

PSYCHOACOUSTIQUE ET PERCEPTION AUDITIVE

M.C. BOTTE ■ G. CANÉVET ■ L. DEMANY
C. SORIN



SÉRIE AUDITION

INSERM / SFA / CNET

Imprimerie Darantière, Dijon-Quetigny
Dépôt légal : décembre 1989
Numéro imprimeur : 476

Maquette de couverture
Coopérative de création
9, cité Annibal
75014 Paris

3

Audition binaurale et localisation auditive

Aspects physiques et psychoacoustiques

Georges Canévet

Introduction

Ce chapitre donne une vue d'ensemble des mécanismes de la perception auditive spatiale chez l'homme. Il fournit une synthèse bibliographique des études menées sur la localisation auditive, et l'audition binaurale en général, dans leurs aspects physiques et psychoacoustiques.

Pour construire notre espace sonore subjectif, il nous faut tout d'abord repérer la position des sources acoustiques qui nous entourent. Cette opération est désignée sous le nom de « localisation ». Localiser une source, c'est d'abord identifier son azimut et sa hauteur, donc sa direction, puis déterminer la distance à laquelle elle se trouve dans cette direction. La première partie de ce chapitre comprend donc, successivement, la localisation dans le plan horizontal, la localisation dans le plan vertical puis l'estimation de la distance. Pour simplifier la présentation, nous traiterons d'abord le cas d'une source unique.

Mais l'environnement acoustique résulte en général de l'action simultanée de plusieurs sources. La combinaison de leurs rayonnements produit un champ acoustique complexe que le système auditif doit traiter pour reconnaître séparément chaque source. Nous examinerons ce problème à partir des exemples de la stéréo-

phonie, de l'effet de Haas et de la localisation dans le bruit. Ce dernier point nous permettra de définir ce que l'on appelle le démasquage binaural et de préciser les facultés de discrimination auditive spatiale qui en découlent.

Enfin, la modélisation du système binaural sera évoquée. Les efforts déployés dans ce domaine ont récemment abouti à l'élaboration d'un modèle théorique intéressant. Ce modèle permet, notamment, de simuler l'identification de l'azimut d'une source, en présence d'échos, ou de plusieurs sources distinctes. En aucun cas cependant, il ne sera fait mention de la physiologie du système binaural. On se bornera à donner en fin de chapitre une liste de références récentes, qui facilitera la recherche bibliographique.

La localisation de sources sonores par le système auditif se fait toujours à partir des caractéristiques du champ acoustique sur les oreilles. En première approximation, ce sont les différences interaurales de pression et de temps d'arrivée qui constituent les indices essentiels. En fait, il y a de nombreux autres indices ; nous reviendrons longuement sur leur définition et sur leur rôle dans la localisation. Cependant, l'examen sera facilité si nous présentons d'abord les méthodes de calcul et de mesure du champ acoustique à l'entrée du conduit auditif. Ce sont des données auxquelles nous ferons souvent référence, nous les regroupons donc en début de chapitre.

Domaine d'action du pavillon

Bien que l'intensité et le temps soient les indices prépondérants pour la localisation, d'autres éléments concourent à son affinement. Searle et coll. (1976) dénombrent un total de six indices. Après l'intensité et le temps précédemment cités, ils placent, dans l'ordre, l'ombre de la tête, les différences géométriques des pavillons, la fonction de transfert en amplitude du pavillon et, enfin, les réflexions par les épaules.

Il est certain que le pavillon joue, avec les mouvements de la tête, un rôle essentiel dans la localisation, notamment dans le plan vertical médian (Fisher et Freedman, 1968). Il faut toutefois que la fréquence soit suffisamment élevée ou, ce qui revient au même, que la longueur d'onde soit suffisamment petite en comparaison des dimensions du pavillon. Il est difficile de fixer une frontière, néanmoins on peut admettre que c'est à partir de 2 000 Hz que le pavillon

commence à intervenir dans la localisation. Une expérience déjà citée le laissait pressentir (Stevens et Newman, 1936; Fig. 3-9b); le pourcentage de confusions que font les sujets entre l'avant (0°) et l'arrière (180°) est élevé et pratiquement constant en basse fréquence, de l'ordre de 35 à 40 %, jusqu'à environ 2 000 Hz. Puis le pourcentage décroît subitement entre 2 000 et 4 000 Hz, fréquence à partir de laquelle il se stabilise à un minimum d'environ 15 %.

