

# Problématique de bouchons d'oreilles en aéronautique militaire

## Acoustic and ergonomic characteristics of earplugs in military aeronautics

David Sarafian et Guillaume Andéol

Institut de Recherche Biomédicale  
des Armées  
BP 73  
91223 Brétigny Sur Orge  
France  
E-mail : david.sarafian@irba.fr

### Résumé

Dans le milieu aéronautique militaire, l'exposition de l'opérateur au bruit est particulièrement élevée. Cette exposition impose de proposer aux opérateurs une double protection (casque plus bouchons d'oreilles). Dans cette étude, nous avons évalué les aspects ergonomiques et les atténuations acoustiques de bouchons d'oreilles utilisés en double protection parmi une population d'utilisateurs habituels. Les atténuations acoustiques sont mesurées selon la méthode REAT et les aspects ergonomiques sont évalués au travers de questionnaires. Les bouchons d'oreilles sont de type personnalisés en silicone et réalisés en deux séries distinctes (n =15 et 16 participants), personnalisés en acrylique (n =10), génériques en mousse équipés de mini haut-parleurs CEP (n =16 et 12), et personnalisés en matière souple avec un contrôle qualité in situ (n=19). Les résultats obtenus montrent que l'atténuation mesurée est différente des spécifications indiquées par le fabricant. Selon le type de bouchon, environ un tiers des personnes ne supporte pas le port. Pour le reste de la population, la tolérance au port des bouchons ne permet pas un port pendant la durée totale de l'exposition au bruit. Cette étude a également permis de mettre en évidence des relations entre les atténuations acoustiques et les aspects ergonomiques. Enfin, des recommandations sont émises pour le choix de bouchons d'oreilles.

### Summary

Operators in military aeronautic environments are exposed to remarkably high noise levels. These noise levels call for the use of dual protection, combining anti-noise headsets with earplugs. In this study, we evaluated the acoustic properties (attenuation) and ergonomic aspects of earplugs used in combination with anti-noise headsets in a sample of frequent users (n=10 to 24). The earplugs were custom-made and individualized, silicon, acrylic, and silicon with in situ quality test, or generic foam with miniature speakers. Acoustic attenuation was measured using the REAT standard. Ergonomic aspects were evaluated using questionnaires. The results revealed the following. Firstly, some differences were observed between the measured attenuation levels and those specified by the manufacturer. Secondly, approximately one third of the users could not tolerate the earplugs, although this depended on earplug type; the remaining two thirds of the users could not keep the earplugs on for the entire time period during which they were exposed to noise. Thirdly, some relationships were identified, between the acoustic and the ergonomic characteristics of the earplugs. Based on these results, specific recommendations concerning the selection and use of earplugs for use in dual hearing protection are formulated.

## Contexte

Pour les armées modernes, les pertes auditives provoquées par le bruit sont un problème significatif [1,2]. Les nouveaux types d'aéronefs et d'armes sont souvent plus puissants et plus bruyants que les anciens [3]. Dans le milieu aéronautique militaire, l'exposition de l'opérateur au bruit est particulièrement élevée. Malgré les progrès obtenus concernant la performance acoustique des matériaux et les techniques d'atténuation, la protection auditive en milieu militaire peut s'avérer insuffisante en termes d'atténuation ou inadaptée en termes d'ergonomie. La solution d'ajouter à l'équipement de tête des bouchons d'oreilles semble en théorie idéale par rapport aux contraintes d'intégration pour apporter un complément d'atténuation [4].

## Problématique

Une meilleure prise en compte des risques auditifs associés à l'exposition à des niveaux de bruit élevés est notable et, en conséquence, les limites d'exposition établies dans les normes [5] et la législation nationale [6] sont devenues plus astreignantes. C'est pourquoi, il est devenu de plus en plus difficile de protéger convenablement le personnel militaire pendant la durée du service nécessaire à la satisfaction des besoins opérationnels. En pratique, malgré la mise en place de cette double protection (bouchons plus casque) dans les forces aériennes, la prévalence des signes d'atteinte auditive ne diminue pas et les opérateurs continuent à se plaindre de nuisances sonores [7]. Par ailleurs, les pilotes se plaignent de l'inconfort lié au port prolongé des bouchons d'oreilles.

Dans certains cas, des problèmes dans la perception et la compréhension de l'environnement sonore sont relatés par les opérateurs à leur poste de travail. La double protection auditive semble donc poser problème à la fois en termes d'efficacité de protection et d'ergonomie :

- Les performances d'atténuation de bouchons d'oreilles *in situ* ou sur l'opérateur lui-même sont-elles similaires à celles annoncées par le fabricant?
- Existe-t-il une relation entre la performance d'atténuation et l'ergonomie des bouchons d'oreilles ?
- Quels sont les problèmes relatifs au port de bouchons d'oreilles en double protection et dans un contexte aéronautique ?

Répondre à ces questions est l'enjeu de cette étude. L'objectif est d'établir ou non l'existence de relations entre les aspects ergonomiques des bouchons d'oreilles et leurs performances acoustiques dans le milieu de l'aéronautique et avec des contraintes spécifiques.

