

# La mesure des dispositifs d'écoute individuelle

**Dominique Rodrigues,  
Jean-Noël Durocher,  
Jacques Perdereau,  
Jean-Michel Lambert,  
Patrick Cellard**

Laboratoire National de métrologie et d'Essais (LNE)  
ZA de Trappes Élanecourt  
29, avenue Roger Hennequin  
78197 Trappes CEDEX  
Tél. : 01 30 69 10 00  
Fax : 01 30 69 12 34  
E-mail : info@lne.fr

## Résumé

*L'article s'intéresse aux mesures des performances des nombreux dispositifs destinés à l'écoute individuelle. Une première partie expose les travaux en cours au LNE pour caractériser les cavités et les capillaires. Ces éléments permettent de créer les impédances acoustiques des simulateurs d'oreille. L'objectif est la normalisation de l'oreille artificielle utilisée pour étalonner les casques d'audiomètres. La deuxième partie développe les problématiques spécifiques aux baladeurs musicaux et aux écouteurs portés pendant le travail, sources de risques auditifs. Le cas des aides auditives permet de montrer la difficulté à évaluer certaines performances depuis qu'elles bénéficient de traitements numériques.*

## Abstract

*The article focuses on the performance measurements of the many devices intended for individual listening. The first part of the article describes the work in progress at LNE to characterize cavities and capillaries. These allow to create acoustical impedances of ear simulators. The aim is the standardization of an artificial ear used to calibrate the audiometer headphone. The second part develops problems specific to portable music devices and earphones used at work, hearing risk sources. The case of hearing aids allows to show how it is difficult to evaluate some performance since they benefit from digital processing.*



électroacoustique étant définie aussi généralement que par la conversion d'énergie électrique en énergie acoustique et réciproquement, les appareils électroacoustiques sont nombreux et très variés. Ceci entraîne une grande diversité de besoins de mesures. Le LNE réalise des mesurages dans les domaines de l'étalonnage des microphones, des performances des haut-parleurs, des sirènes... Tous ces dispositifs ayant des fonctions très différentes.

Depuis quelques années, le besoin de mesures électroacoustiques se déplace vers le domaine des systèmes d'écoute individuelle qu'ils s'agissent de casques, d'écouteurs ou de dispositifs plus petits comme les écouteurs intra-auriculaires.

Ceci est explicable par l'évolution même de la société. De tels appareils d'écoute interviennent à toute époque de la vie. Jeune, on est très consommateur de musique écoutée sur un baladeur (lecteur MP3, téléphone). Adulte dans un cadre professionnel, on peut avoir besoin de communiquer avec un «kit mains-libres», un casque sans fil, une oreillette, en particulier en travaillant dans un centre d'appels téléphoniques ou «hot-lines». A tout âge, on peut

avoir besoin de faire évaluer son audition chez un ORL qui va utiliser un casque d'audiomètre. Suivant le résultat, on peut avoir besoin d'une aide (prothèse) auditive. La presbycusie concerne une part importante de la population âgée.

L'évolution actuelle peut continuer. Pourquoi ne pas imaginer des boîtes de nuit où la musique ne serait fournie à chaque participant que par le biais d'un casque sans fil !

En termes d'évolution, on vit aussi la révolution du numérique qui, si elle permet toujours plus de miniaturisation, offre surtout beaucoup de possibilités de traitement du signal et de performances, réelles ou supposées. Il apparaît donc le besoin d'évaluer de nouveaux dispositifs comme des réducteurs de bruit, des expandeurs, des anti-larsens, ... Sur les écouteurs, on s'intéresse à la performance, la qualité, mais aussi à la sécurité. Il est en effet facile d'obtenir d'excellents rendements électroacoustiques sur des écouteurs, mais on atteint rapidement des niveaux trop forts qui posent un problème de dose et même de santé au travail, le cas échéant. Le rôle préventif de la réglementation doit alors intervenir.

La caractérisation du casque de l'audiomètre a d'autres objectifs et les mesures relèvent de la métrologie : le raccordement à des étalons pour garantir la reproductibilité des résultats. La justesse d'un audiomètre va impacter la qualité du diagnostic et, par voie de conséquence, la pertinence d'une éventuelle correction et les coûts supportés par le patient ou la collectivité.

Le mesurage de tous ces divers appareils d'écoute individuelle a un besoin commun, celui de disposer de simulateurs d'oreilles. On parle de coupleurs ou d'oreilles artificielles. Il est indispensable de présenter à l'écouteur testé une interface mécanique semblable au pavillon de l'oreille humaine et une impédance acoustique réaliste. Il est aussi important de relier le niveau de pression extérieure qui est la référence et la pression mesurée par le microphone à l'intérieur de l'oreille artificielle. Là aussi, il faut maîtriser des impédances dans de petites cavités et c'est un thème actuel d'étude au LNE.

Ainsi, cet article traite, dans un premier temps, de la métrologie des simulateurs d'oreille, et des problèmes fondamentaux qu'elle pose. Il est en effet nécessaire d'avoir conscience de l'importance de la charge acoustique que constitue l'oreille (réelle ou simulée) pour comprendre les difficultés rencontrées lors de la métrologie de tous les dispositifs d'écoute individuelle actuels, qui est alors abordée dans un deuxième temps.

## La métrologie des simulateurs d'oreille

### Les différents simulateurs d'oreille

Les simulateurs d'oreille sont des transducteurs destinés à mesurer la pression acoustique fournie par des écouteurs. Ils comprennent donc un microphone, mais également un dispositif (coupleur) permettant de placer l'écouteur dans le même environnement acoustique qu'en présence d'une oreille humaine. Il est fondamental que l'écouteur débite la même puissance acoustique dans les deux situations et par conséquent que l'impédance acoustique en mode mesure soit proche de celle qui est en situation réelle.