Cette zone de transition commençant à 2 kHz se retrouve également dans une étude plus récente (Gardner et Gardner, 1973). Ces auteurs ont soumis à des tests de localisation des sujets dont ils avaient progressivement bouché le pavillon. Les haut-parleurs étaient disposés en un arc de cercle vertical, face aux sujets, et émettaient soit un bruit de large bande, soit des bandes de bruit pulsées, d'une demi-octave de largeur spectrale. Sans entrer dans le détail des résultats, car la dégradation des performances est fonction des divers niveaux d'occlusion du pavillon, un fait mérite d'être mentionné : dans le cas du pavillon intact

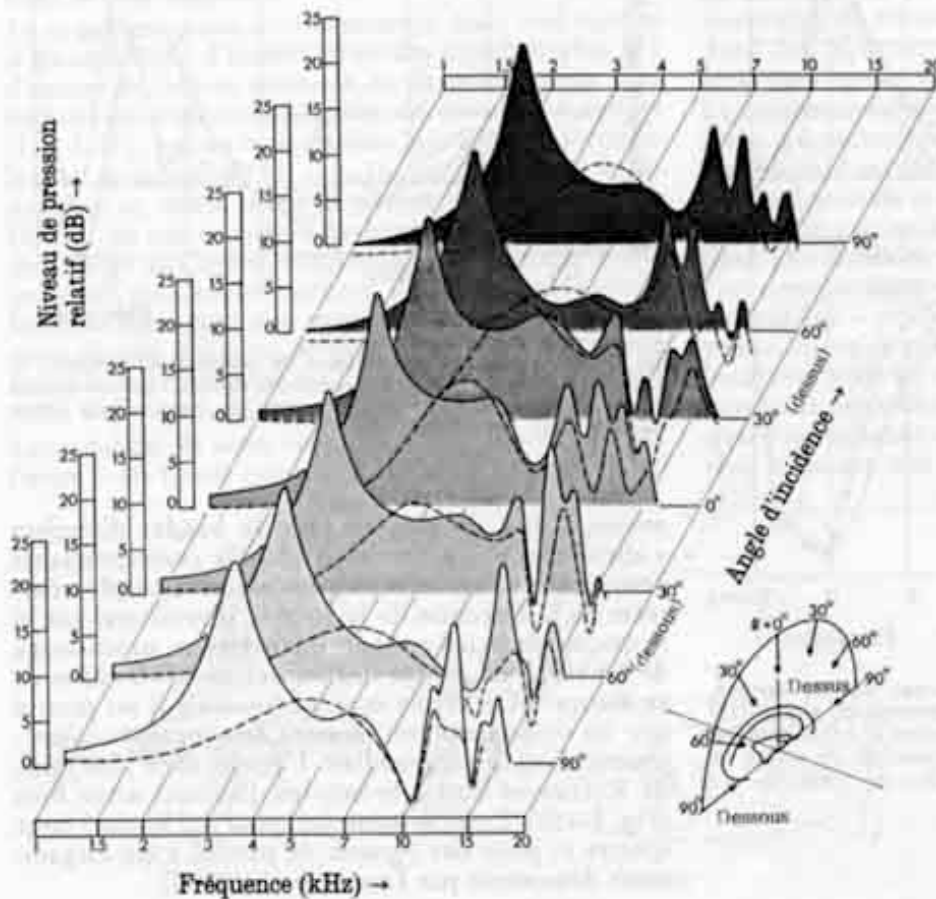


Fig. 3-21a Niveau de pression acoustique dans le conduit auditif, rapportée à la pression sur un plan réfléchissant, en fonction de la fréquence, pour diverses incidences. (—) au voisinage du tympan; (---) à l'entrée (2 cm) du conduit auditif « obturé ». (SHAW et TERANISHI, 1968)

et pour des bandes de bruit centrées sur 2, 3 et 10 kHz, les taux d'erreur sont respectivement de 70, 25 et 15 %. En accord avec celui de Stevens et Newman, ce résultat confirme donc l'entrée en jeu progressive du pavillon dans la localisation au-delà de 2 kHz.

Mode d'action du pavillon

Le mode de fonctionnement du pavillon peut être envisagé de deux façons. L'une consiste à considérer, comme Shaw et Teranishi (1968), le pavillon et le conduit auditif comme un ensemble de résonateurs. Ces auteurs ont en effet démontré que l'oreille externe est le siège de résonances multiples dont les fréquences propres apparaissent aux environs de 3 kHz (Fig. 3-21a et b).

Ces résonances sont plus ou moins excitées par un son incident, suivant la direction de ce son. Blauert (1983) confirme cette remarque. En mesurant les variations de niveau de pression avec l'azimut, à l'entrée du conduit auditif, à la fréquence correspondant à la deuxième résonance trouvée par Shaw et Teranishi (5 kHz), il constate que le niveau reste constant pour des azimuts allant de 0 à 90 degrés, qu'il décroît ensuite de 15 à 20 dB entre 90 et 110 degrés, puis reste à cette valeur jusqu'à 180 degrés. Un son provenant

de face stimule donc cette résonance plus fortement qu'un son provenant de l'arrière. La combinaison des différentes résonances produit ainsi une résultante qui dépend de la direction du son. Ce dosage variable des diverses résonances constituerait une clef, c'est-à-dire un indice, permettant la localisation.

L'autre approche, proposée d'abord par Batteau (1967, 1968), puis, notamment, par Wright et coll. (1974) et Watkins (1978), considère le pavillon comme un système de réflecteurs multiples. Les différentes portions du pavillon contribueraient à renvoyer une partie du signal incident vers le conduit auditif. Chacune de ces réflexions viendrait s'ajouter au signal primaire incident avec un certain retard. C'est ce que schématise la figure 3-22a.

