mémoire particulière un "sous-programme de réjection". Dès lors, pour des bruits familiers qui arrivent graduellement et où les mécanismes ossiculaires ont le temps de jouer, le bruit est positivement "effacé" s'il n'est pas trop intense. S'il est très fort, on peut encore imaginer une déconnection pure et simple des mécanismes de réveil par le sous-programme en question. L'individu ne se réveille plus; c'est le cas du garde-barrière lors du passage de tel train habituel.

X..... - L'efficacité variable des muscles ossiculaires expliquerait pourquoi les enfants ont le sommeil beaucoup plus "lourd" que les vieillards, chez lesquels l'accomodation est déficiente.

M. LEIPP - C'est assez probable. Lorsque l'oreille moyenne ne peut plus "accomoder", elle est saturée pour un rien. La saturation masque tous les signaux acoustiques : on ne peut donc plus distinguer tel signal de danger : un sous programme d'alarme nous réveille alors.

M. JOSSERAND - Je vous signale certains points sur lesquels nous avons expérimenté à TOULOUSE et qui ne semblent pas bien se raccorder avec ce que vous avez dit du système ossiculaire. Il s'agit de la prothèse rétromyringienne de YEARSLEY. Voilà de quoi il s'agit. Un malade n'a plus de tympan ni d'osselets. On prend une boulette de coton imprégné de gomme arabique que l'on met en contact avec la fenêtre ronde. Le malade gagne 40 dB sur toute la gamme audible si le tampon est bien placé. Nous avons eu 2 ou 3 cas de ce genre. Si la chaîne ossiculaire n'intervient que pour 20 dB on a du mal à comprendre ce qui se passe

Dr DORGEUILLE - Je ne pense pas que les cas que vous citez remettent en cause ce que M. LEIPP vient de nous dire sur le fonctionnement et le rôle des osselets.

M. LEIPP - Non. Le cas que nous décrit M. JOSSERAND est tout à fait intéressant, mais pour savoir ce qu'il en est, il faudrait vérifier la dynamique de l'oreille de vos sujets. On peut admettre facilement qu'en remplaçant le tympan et les osselets par un solide plus ou moins plastique et étanche entre l'air extérieur et la fenêtre ronde ou ovale, on réussisse à communiquer les vibrations aériennes à la cochlée avec une amplitude voisine de la normale. Mais que devient le champ dynamique de l'oreille ? Le système coton-gomme étant fixe, l'oreille est sûrement saturée à la moindre augmentation d'intensité. Autrement dit, le malade entend mieux avec ce tampon, mais il se trouve dans le cas du vieillard qui ne peut plus supporter les fluctuations d'intensité notables des sons. Il serait donc intéressant de tester vos sujets sur ce point. Si le champ est très faible, vous aurez démontré justement la validité des idées que je soutiens, à savoir que la chaîne ossiculaire telle qu'elle est conditionne justement la capacité de l'oreille normale d'explorer un vaste champ dynamique, et qu'on ne peut impunément la remplacer par une pièce unique fixe.

M. JOSSERAND - Dans votre hypothèse, vous admettez qu'il faille exciter la fenêtre ovale pour produire une sensation auditive; or ici, celle-ci est complètement bouchée

M. LEIPP - D'abord il faut préciser ce que vous entendez par "bouché". Un obstacle solide du genre de celui qui devait se trouver sur la fenêtre ovale de vos sujets n'empêche pas nécessairement les sons de "passer", surtout lorsque les longueurs d'onde sont courtes, et d'autant moins que la sensibilité de la cochlée aux fréquences aiguës est extraordinaire comme on sait. Un mur de béton n'empêche pas la parole ni la musique de passer ...

M. JOSSERAND - Je me demande par ailleurs si la fenêtre ronde ne joue pas un rôle important dans la perception des fréquences aiguës.