Il existe différents simulateurs d'oreille selon les différentes sortes d'écouteurs. En effet, c'est la position de la source sonore par rapport au tympan qui est déterminante car elle modifie la charge acoustique de la source.

Les simulateurs d'oreille doivent simuler l'impédance acoustique vue par la source sonore en fonction de sa position usuelle. Certains écouteurs vont se loger profondément dans le conduit auditif : c'est le cas des embouts d'oreille des prothèses auditives, d'autres sont placés à l'entrée du conduit comme les écouteurs des baladeurs et d'autres enfin sont extérieurs au conduit et incluent dans leur charge acoustique une partie plus ou moins importante du pavillon. C'est le cas notamment des casques de type «circum-aural» utilisés dans l'audiométrie classique.

### L'oreille artificielle utilisée en audiométrie à sons purs

Les casques à pavillon de type «circum-aural» sont utilisés en audiométrie pour le dépistage des surdités. Le simulateur d'oreille utilisé pour l'étalonnage des audiomètres est appelé «oreille artificielle» et ses caractéristiques, notamment son impédance acoustique d'entrée, sont définies dans la norme internationale CEI 60318-1 [1]. Cette impédance, issue de mesures réalisées sur des patients, a été modélisée sous la forme d'un réseau électrique à constantes localisées (inductances, capacités et résistances).

Malgré ce référentiel, le raccordement métrologique de l'oreille artificielle n'est toujours pas effectif car la norme ne précise pas la méthode de mesure de l'impédance. Cette carence est de plus accentuée par le fait que la modélisation de l'impédance est peu réaliste. En effet, il n'est pas possible dans le domaine acoustique, de réaliser des résistances ou des inductances seules ni de considérer ces éléments comme invariants en fréquence.

Concrètement, une oreille artificielle fiable ne peut être réalisée qu'à l'aide de réseaux de conduits capillaires couplés à des cavités. On est donc face à un double problème car l'objectif d'impédance fixé dans la norme n'est pas en adéquation avec la technologie utilisée et on ne dispose par ailleurs d'aucune méthode permettant de mesurer cette impédance avec précision.

### Vers une modélisation théorique de l'oreille artificielle

Depuis plusieurs années, le LNE s'implique dans un travail de recherche visant à modéliser analytiquement les champs acoustiques à l'intérieur de cavités et de conduits étroits tels que des tubes ou des fentes annulaires.

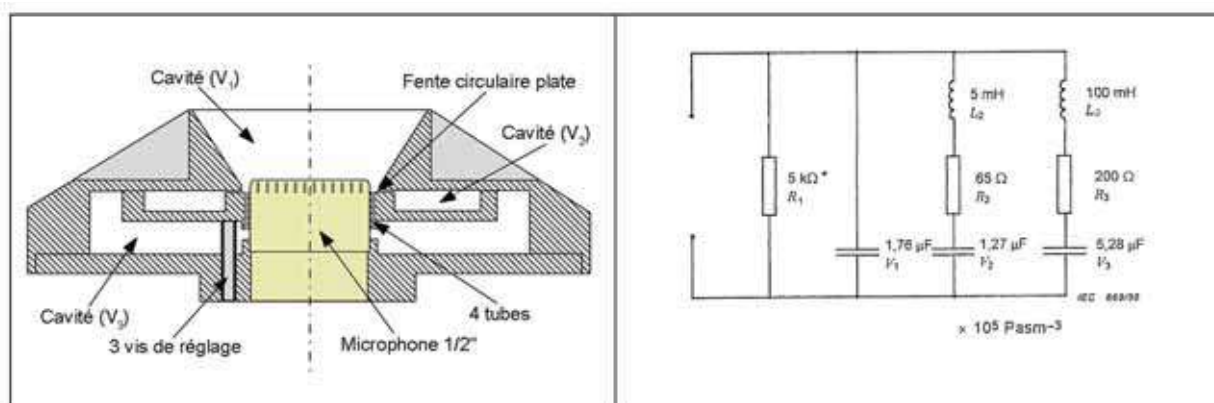


Fig. 1: Schéma de l'oreille artificielle et circuit équivalent

L'oreille artificielle (cf. [1] et figure 1) est constituée d'un volume frontal, qui simule une partie du pavillon de l'oreille humaine et assure le couplage entre le casque de l'audiomètre et l'oreille artificielle. Les autres éléments reproduisent l'impédance acoustique du conduit auditif. Il s'agit de conduits étroits (4 tubes et une fente annulaire) débouchant dans deux cavités de volumes différents.

Le LNE en collaboration avec le Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine (LAUM) a donc réalisé une étude sur la modélisation individuelle des éléments constitutifs de l'oreille artificielle. Ces nouvelles modélisations s'appuient sur les équations de l'acoustique en fluide dissipatif homogène, les effets de viscosité du fluide, importants dans les conduits capillaires, sont pris en compte de manière plus rigoureuse ainsi que les effets de conductivité thermique qui sont négligés dans les modèles en usage. L'impédance d'entrée de l'oreille artificielle est ainsi calculée sur la base des données géométriques des éléments constituant le transducteur. La comparaison des impédances d'entrée de l'oreille artificielle calculées à partir du nouveau modèle analytique et du modèle normalisé montre des différences significatives (cf. figure 2) appuyant ainsi l'idée de la nécessité d'une description analytique plus rigoureuse.