De plus ces retards seraient fonction de l'incidence. Par exemple pour une source située sur le côté du sujet, les retards mesurés par Batteau, sur un modèle de pavillon, vont de 2 à 80 microsecondes suivant l'azimut. Pour une source située dans le plan vertical, les retards s'échelonnent de 100 à 300 microsecondes suivant la hauteur. Le mécanisme de la détection des réflexions peut être interprété de la manière suivante (Fig. 3-22b). Lorsque les retards sont brefs, le signal retardé introduit une atténuation des fréquences aiguës (exemple de 30 μ s sur la figure 3-22b). A mesure que les retards s'allongent (exemple de 100 μ s), le spectre du signal incident se trouve modulé de plu-

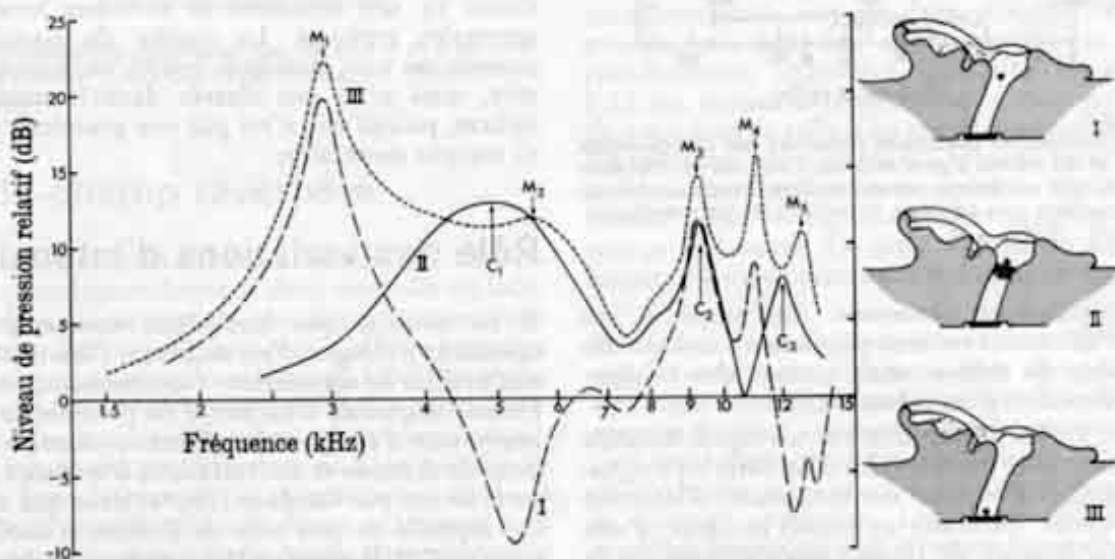


Fig. 3-21b Réponse en fréquence d'une copie de pavillon à tympan rigide, en incidence normale. I. A l'entrée du conduit ; II. à l'entrée du conduit « obturé ». III. à proximité du tympan. (SHAW et TERANISHI, 1968)

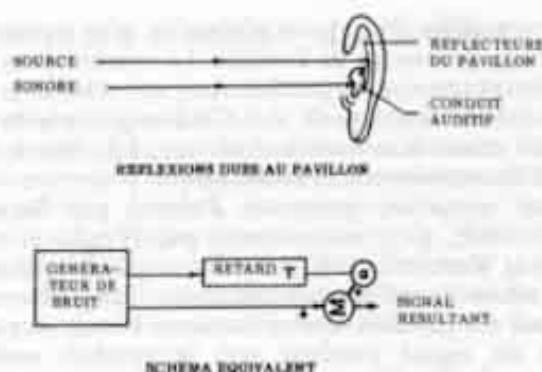


Fig. 3-22a Schéma de principe des modifications temporelles créées sur un signal acoustique par les réflexions dues au pavillon. [WRIGHT et coll., 1975]

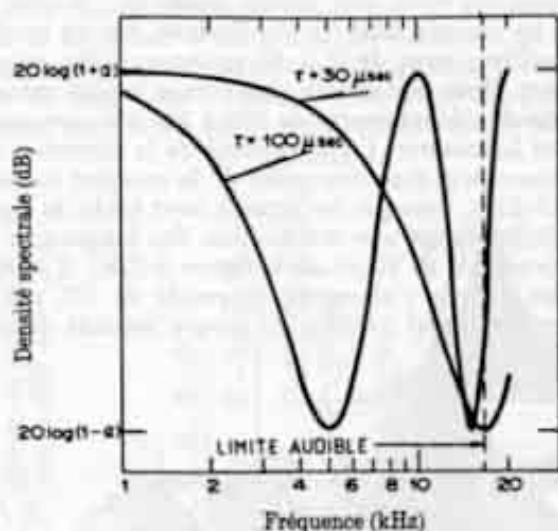


Fig. 3-22b Altérations spectrales obtenues par combinaison d'un signal et du même signal retardé. Des retards inférieurs à 30 μ s produisent un filtrage passe-bas. Des retards supérieurs à 30 μ s produisent une série de minimums et de maximums. [WRIGHT et coll., 1974]

sieurs maximums et minimums. Bien entendu, ces altérations spectrales ne sont pas perçues comme des modifications de timbre, mais comme des changements de direction d'un même signal.