M. LEIPP - C'est une vieille question, qui faisait déjà l'objet de discussions du temps de GELLE, il y a près d'un siècle. GELLE soutenait que l'hypothèse d'une perception par la fenêtre ronde était impensable celle-ci étant en retrait dans un pertuis assez profond. Si le tympan et les osselets sont enlevés, il est, à priori, indifférent d'attaquer la cochlée par la fenêtre ovale ou la fenêtre ronde - avec la restriction que la section de cette dernière est très inférieure. Mais cela ne change rien à l'affaire, sauf que le rendement de votre prothèse est nécessairement moins bon que celui d'une chaîne ossiculaire normale.

M. DELAMARE - Il est certain que la transmission des sons à la fenêtre ovale par les osselets aboutit à des amplitudes très supérieures à celles que l'on aurait par transmission aérienne directe. Mais si on supprime tympan et osselets la même onde atteint simultanément fenêtre ovale et fenêtre ronde; on annule les mouvements éventuels de la colonne de lymphe cochléaire. Je comprends donc bien l'intérêt de coller sur la fenêtre ronde un tampon avec de la gomme, qui constitue un filtre très efficace pour les fréquences moyennes et élevées de ce côté, rétablissant le jeu normal de la colonne liquide, donc l'audition. Mais finalement le son est alors capté tout de même par la fenêtre ovale, ce qui ne serait pas étonnant, car je suis d'accord avec M. LEIPP : l'enraidissement de celle-ci n'est absolument pas un obstacle pour les fréquences relativement aiguës. Si on mettait le tampon sur la fenêtre ovale, on obtiendrait sans doute le même effet.

M. JOSSERAND - Il est un autre point sur lequel je ne puis entrer dans les vues de M. LEIPP. Si on admet que le conduit joue le rôle d'un filtre passe bande autour de 2000 Hz, comment expliquer que les infra-sons puissent venir exciter l'utricle et le sacule et passent tout de même, alors que le conduit représente un coupe-bande ?

M. LEIPP - La courbe de résonance d'un "résonateur" du type de ce conduit externe est nécessairement très aplatie; elle ne détermine qu'une "bosse préférentielle" très large. Pour les très basses fréquences et infrasons, il s'agit de différences de pression lentes enregistrées par le tympan. Dans ce cas le conduit ne joue plus aucun rôle en pratique et on ne peut plus parler de filtre coupe-bande. Quoiqu'il en soit, si vous réussissez à élucider votre problème, je crois que vous apporterez une intéressante contribution à notre connaissance de la physiologie de l'oreille. Je pense en tout cas qu'il n'y a aucune contradiction entre vos résultats et les idées et hypothèses que j'ai avancées ici : bien au contraire !

Mlle CASTELLENGO - Dans un autre ordre d'idées, vous avez parlé du problème de la "cocktail-arty". Vous admettez que l'intelligibilité d'un locuteur est quasi totale lorsqu'il parle simultanément avec d'autres, parce que l'auditeur "accorde" au mieux la courbe de réponse de son oreille selon les particularités de la structure physique de la voix du locuteur. Mais il est bien connu que sur une bande enregistrée, on ne réussit plus à suivre le locuteur dans ce brouhaha. Il doit donc y avoir d'autres mécanismes.

M. LEIPP - Les problèmes de l'intelligibilité de la parole, vous êtes aussi bien placée que moi pour le savoir, ne sont jamais simples. Dans le cas précité, d'autres éléments jouent certainement. Par exemple la lecture labiale si on peut voir la bouche du locuteur. Les propriétés directives de l'oreille sont un autre point : il suffit de diriger le pavillon vers le locuteur pour augmenter le niveau perçu de ce qu'il dit de quelque 10 ou 15 dB. Il y a peut être également un gain relevant de l'écoute binaurale, stéréophonique. Il est certain qu'à l'écoute d'un mélange de conversations à travers un haut-parleur nous perdons tous ces "suppléments d'information".