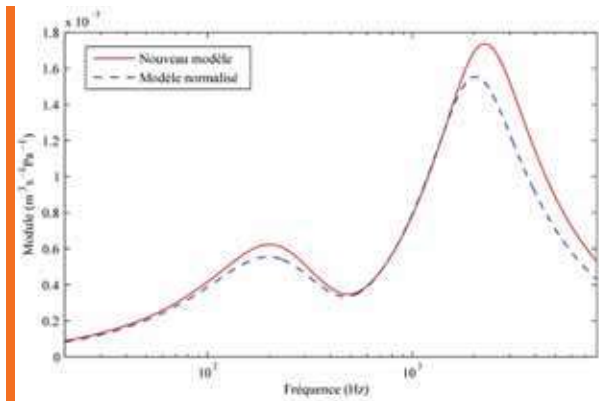


Fig. 2 : Admittance acoustique théorique (inverse de l'impédance) du conduit auditif de l'oreille artificielle (tubes, fente annulaire et cavités annulaires) selon le modèle utilisé, nouveau modèle et modèle à constantes localisées (norme CEI 60318-1, Réf.[1])

## Mesure de l'impédance acoustique d'éléments capillaires

La validation des nouveaux modèles d'impédances des éléments constitutifs de l'oreille artificielle exige une méthode de test permettant d'accéder à ces grandeurs par la mesure. Le LNE a donc développé une méthode de mesure d'impédances acoustiques de petits éléments tels que des tubes, des fentes, des cavités ou leurs associations.

Le dispositif de mesure d'impédance proposé repose sur les avancées mises en œuvre au LNE pour l'étalonnage des microphones en pression par la méthode de réciprocité (cf. encart 1) [2]. Il nécessite deux microphones réciproques, l'un utilisé en émetteur et l'autre en récepteur, couplés par une cavité acoustique de forme cylindrique où les petits éléments à caractériser sont disposés en paroi sur la périphérie de la cavité (cf. figure 3).

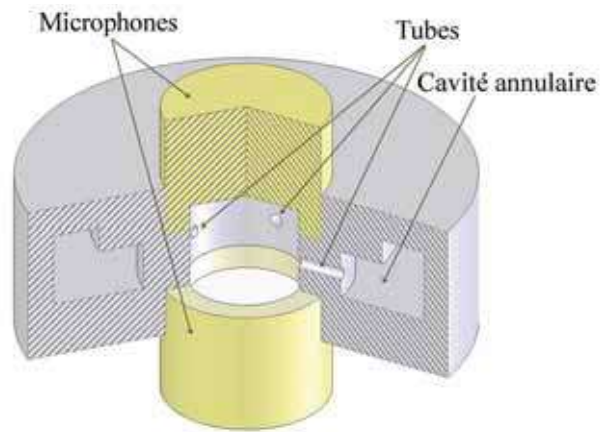


Fig. 3 : Dispositif utilisé pour la mesure d'impédances acoustiques de petits composants (en exemple, tubes débouchant dans une cavité annulaire)

L'impédance d'entrée de l'élément placé en paroi de la cavité de couplage est alors déduite de mesures électriques et de modèles analytiques de champs acoustiques décrivant le comportement du fluide à l'intérieur de la cavité de couplage. Ces mesures sont alors comparées aux impédances théoriques des éléments utilisés, l'objectif étant de parvenir à une convergence des deux résultats.

## Etalonnage des microphones par la méthode de la réciprocité

Les microphones à condensateur sont des transducteurs à la fois réversibles et réciproques c'est-à-dire qu'ils conservent leurs propriétés électroacoustiques, qu'ils soient utilisés en émetteur ou en récepteur. Cette propriété autorise une méthode d'étalonnage dite «méthode de la réciprocité», laquelle permet de déterminer de manière apparemment absolue l'efficacité (rapport de la tension électrique créée sur la pression acoustique subie) d'un microphone en le couplant à deux microphones, eux aussi inconnus et réciproques.

Pour chaque couple de microphones, l'un émetteur et l'autre récepteur, dans un milieu approprié (champ libre ou cavité) on peut déterminer le produit des efficacités. La théorie nous indique que ce produit est égal au quotient d'une impédance électrique par une impédance acoustique. La première est déterminée par des mesures électriques tandis que la deuxième résulte de l'expression analytique du champ acoustique (champ libre ou dans la cavité). Le raccordement de la mesure de l'efficacité aux unités du système international se fait par ces impédances qui font intervenir des paramètres électriques, dimensionnels et thermodynamiques.

Disposant de trois couples et de trois inconnues, les efficacités respectives des microphones peuvent être calculées.

L'important est de noter que la précision de l'étalonnage est directement liée à la précision de la modélisation du couplage. Ce point constitue la limite actuelle de la méthode ; néanmoins, elle reste la plus précise donc la méthode primaire d'étalonnage des microphones (Réf[2]). On étalonne tous les autres microphones par comparaison avec ces microphones de référence.

Une première campagne de mesure effectuée au LNE en 2005 a montré la faisabilité de la méthode de mesure sur une large bande de fréquence (environ 20 Hz/2 kHz) pour une fente annulaire mince, pour 4 tubes ouverts et pour 4 tubes chargés par un volume à leurs extrémités. Néanmoins, cette première étude n'a pas permis de conclure quant à la précision accessible à la mesure en raison des imperfections de fabrication des petits éléments utilisés comme références.

La validation de cette méthode de mesure par comparaison avec les impédances théoriques a nécessité la réalisation de capillaires de dimensions très précises [3]. Des procédures spécifiques ont dû être utilisées pour atteindre des précisions de l'ordre du  $\mu\text{m}$  sur des diamètres ou épaisseurs de l'ordre de 0,1 mm. Les dernières mesures effectuées en prenant en compte ces nouvelles exigences ont montré d'excellents résultats dans la gamme de fréquence 20 Hz/2 kHz pour 4 tubes ouverts et doivent être très prochainement confirmés pour une fente annulaire ouverte.