En résumé, l'effet du pavillon sur un signal incident peut être interprété comme celui d'un filtre en peigne. Cet effet revient à imposer des maximums d'intensité et des crevasses spectrales au signal incident, d'une manière qui dépend, de façon caractéristique, de la position de la source par rapport à celle de l'auditeur. La précision de la localisation dépend des variations

de cette fonction, sorte de relation biunivoque entre la position de la source et les fonctions de transfert des oreilles. Une zone où elle varie peu correspondra à une localisation floue (MAA élevé) et, réciproquement, la précision sera la meilleure dans les zones où cette fonction aura les variations les plus fortes.

Identification de la distance

La localisation dans le plan horizontal ou dans le plan sagittal, dont il a été question depuis le début de ce chapitre, n'est en fait qu'une identification d'azimut ou de hauteur, appelée parfois audition directionnelle. Nous n'avons pas mentionné la localisation dans une direction quelconque de l'espace, notamment dans le demi-espace supérieur. Peu de travaux y sont consacrés et nous citerons simplement, pour faciliter un début de recherche bibliographique, ceux de Jonquet (1979) et de Morimoto et Aokata (1984). En ce qui concerne l'identification de la distance, le système auditif n'est malheureusement pas un télémètre ; il ne peut pas évaluer l'éloignement d'une source, excepté dans quelques rares cas, par exemple s'il s'agit d'une source connue ou « familière ». Les caractéristiques du champ acoustique peuvent cependant produire une sensation d'éloignement d'une source. Pour résumer, trois principaux indices contribuent à créer cette sensation : les variations d'intensité, le rapport du son direct au son réverbéré et certaines modifications spectrales typiques. La qualité du signal (parole, connue ou non, musique, bruits, etc.) joue aussi un rôle, mais n'est pas classée dans la catégorie des indices, puisqu'elle n'est pas une grandeur ordonnée, ni surtout mesurable.

Rôle des variations d'intensité

Il est évident que lorsqu'une source à émission constante s'éloigne d'un auditeur, l'intensité diminue aux oreilles de cet auditeur ; inversement, en réduisant l'intensité globale d'un son, il est possible de créer une impression d'éloignement. Cette corrélation des variations de distance et des variations d'intensité a été mise en évidence par Gardner (1969a) dans une expérience qui rappelle un peu celle de Roffler et Butler (1968) (voir p. 000). Il avait installé cinq haut-parleurs alignés face à ses sujets (Fig. 3-23) et présentait un signal de parole (courtes phrases) à différents niveaux, de 20 à

65 dB, mesurés à l'emplacement du sujet en son absence. Mais, seuls les deux haut-parleurs extrêmes étaient connectés : le n° 1, à 10 pieds, et le n° 5, à 30 pieds. Le sujet ne le savait pas, et devait indiquer, après chaque phrase, lequel des cinq haut-parleurs pouvait être la source utilisée. Les résultats de la figure 3-23 montrent bien que seule l'intensité a guidé les jugements des auditeurs. Autrement dit, quel que soit le haut-parleur utilisé, les jugements de distance sont à peu près les mêmes : ils dépendent des niveaux d'émission acoustique, et non de la distance réelle.

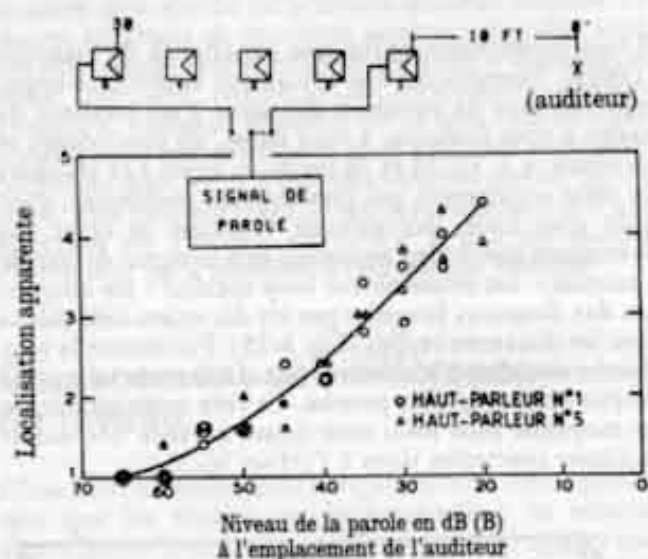


Fig. 3-23 Localisation apparente des sources 1 et 5 en fonction de leur niveau. (Deux points de mesure par niveau, sauf à 20 dB). (GARDNER, 1969)