M. DELAMARE - En ce qui concerne la diplacousie vous dites que c'est une affaire de timbre des sons, ce qui suppose la présence d'harmoniques ou de partiels. Or vous expérimentez avec des sons purs, sinusoïdaux !

M. LEIPP - J'ai bien précisé qu'en raison des distorsions, un son sinusoïdal ne l'est nécessairement plus au niveau de la fenêtre ovale : à ce point il est accompagné d'un cortège d'harmoniques; plus le son est intense, plus leur nombre est grand et plus la différence de hauteur est sensible entre les deux oreilles, au moins aux fréquences inférieures, entre 100 et 1000 Hz. On le voit bien sur le diagramme que j'ai montré tout à l'heure ! Ceci répond à votre objection.

Mlle CASTELLENGO - Je puis confirmer cette opinion; j'ai fait des tests avec plusieurs musiciens, attentifs par définition à la hauteur et au timbre. Alors que je leur passais successivement le même son sur les deux oreilles, deux d'entre eux m'ont clairement précisé : " j'entends une différence de timbre, mais la hauteur est toujours la même ".

Dr. DORGEUILLE - Je crois qu'il convient de lever une ambiguïté relative au mot "diplacousie". La diplacousie est un signe pathologique anciennement connu et qui diffère de ce que vous avez décrit. La diplacousie dont vous parlez est un phénomène latent, mis en évidence en dissociant les deux oreilles artificiellement. Pathologiquement il s'agit d'une altération unilatérale, soit du récepteur périphérique, soit des voies centrales, et qui produit des discordances dans le fonctionnement des deux côtés, lesquelles, bien entendu, déterminent des dissociations au niveau cortical, qui sont interprétées comme une audition de deux sons différents.

M. LEIPP - Si la diplacousie dont j'ai parlé est due à la différence anatomique entre l'oreille moyenne gauche et droite, qui détermine un filtrage différent du même son, il est bien évident qu'un filtrage similaire peut se produire aussi dans

dans les maillons plus élevés du système auditif, cochlées ou mémoires, par exemple, qui diffèrent certainement aussi d'une oreille à l'autre. En fait il est difficile d'isoler les causes possibles de la diplacousie, sauf dans des cas pathologiques particuliers. Ce qui m'intéresse dans cette affaire, n'est pas l'aspect pathologique, mais l'aspect perceptif car la diplacousie pose, une fois de plus la question : "qu'est-ce que la hauteur d'un son"?

Dr. DORGEUILLE - Je voudrais faire une remarque sur la question de motricité volontaire ou réflexe des muscles ossiculaires. Je pense qu'ici, pour l'essentiel elle est réflexe. Mais il est possible qu'elle devienne également volontaire. Cependant, à la différence des motricités volontaires ordinaires, on est obligé de passer ici en quelque sorte par un "intermédiaire" subjectif, psychologique, qui est une intention. On se prépare à entendre, on s'attend à quelque chose. Cet intermédiaire est à prendre en considération. Le fait que le comportement de muscles puisse être mis en route en dehors des caractéristiques du stimulus physique pour rait bien rendre compte, non pas de la totalité, mais d'une partie des difficultés de l'audition musicale, dans la mesure où, dans certaines situations actuellement non élucidables, il y a, pour des raisons psychologiques propres à l'intéressé, une sorte de mise en position de son appareil auditif tel que tout repérage précis devient impossible et que justement, toute dénomination précise le devienne aussi.

M. LEIPP - Oui! Les problèmes de l'audition musicale sont compliqués, et l'une des principales difficultés vient certainement du fait que, justement, les propriétés transductrices du capteur périphérique, l'oreille moyenne, se modifient selon la structure physique des signaux acoustiques. Ce mécanisme est à la base, je pense, de nombreuses contradictions et paradoxes apparents que les quelques expériences et idées exposées ici contribueront, je l'espère, à l'éclairer d'un jour nouveau.