Enfin, l'extension aux fréquences plus élevées nécessite un modèle acoustique décrivant le comportement du fluide à l'intérieur de la cavité de couplage qui soit plus précis que celui qui est en usage à l'heure actuelle (modèle basé sur la propagation d'ondes planes suivant l'axe de la cavité cylindrique), mais par-delà plus complexe, exigeant de ce fait un modèle de microphone plus élaboré. Ce travail est en cours sur la base des avancées obtenues récemment au LNE [3].

## Perspectives

L'objectif de ces travaux est avant tout de maîtriser les modélisations acoustiques de tous les composants de l'oreille artificielle afin de pouvoir fournir aux instances de normalisation les éléments scientifiques nécessaires à une révision en profondeur de la norme.

Une fois ce but atteint, on pourra alors envisager de proposer un objectif plus réaliste basé sur la mesure de l'impédance acoustique de transfert et s'approchant au mieux de l'ancien objectif d'impédance d'entrée tout en intégrant les déviations dues à la méthode de mesure (ondes radiales dans la cavité de couplage [4]).

## Évaluation des baladeurs musicaux

On aborde ici le thème des risques auditifs. La mesure des caractéristiques des écouteurs destinés à l'écoute de la musique n'a pas été une préoccupation principale pour l'électroacoustique jusqu'aux années 90, exception faite de l'audiométrie. Les normes (telles que CEI 268-7 [5]) préconisaient soit l'emploi des méthodes subjectives pour la détermination de la courbe de réponse amplitude fréquence, soit l'utilisation de l'oreille artificielle conforme à la CEI 318 [1], destinée à l'audiométrie, pour mesurer la sensibilité, la distorsion. Les caractéristiques fréquentielles annoncées par les fabricants pour les casques et les écouteurs étaient alors toutes identiques : «20 Hz/20 kHz», en général sans autre précision puisque rien de plus n'était exigé par une norme officielle.

## Problématique des baladeurs et réglementation

Dans les années 90, les instances médicales ont mis en évidence l'apparition de déficiences auditives précoces

chez les jeunes, dues à l'écoute de la musique à fort niveau [6]. Une corrélation avec l'écoute prolongée des baladeurs musicaux a été décrite dans plusieurs études [7]. Les facteurs «niveau sonore» et «durée d'écoute» (dose de bruit) sont les responsables désignés dans ces études épidémiologiques.

Face à ce constat, les autorités sanitaires ont promulgué la loi n°96-452 du 28 mai 1996 qui limite le niveau sonore maximal du baladeur à 100 dB et oblige l'apposition d'une étiquette sur le baladeur avertissant du danger de l'écoute prolongée de la musique à fort niveau. La limitation du niveau sonore a rendu obligatoire l'élaboration d'une méthode de mesure appropriée qui soit représentative et reproductible, avec une mise en œuvre acceptable pour les fabricants et les laboratoires.

Partant des résultats de l'étude sur la mise au point d'une méthode d'évaluation de la qualité acoustique d'un casque d'écoute [8], le LNE a réalisé une étude pour le SIMAVELEC (Syndicat des industries de matériels audiovisuels électroniques) sur une «Méthode de mesure du niveau de pression acoustique maximal restitué par les écouteurs de baladeurs» [9]. Cette étude a servi de base technique pour l'élaboration d'une part de l'arrêté du 24 juillet 1998 relatif aux baladeurs musicaux et d'autre part de la norme européenne EN 50332. Cette norme sert de référence technique actuellement pour (entre autres) l'application de la réglementation française des baladeurs avec l'arrêté du 8 novembre 2005, et à l'établissement de la conformité pour différentes directives européennes.

## Description de la méthode normalisée

Cette méthode doit permettre de mesurer des niveaux sonores émis par les écouteurs des baladeurs proches de ceux qui existent en utilisation réelle. La reproductibilité des mesures doit être assurée avec un écart-type raisonnable et la mise en œuvre doit être relativement aisée.

Ceci a conduit à définir :

### Un système de mesure

La solution retenue, en fonction des résultats des deux études précitées, est l'utilisation d'un simulateur de tête et de torse (STT) (cf. figure 5). Il comprend la reproduction



Fig. 4 : Ecouteurs de baladeurs



d'un pavillon moyen de l'oreille humaine en caoutchouc-silicone assurant un couplage adapté aux différents types d'écouteurs (cf. figure 4) et un simulateur de conduit auditif et d'oreille occluse (CEI 711 [10]) pour obtenir une terminaison d'impédance acoustique représentative. Cette méthode a été reprise dans les normes NF EN 50332 [12, 13], et par la norme ISO 11904-2 [14].

mesuré par le microphone du simulateur (correspondant au tympan). L'effet de cette correction est non négligeable car, à certaines fréquences, les niveaux sont à corriger de 10 à 15 dB. Le graphique (cf. figure 6) illustre la réponse en fréquence du STT en champ libre sous une incidence de 0°. Cette correction «champ libre» a été retenue pour la mesure du niveau sonore des écouteurs de baladeur.

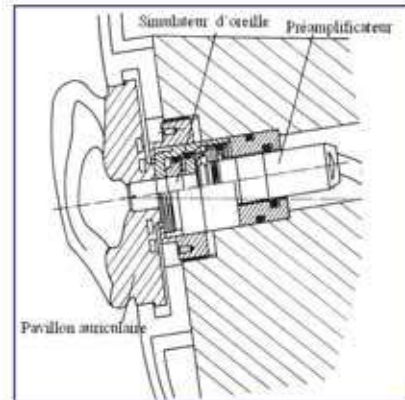


Fig. 5 : Simulateurs de tête et de torse et simulateur d'oreille du STT

**Un estimateur du niveau sonore**

L'estimateur du niveau sonore se réfère aux différents textes réglementaires et études épidémiologiques sur l'exposition aux bruits en milieu de travail. Le potentiel de nocivité du bruit est estimé par le niveau continu équivalent pondéré A à l'entrée de l'oreille.