Rôle du champ réverbéré

Rappelons maintenant un autre constat tiré de l'expérience quotidienne. Lorsque dans une salle un locuteur s'éloigne, le rapport du son direct au son réverbéré décroît. Par conséquent, tout auditeur associera la décroissance relative du son direct à l'éloignement de la source, et elle deviendra un indice pour l'évaluation de la distance. Cet effet, connu depuis longtemps, a été étudié par Mershon et King (1975). Ils voulaient faire la part de la réverbération et de la diminution d'intensité du son direct qui, comme on vient de le voir, peut, à elle seule, être un indice d'éloignement. Pour cela, ils ont utilisé des bouffées de bruit blanc présentées par haut-parleurs, en cham-

bre sourde ou dans un tunnel (de 6 m de long, 1,8 m de large et 2,5 m de haut), à parois réfléchissantes. Leurs résultats peuvent se résumer de la manière suivante. Les différences d'intensité, prises isolément (expérience en chambre sourde), ne permettent pas d'estimer la distance, mais sont utilisables pour apprécier assez finement les variations de distance. Au contraire, la réverbération (présente dans l'expérience en tunnel) semble avoir une qualité d'indice absolu, qui permet le positionnement d'une source dans l'espace proche de l'individu. Plus la réverbération est élevée, plus la distance perçue est grande.

Rôle des variations spectrales

La densité spectrale d'un signal acoustique varie au cours de sa propagation, par absorption inégale des graves et des aigus. Ainsi un sujet est capable, après entraînement sur un signal donné, d'évaluer les distances relatives d'émission avec une certaine précision. Inversement on peut, par filtrage approprié du signal, créer la sensation d'éloignement ou de rapprochement d'une source immobile.

C'est à peu près ce qu'ont fait Butler et coll. (1980). Ils ont enregistré des bouffées de bruit (30 ms de durée) à spectre passe-haut, passe-bas et large bande, par deux microphones placés aux entrées des conduits auditifs d'une personne. Le haut-parleur d'émission était à 90° sur la gauche, à 1,5 m de la personne. Les enregistrements ont été faits d'abord en chambre sourde, puis dans une salle normale. Les durées de réverbération, mesurées avec des impulsions de 0,25 ms, étaient de 16 ms pour la chambre sourde et de 1,8 s pour la salle. Ces enregistrements ont ensuite été présentés par écouteurs à seize sujets qui devaient indiquer la direction et la distance apparente de la source. Tous les signaux étaient présentés au même niveau d'isotonie. De plus, une partie des essais se faisait en écoute monaurale et l'autre en écoute binaurale (Fig. 3-24).

Il est clair, tout d'abord, que les sons enregistrés en salle réverbérante paraissent plus éloignés, à niveau égal, que ceux enregistrés en chambre sourde. Cela apporte donc un argument supplémentaire à la discussion développée plus haut. Par ailleurs, la composition spectrale des signaux joue un rôle prépondérant sur la distance apparente. Les bruits filtrés passe-bas semblent beaucoup plus éloignés que les bruits filtrés passe-haut. Toutes ces conclusions sont valables pour l'écoute monaurale comme pour l'écoute binaurale.

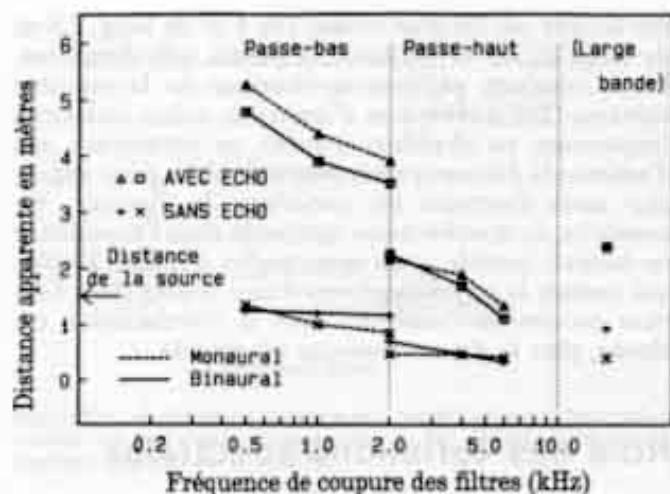


Fig. 3-24a Distance apparente d'impulsions de bruit en fonction de leurs fournitures spectrales (filtrées passe-bas, passe-haut et large bande). Les impulsions ont été préalablement enregistrées en chambre sourde (sans écho, (+), (x)) et en salle réverbérante (avec écho, (□), (Δ)). Les enregistrements sont ensuite présentés par écouteurs pour les estimations de distance. La distance réelle de la source est indiquée par la flèche. (---) écoute monaurale ; (—) écoute binaurale. (Butler et coll., 1960)

Toutefois, l'azimut perçu varie aussi un peu avec les caractéristiques spectrales. Comme le montre la figure 3-24b, les signaux à spectre grave ont tendance à être localisés généralement vers l'arrière, et ce d'autant plus qu'ils sont plus graves. Le cas extrême ici est celui du bruit filtré à 500 Hz qui semble provenir de 230° environ, alors qu'il était émis, comme les autres, à 270° (gauche du sujet). Les signaux à spectre aigu par contre sont localisés plutôt correctement.