Le niveau de pression acoustique mesuré par le microphone du simulateur d'oreille, représente celui qui existe au niveau du tympan. Il diffère du niveau de pression acoustique extérieur, mesuré à l'entrée de l'oreille, par la fonction de transfert du STT.

Cette fonction de transfert est appliquée comme une correction pour connaître le niveau de pression acoustique extérieur (le niveau réglementé) qui produirait le niveau

Le niveau d'enregistrement des différents supports (cassette audio analogique, CD, MD, DVD, MP3...) ou de modulation (récepteur FM) ont été déterminés en étudiant les niveaux moyens d'enregistrement ou d'émission des musiques de variété écoutées par les jeunes. Les musiques de variété actuelles sont en effet caractérisées par une faible dynamique et un niveau d'enregistrement élevé contrairement à la musique classique comme le montrent les évolutions des niveaux des enregistrements musicaux (cf. figure 7).

Le dernier point est de se rapprocher au plus près des habitudes des jeunes utilisateurs de baladeurs en prescrivant de régler le baladeur pour avoir le niveau de sortie maximal (volume et égaliseurs au maximum).

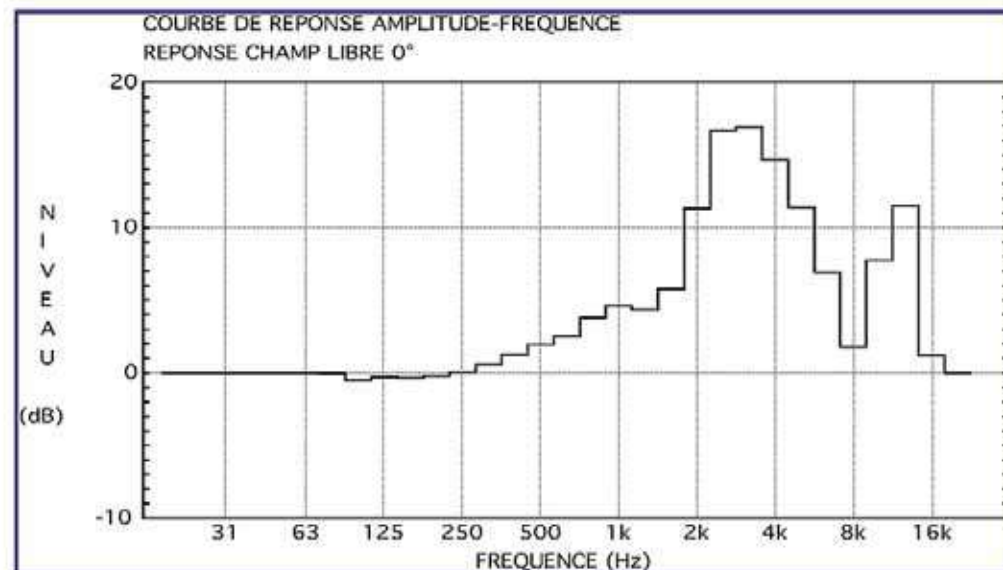


Fig. 6 : Réponses en fréquence du STT

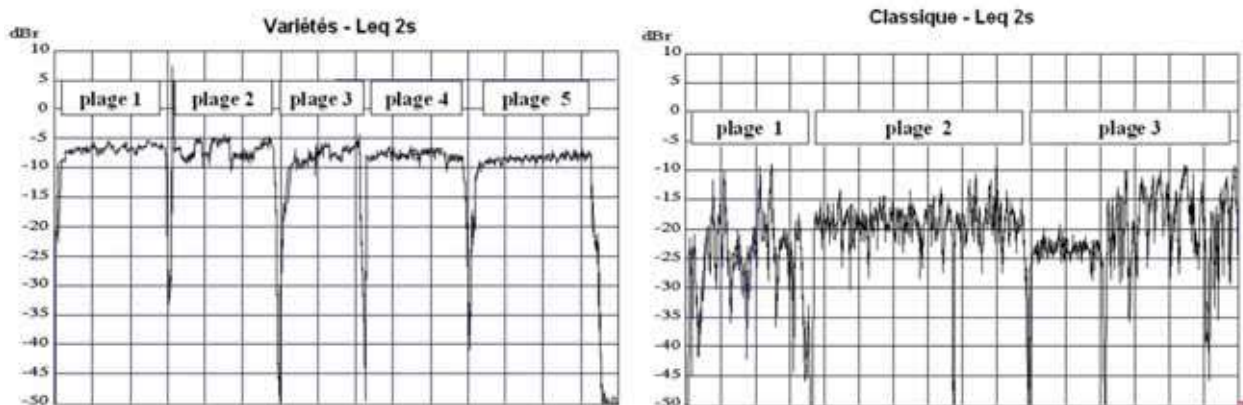


Fig. 7 : Exemples de niveaux d'enregistrements musicaux

### Le port d'écouteurs au travail

De plus en plus de travailleurs portent de manière quasi permanente des écouteurs. Les opérateurs de téléphonie dans les centres d'appel en sont un exemple. Il existe également des entreprises où la communication entre personnes se déplaçant à l'intérieur de vastes locaux s'effectue via une transmission radio et des écouteurs. La législation du travail (cf. encart 2) n'a cependant pas prévu de règle spécifique à ces cas, et les méthodes de mesure préconisées sont plus adaptées aux bruits d'ambiance qu'aux sons transmis par écouteurs [16].

- des niveaux d'entrée (ligne téléphonique),
- des réglages du micro-casque accessibles à l'opérateur,
- des conditions d'utilisation (durée des conversations téléphoniques journalières).