Cas de signaux de parole

Il faut mentionner, enfin, une expérience de Gardner (1969a). Poursuivant son travail sur la distance apparente de sons de parole, il demande à un locuteur de parler à voix normale, à voix basse, en chuchotant et en criant, à 3, 10, 20 et 30 pieds du sujet. Les résultats de cette expérience, qui combine les problèmes, évoqués plus haut, des signaux familiers et celui des altérations spectrales, montrent que le signal de parole « normal » est relativement bien localisé : les moyennes des distances fournies par les dix sujets coïncident avec les distances réelles (Fig. 3-25). Par contre la voix chuchotée, donc à spectre essentiellement aigu, est perçue beaucoup plus proche. La voix criée est perçue en moyenne plus loin, sans doute à cause des modifications spectrales dues à l'effort vocal.

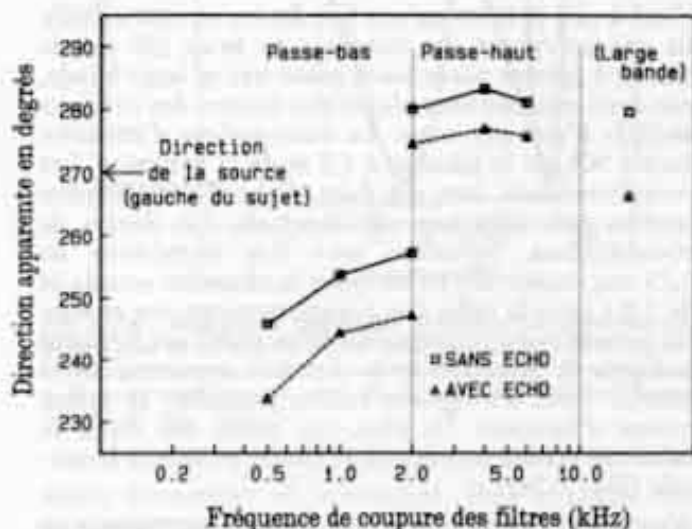


Fig. 3-24b Direction apparente d'impulsions de bruit émises à 270° (gauche du sujet) en fonction de leurs fournitures spectrales. (---) monaural, salle réverbérante ; (—) monaural, salle sans écho. (Butler et coll., 1960)

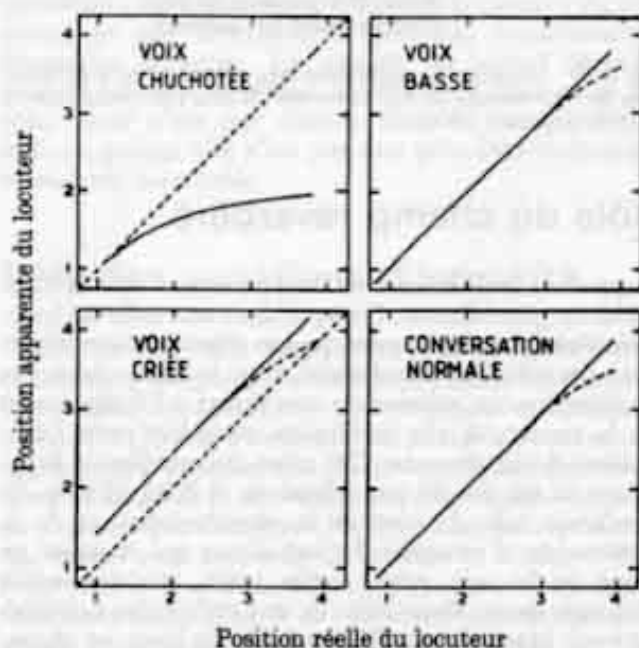


Fig. 3-25 Comparaison des distances apparentes et des distances réelles d'un locuteur, dans quatre conditions de production de parole. a) voix chuchotée ; b) voix basse ; c) voix criée ; d) conversation normale. (10 sujets) (GARDNER, 1969)