Ainsi, la méthodologie de mesure pourrait être améliorée : le rapport de l'INRS propose d'utiliser une oreille artificielle conforme à la norme CEI 60318-3 [18] dont l'usage est normalement réservé à l'étalonnage de certains casques d'audiomètres. Son utilisation pour des micro-casques de téléphonie s'avère peu fiable, car l'étanchéité sur le pavillon de l'oreille n'est pas correctement simulée et les

La législation du travail prévoit une surveillance et des actions à la charge de l'employeur pour protéger les travailleurs des bruits intenses susceptibles de provoquer une surdité. La directive européenne 2003/10/CE encadre les législations nationales et fixe des seuils en termes de doses de bruit (niveaux d'exposition journalière). Un premier seuil, dit de déclenchement de l'action, est fixé à 80 dB (A). Il impose à l'employeur la mise à la disposition des travailleurs de protecteurs individuels (casques anti-bruit, bouchons d'oreille). Un second seuil, fixé à 85 dB (A), entraîne l'obligation, sous la responsabilité de l'employeur, du port effectif de protecteurs. Enfin, le seuil limite de 87 dB (A) ne doit pas être dépassé et l'employeur doit prendre toute mesure efficace pour cela.

En raison du nombre de plaintes dans les centres d'appels, souvent relayées par les Commissions d'hygiène et de sécurité (CHSCT), l'Institut national de recherche et de sécurité (INRS) a réalisé une étude sur ce thème [17]. Une des conclusions est que près d'un tiers des opérateurs ayant participé aux tests est soumis à des niveaux d'exposition quotidienne supérieurs à 85 dB (A) et donc que la situation sonore des opérateurs de téléphonie est potentiellement dangereuse pour leur audition.

Le LNE est régulièrement sollicité par des responsables de centres d'appels ou par des fabricants pour évaluer les micro-casques, en vue de déterminer si leur utilisation peut conduire à des dépassements des seuils fixés par la législation du travail. Il est souvent difficile d'apporter une réponse simple car la dose de bruit perçue dépend :

niveaux mesurés dépendent grandement de la force d'appui exercée lors de la mesure. L'utilisation d'un mannequin, tel que préconisé par la norme ISO 11904-2 [19], avec simulation du pavillon d'oreille, permettrait d'améliorer la représentativité des mesures vis-à-vis de la situation réelle d'utilisation.

D'autre part, certains micro-casques sont munis de réducteur de bruit s'enclenchant automatiquement en présence d'un bruit stationnaire. La méthodologie de mesure devrait définir des signaux (ainsi que leur niveau) permettant d'évaluer la conformité de tels équipements. Le LNE utilise des balayages en fréquence rapides dont l'enveloppe spectrale est représentative de la parole transmise par le téléphone (Bande 250/3 150 Hz avec un maximum à 500 Hz). La variation rapide en fréquence évite que le signal d'essai soit traité par le micro-casque muni d'un réducteur de bruit comme étant un bruit.

L'absence actuelle d'un texte officiel spécifique rend difficile l'évaluation de l'exposition au bruit des travailleurs portant des écouteurs. Les éléments pour définir une méthode de mesure existent (norme ISO 11904-2, NF S 31-084 [20]), mais seule une prise de conscience des pouvoirs publics sur le risque auditif lié au port d'écouteurs au travail permettra de faire avancer les textes pour que des contrôles puissent être effectifs.

## L'évaluation des performances des aides auditives

L'aide auditive (cf. encart 3), dans sa forme compacte, est apparue dans les années cinquante grâce à l'apport du transistor permettant une miniaturisation des appareils. Le LNE réalise des mesures sur les aides auditives depuis maintenant plus de 30 ans. Leur but est d'évaluer les performances en termes de gain acoustique et aussi en termes de qualité du son perçu. Les normes de mesure applicables à ces évaluations ont été rédigées, pour l'essentiel, avant l'apparition des aides auditives numériques. Aussi les améliorations récentes apportées par les traitements du signal numérique ne sont pas ou peu prises en compte.

### Dispositif de mesures

L'aide auditive est placée face à une enceinte acoustique dont le niveau d'émission est réglable avec précision. Pour cela on établit au préalable la réponse de l'enceinte acoustique à l'emplacement de l'aide auditive. Les mesures ont lieu dans une salle anéchoïque (cf. figure 8) recréant les conditions de champ libre dans la bande de fréquence utile (100 Hz – 10 kHz).

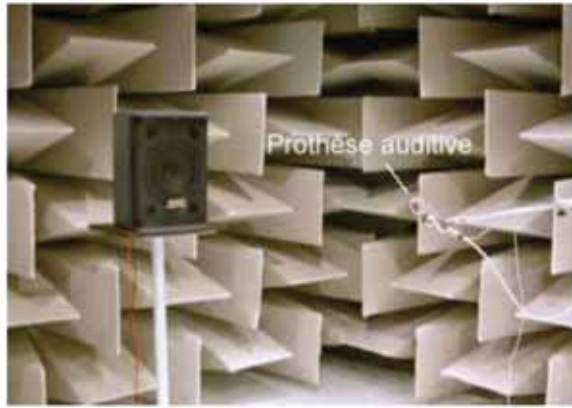


Fig. 8 : Mesure en salle anéchoïque

Les niveaux de pression acoustique produits par l'aide auditive sont mesurés à l'aide d'un coupleur simulant l'impédance acoustique à la moitié du conduit auditif (coupleur conforme à la norme CEI 711 [11]). Le microphone dans le coupleur est disposé pour mesurer un niveau de pression acoustique proche du niveau existant au contact du tympan.