PSYCHOACOUSTIQUE ET PERCEPTION AUDITIVE

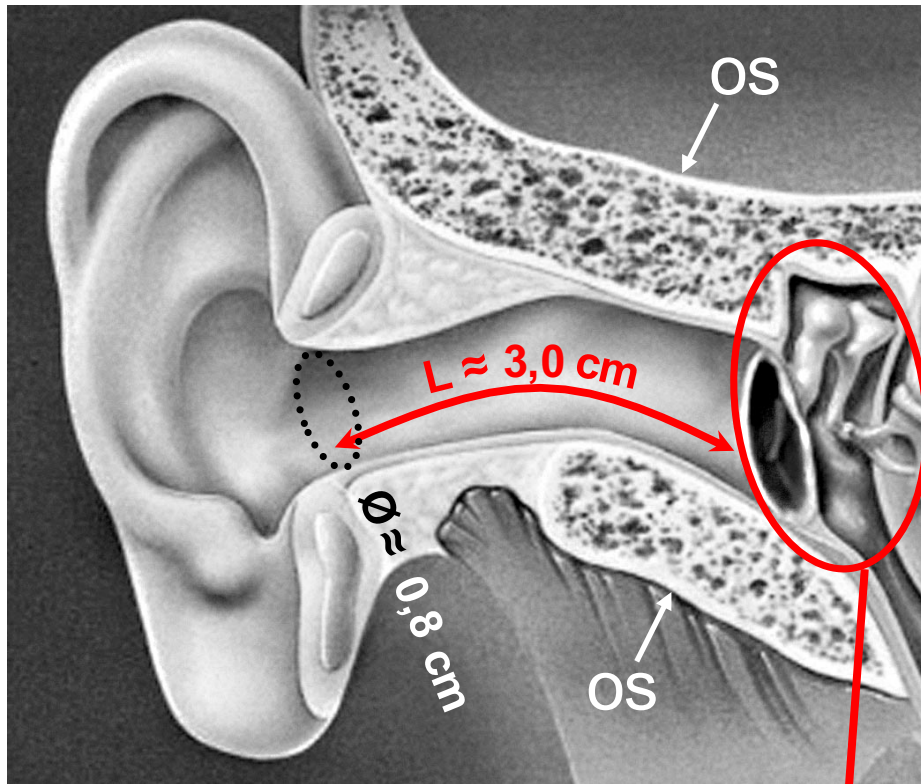
Deuxième volume de la collection « Audition », cet ouvrage comme son prédécesseur, *Physiologie de la Cochlée*, est issu de journées didactiques organisées à l'initiative du groupe audition de la Société française d'acoustique.

« Psychoacoustique et perception auditive » vient combler une lacune parmi les ouvrages français, dont très peu sont consacrés à la psychoacoustique. Les connaissances concernant les attributs élémentaires de la perception auditive — intensité subjective, hauteur, localisation —, ainsi que celles qui portent sur la perception de la parole continue, sont exposées de façon détaillée et didactique dans cet ouvrage collectif. Un bilan de l'état des discussions théoriques et des enjeux des recherches actuelles accompagne l'exposé de chacun des thèmes traités.

Cet ouvrage est destiné aux chercheurs, enseignants et étudiants en psychoacoustique et en physiologie de l'audition ou dans des disciplines voisines (psychologie expérimentale, audiologie, neurologie, perception de parole et de musique, acoustique des salles, effets du bruit), en neurosciences, psychologie, médecine, ainsi qu'aux praticiens de l'audiologie et de l'audioprothèse.

Résonances du conduit auditif ($\lambda/4$):

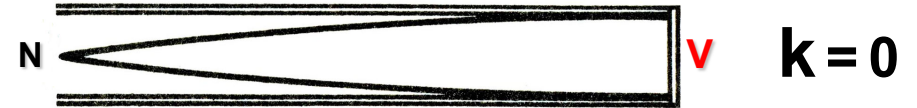
L'OREILLE EXTERNE



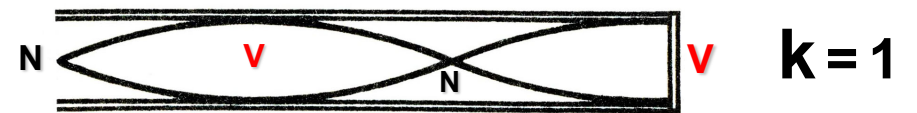
$$F = (2k+1) \frac{C}{4L + 0,82r}$$

r = rayon du conduit auditif...
(0,82 r = corrections dues aux frottements)

Fondamental $F = 2,7$ KHz



1^{ère} Harmonique $F = 8,3$ KHz



V = [VENTRE DE PRESSION
MAX DE PRESSION...

Le reflex stapédien :

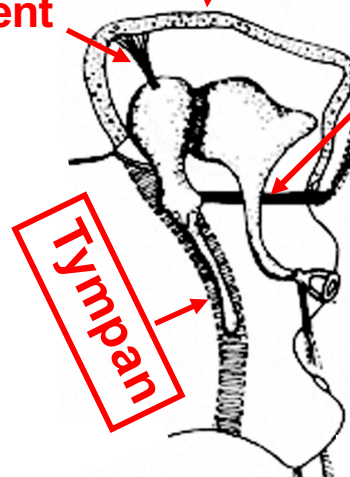
Limiteur Stéréo Organique !

pour un son $>$ à 85 dB SPL

- Attack : 40 ms (mode Link)
- Bypass à 15 minutes...
(pour 100 dB SPL constant)