### Principaux paramètres évalués

Le premier paramètre évalué est le gain, soit l'écart (exprimé en décibels) entre le niveau de pression acoustique mesuré par le coupleur et le niveau de pression acoustique extérieur. Il dépend, bien entendu, de la fréquence et du réglage de l'aide auditive. On retient principalement deux valeurs qui sont mesurées à la fréquence de référence (1,6 kHz ou 2,5 kHz selon le modèle d'aide auditive) : le gain maximal et le gain pour lequel le taux de distorsion n'excède pas 10%. On notera que ce gain n'est pas le gain perçu par la personne appareillée, car il compare un niveau de pression acoustique au contact du tympan à un niveau de pression acoustique externe. Une correction dite d'insertion permet de déterminer le gain réellement perçu, qui est inférieur au gain mesuré.

La mesure du taux de distorsion harmonique est un autre paramètre, qui permet principalement de s'assurer que l'écouteur ou les circuits analogiques ne travaillent pas au-delà de leur zone linéaire (pas de saturation). On admet qu'un taux de distorsion de 10% fixe la limite d'utilisation de l'aide auditive.

Le dernier paramètre important est le bruit de fond, principalement lié à l'étage d'entrée (microphone). La mesure du bruit de fond doit

### Qu'est-ce qu'une aide auditive ?

Une aide auditive est un appareil qui permet de renforcer et d'améliorer la sensation sonore pour les personnes souffrant d'un déficit du système auditif.

Elle comprend :

- un capteur de la pression acoustique extérieure (1 ou plusieurs microphones),
- une électronique d'amplification et de réglage,
- un écouteur ré-émettant le son amplifié,
- un dispositif conduisant le son émis par l'écouteur jusqu'au milieu du conduit auditif

Il existe principalement deux configurations :

- Les « contours » posés au-dessus du pavillon et reliés par un petit tube à un embout situé dans le canal auditif (réalisé par moulage)
- Les « intras » directement insérés dans le canal auditif



Contour



Intra

Photographies SIEMENS-Audiologie

être effectuée en désactivant les dispositifs réducteurs de bruit ainsi que les dispositifs dits «expandeurs» qui ont tendance à réduire le gain en l'absence de signal. La mesure du bruit de fond en présence d'un signal pourrait être préconisée, car elle évite cette difficulté.

### Les dispositifs liés à l'amélioration de la compréhension de la parole

De tels dispositifs existent maintenant sur la plupart des aides auditives. Le traitement numérique partage le signal en plusieurs canaux fréquentiels (20 par exemple), ce qui permet des réglages différents pour chaque canal. La reconnaissance des types de sons (parole, bruit) et des environnements sonores deviennent aussi possibles. Des algorithmes de calcul permettent ainsi l'amplification préférentielle des signaux de parole, la réduction du bruit ambiant, ou l'adaptation des réglages de gain à la situation sonore de l'opérateur.

Ces algorithmes sont transposables à d'autres dispositifs que les aides auditives. Par exemple, les casques utilisés par les télé-opérateurs peuvent être munis de dispositifs de réduction de bruit ou de réglage adaptatif du gain qui sont également basés sur la numérisation préalable du signal. Quelques exemples sont donnés ci-après :

- Le réducteur de bruit agit sur les bandes fréquentielles stables : son principe est basé sur la détection de la stabilité du niveau dans certaines bandes de fréquence (aucun signal de parole ne présente cette stabilité). Lorsque ce type de dispositif ne peut pas être débrayé, les mesures faites avec des signaux stationnaires ne sont plus valides car elles sont systématiquement affectées par le réducteur de bruit. Un signal à balayage fréquentiel rapide sur lequel le réducteur n'agit pas permet d'éviter ce problème. Il existe également des dispositifs qui réduisent les bruits à caractère impulsionnel, limitant ainsi l'effet gênant pour les malentendants des claquements de porte, des bruits de couverts dans un restaurant, etc.
- Le rehaussement de la parole consiste à faire ressortir les signaux de la parole vis-à-vis des bruits de l'environnement : les bandes comportant les signaux de la parole sont détectées en temps réel par des algorithmes spécifiques et les niveaux dans ces bandes rehaussés.
- Les systèmes directifs étaient initialement basés sur la directivité d'un microphone unique à deux entrées. L'arrivée du traitement numérique a rendu possible la réalisation de systèmes directifs à 2, voire 3 microphones. Dans ce cas, la directivité peut être ajustée en fonction de la situation sonore, soit avec différents programmes commutables, soit automatiquement. Le renforcement de la directivité du son peut avoir un apport positif dans la situation de conversation en vis-à-vis mais être handicapant ou dangereux dans une situation comme le déplacement en ville.

Il n'y a pas encore de protocoles de mesure normalisés permettant l'évaluation des fonctions vues ci-dessus. Les évaluations faites par les fabricants sont principalement des évaluations subjectives en relation avec la satisfaction des personnes appareillées. Pour les mesurer, il conviendra surtout de les connaître assez pour pouvoir contourner leur caractère adaptatif ou à défaut de bloquer les automatismes.

### Les dispositifs anti-Larsen

L'effet Larsen se traduit par l'émission d'un sifflement à fort niveau pouvant être extrêmement désagréable pour le porteur de l'aide auditive. Il peut être déclenché par l'augmentation du transfert acoustique de l'écouteur vers le microphone, par exemple lors d'un déplacement de l'embout dans le conduit auditif (perte d'étanchéité) ou lorsqu'on approche un objet (chapeau, combiné téléphonique) près du microphone de l'aide auditive.

Pour éviter l'effet Larsen, le plus simple est de limiter le gain dans les bandes de fréquence les plus sensibles, de façon à assurer un certain confort à la personne appareillée. Cela se fait toutefois au détriment de la performance maximale de l'appareil, ce qui peut être dommageable dans le cas de surdités importantes nécessitant des gains supérieurs à 40 décibels.

L'apparition du numérique a permis le développement de deux types d'anti-Larsen :

- Dispositifs à filtres adaptatifs qui s'enclenchent automatiquement pour limiter le gain dans les bandes de fréquence les plus critiques, et ;
- Dispositifs compensant la boucle acoustique de rétroaction par une boucle opposée. Ces dispositifs doivent évaluer en temps réel la fonction de transfert de la boucle de rétroaction et s'appuient sur des algorithmes sophistiqués.

En 2004-2005, le Laboratoire national d'essais a réalisé une étude sur l'évaluation de la performance des dispositifs anti-Larsen [21]. La performance est évaluée par l'augmentation du gain déclencheur de l'effet Larsen. On a été amené à simuler le défaut d'étanchéité de l'embout par une fuite capillaire réglable, adaptée sur le coupleur de mesure, car le montage normal sur le coupleur est parfaitement étanche. Les résultats dépendent peu de la fuite simulée, si l'on se situe dans une plage raisonnable. Des tests effectués sur plusieurs modèles d'aides auditives ont montré que l'apport des dispositifs anti-Larsen était assez limité : l'augmentation du gain est le plus souvent inférieure à 5 dB et atteint au mieux 7 dB.

### Conclusion

Les dispositifs d'écoute individuelle font l'objet d'enjeux de santé qui sont d'autant plus importants que notre société les utilise de plus en plus. Corrélativement, ils sont de mieux en mieux caractérisés, en particulier par des progrès sur la métrologie des petites cavités, mais des travaux sont toujours nécessaires soit pour obtenir une oreille artificielle normalisée satisfaisante, soit pour évaluer les fonctions permises par le traitement numérique du signal.

### Références bibliographiques

[1] CEI 318 : 1970 remplacée par CEI 60318-1 : Simulateur d'oreille pour l'étalonnage des écouteurs supra-auraux, 1998.

[2] C. Guianvarc'h : La cavité de couplage acoustique dans la méthode de réciprocité : modèles analytiques pour l'étalonnage des microphones et la mesure d'impédances de petits composants. Thèse de doctorat de l'Université du Maine, 2005.



- [3] D. Rodrigues, C. Guianvarc'h, J.-N. Durocher, M. Bruneau, A.-M. Bruneau : Méthode de mesure d'impédance de petits éléments acoustiques. 18<sup>e</sup> Congrès Français de Mécanique, Grenoble, 2007.
- [4] C. Guianvarc'h, J.-N. Durocher, M. Bruneau, A.-M. Bruneau : Microphone reciprocity calibration: acoustic field in the coupler, quasi plane wave approximation. Acta Acustica, 92, 2006.
- [5] CEI 268-7 : Equipements pour systèmes électroacoustiques - Partie 7 : Casques et écouteurs – 1ère édition 1984 – 2ème édition CEI 60268-7, 1996.
- [6] D.Loth, C. Menguy, M.Teyssou : Effet sur la santé de l'écoute de la musique à haut niveau sonore. Ministère de la Santé, 1994.
- [7] P. Avan, D.Loth, C. Menguy, M.Teyssou : Etude sur les risques secondaires à l'écoute des baladeurs. Ministère de la Santé, 1995.
- [8] J.M. Lambert, J. Perdereau : Evaluation de la qualité des casques d'écoute à l'aide d'un mannequin équipé d'une oreille artificielle. Revue d'Acoustique, n°69, 1984.
- [9] L. Faille, J. Perdereau : Méthode de mesure du niveau de pression acoustique maximal restitué par les écouteurs de baladeurs. LNE / SIMAVELEC –Spécification syndicale 11, 1996.
- [10] CEI 711 - Première édition 1981 : Simulateur d'oreille occluse pour la mesure des écouteurs couplés à l'oreille par des embouts.
- [11] A. Damongeot, A. Kusy : Comparaison de plusieurs méthodes de mesure du niveau d'émission sonore des écouteurs. Notes scientifiques et techniques de l'INRS, 1996.
- [12] NF EN 50332-1 : Équipement de systèmes acoustiques : casques et écouteurs associés avec un baladeur - Méthode de mesure de niveau maximal de pression acoustique et prise en compte d'une limite - Partie 1 : méthode générale pour un équipement complet, 2000.
- [13] NF EN 50332-2 :: Équipement de systèmes acoustiques : casques et écouteurs associés avec un baladeur - Méthode de mesure de niveau maximal de pression acoustique et prise en compte d'une limite - Partie 2 : adaptation des équipements avec des écouteurs provenant de différents fabricants, 2003.
- [14] ISO 11904-2 : Acoustique - Détermination de l'exposition sonore due à des sources placées à proximité de l'oreille - Partie 2 : technique utilisant un mannequin, 2004.
- [15] CEI 268-1, 2ème édition 1985 : Equipements pour systèmes électroacoustiques - Première partie, Généralités.
- [16] Directive 2003/10/CE du Parlement Européen et du Conseil du 6 février 2003 concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (bruit).
- [17] V. Planeau, D. Robinet : Evaluation de l'exposition sonore quotidienne des opérateurs de centres d'appels téléphoniques - INRS – NST N° 231, Février 2003.
- [18] CEI 60318-3 : Première édition 1998 - Electroacoustique – Simulateurs de tête et d'oreille humaines – Partie 3 : Coupleur acoustique pour l'étalonnage des écouteurs supra-auraux utilisés en audiométrie.
- [19] NF EN ISO 11904-2 : Détermination de l'exposition sonore due à des sources placées à proximité de l'oreille. Partie 2 : Technique utilisant un mannequin, Juin 2005.
- [20] [http://www.atousante.com/risques\\_professionnels/risques\\_physiques/operateurs\\_en\\_centre\\_d\\_appel\\_telephonique](http://www.atousante.com/risques_professionnels/risques_physiques/operateurs_en_centre_d_appel_telephonique).
- [21] J.-M. Lambert, D. Hervieu : Extension des essais de prothèses auditives. LNE Etude 112, 2003.