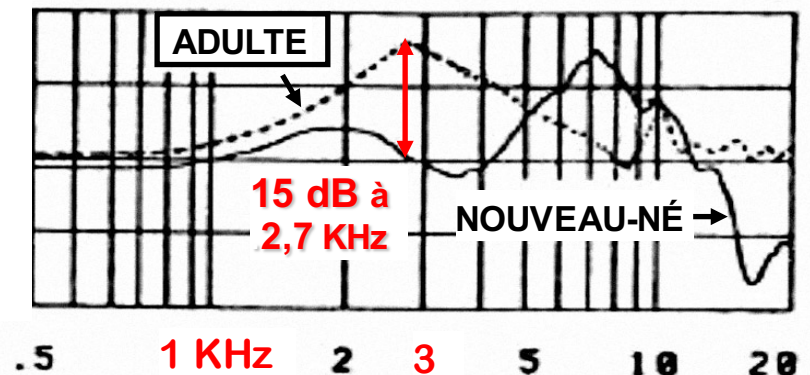
Ligament

Muscle



Tympan

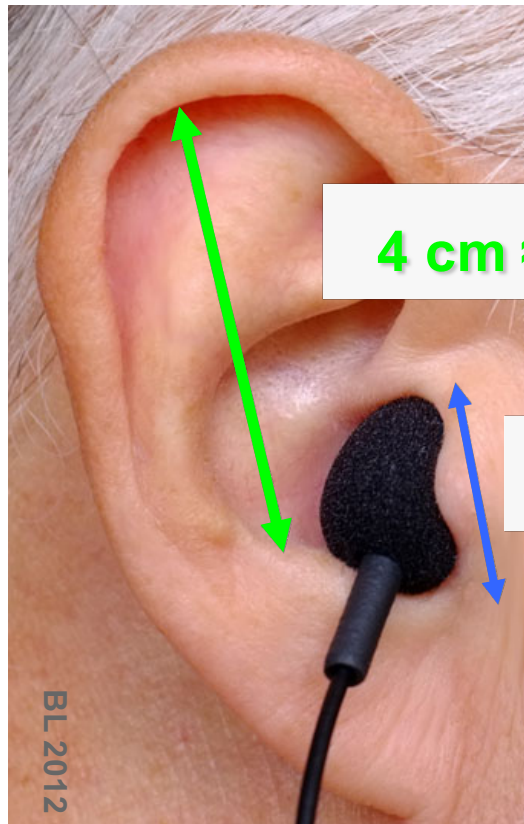
Les osselets de l'Oreille Moyenne.



B. Kruger & R. Ruben, 1987

L'oreille externe...

Réflexion et diffusion pour un objet de dimension $\geq 1/2 \times \lambda$



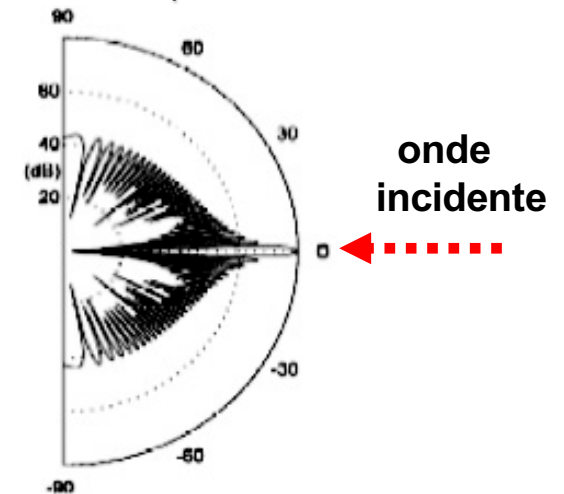
PAVILLON pour l'espace **frontal**
 $4 \text{ cm} \approx 1/2 \times \lambda$ (à 4 kHz)

$2 \text{ cm} \approx 1/2 \times \lambda$ (à 8 kHz)

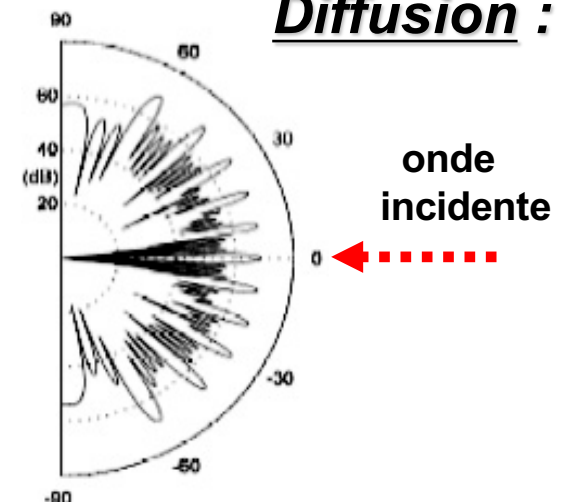
TRAGUS pour l'espace **dorsal**

Réflexion :

Angle d'incidence = Angle de réflexion (Comme la lumière...)



Diffusion :



Indices Spectraux (IS) = 3D

Modifications des fréquences dues à l'Oreille externe...(de 4 KHz à 16 KHz)

Mise en place des DPA 4060 :
comme des bouchons d'oreille !



Attention aux tympans !!

DPA DUA0560 Windscreen
(5 pièces)



*Mousse qui
permet de maintenir
le micro au creux de l'oreille*



Pour répondre à la question :

Pourquoi la capsule du DPA 4060 est tournée vers le conduit auditif ?

Réponses :

- Pour prendre toute l'**empreinte** de l'oreille externe (*indices spectraux = is*).
- Le **nœud de pression** à l'entrée du conduit ne produit aucune résonance.
- La **mousse DUA0560** permet de maintenir le micro au creux de l'oreille.
- La capsule est **Omni** quelque soit son orientation, jusqu'à 10 KHz.