### Méthodes expérimentales

Afin de répondre aux questions précédentes, les méthodes expérimentales suivantes sont choisies :

- Concernant la caractérisation de la performance acoustique, la méthode REAT (ANSI 12.6) [8] est normalisée et universellement employée, c'est donc la méthode retenue,
- Concernant les aspects ergonomiques, la mesure de paramètres dimensionnels de bouchons d'oreilles peut fournir un indicateur objectif. Le ressenti des participants au port de bouchons d'oreilles est un indicateur subjectif néanmoins important à recueillir au moyen de questionnaires [9] et d'analyses d'entretien.

### Protocole

Afin, d'une part, d'éviter les biais habituellement rencontrés avec des sujets professionnels (surestimation des valeurs d'atténuation) et d'autre part, d'obtenir une mise en place de la double protection conforme à celle utilisée en opération [10], les participants à l'expérimentation sont choisis si possible parmi des opérateurs aéronautiques disposant de leur propre équipement de tête. Chaque participant est soumis à une visite d'inclusion : une otoscopie et une audiométrie. Les participants retenus sont normo-entendants par rapport à leur classe d'âge. Les mesures sont réalisées conformément à la norme REAT. L'ajustement de l'insertion des bouchons est effectué dans le bruit. Les mesures sont ensuite effectuées avec les différents équipements dans un ordre croisé. Pendant les pauses obligatoires, l'opérateur renseigne les différents questionnaires et les commente, en direct, à l'expérimentateur.

Pour l'analyse des données, les courbes d'atténuation mesurées sont comparées à celles du fabricant. Les données des questionnaires sont mises en relation avec la performance en atténuation mesurée et avec les observations relatives à la mise en place de la protection auditive.

### Moyens

Pour la méthode REAT, nous disposons d'un moyen d'essai constitué d'une chambre semi-anéchoïque et de 8 haut-parleurs à faible distorsion (cf. figure 1). A noter que cet outil permet une mesure de l'atténuation pour les octaves de 63 Hz à 8 kHz.

Le premier questionnaire concerne tous les types d'opérateurs de l'aéronautique travaillant avec une double protection. Différents aspects ergonomiques comme la mise en place, le port, le retrait, le confort général, l'utilisation, l'entretien, les accessoires de la protection auditive sont abordés. Le deuxième questionnaire est dédié au personnel navigant (PN), et les questions sont relatives à la qualité des communications, le niveau sonore des alarmes, la gêne sonore et le contexte d'emploi. Ces questionnaires sont parfois complétés d'enquêtes sur le terrain ou d'entretien pour recueillir des commentaires supplémentaires de la part des opérateurs. Des mesures dimensionnelles des bouchons d'oreilles sont réalisées avec un pied à coulisse.



Fig. 1 : Moyen d'essai REAT à l'IRBA  
 Experimental apparatus for the REAT tests

### Equipements évalués

La figure 2 illustre les différents bouchons évalués et insérés dans l'oreille. Ces bouchons sont portés en double protection avec des casques de vols militaires, excepté pour les bouchons « Surdifuse » portés avec un casque de pont d'envol.



Protac -15dB      Surdifuse      Sonomax      CEP

Fig. 2 : Bouchons d'oreilles testés  
 The different types of earplugs evaluated in this study

## Résultats

### Etude n°1 : bouchons d'oreilles personnalisés en silicone

Cette étude concerne des équipages d'hélicoptères de combat équipés de bouchons de la marque Protac (type : Pianissimo) et ont en moyenne 1 an d'utilisation. Ces bouchons d'oreilles sont personnalisés en silicone et à filtre passif d'atténuation linéaire de 15 dB. L'intérêt théorique du filtre passif d'atténuation linéaire est de ne pas perturber la perception fréquentielle de l'environnement sonore. L'emploi de silicone souple est en général optimal pour les aspects confort, la contre partie est une fragilité à l'usage et un entretien délicat à cause de la porosité. L'expérimentation est effectuée au plus proche du protocole et en particulier :

- 15 participants, tous PN avec leur propre équipement de tête, entraînés au port de la protection auditive,
- Mesures effectuées pour 3 types de protection (bouchons, casque et double protection) dans un ordre croisé,
- Questionnaires renseignés par les 15 PN.

L'atténuation moyenne obtenue sur les 15 participants est conforme à la spécification du fabricant. La différence entre les mesures et les données du fabricant est au maximum de 3,5 dB et au minimum de 0,1 dB. L'écart type est plus grand de 1,5 dB à 6,4 dB selon les octaves entre les mesures et les données du fabricant. La dispersion inter-individuelle est trop importante (cf. figure 3).

Aucune courbe d'atténuation des bouchons n'est comprise entièrement dans l'étendue de  $\pm 1$  écart-type par rapport à l'atténuation spécifiée. 4 courbes sur 15 d'atténuation des bouchons sont comprises complètement dans l'étendue de  $\pm 2$  écarts-types par rapport à l'atténuation spécifiée. Cela représente seulement 27% des participants au lieu des 95% en théorie.

Les réponses des 15 PN aux questionnaires révèlent que :

- 13% des PN ne portent jamais leurs bouchons d'oreilles à cause de douleur insupportable dans le conduit auditif externe (CAE) au bout de 10 min,
- 27% des PN se plaignent d'une douleur assez importante au port des bouchons,
- 53% des PN considèrent pénible à impossible le port des bouchons à raison de 2 fois 3 heures par jour,
- 33% des PN estiment que le niveau sonore des alarmes n'est pas adapté,
- L'absence de kit d'entretien pour les bouchons est signalée à plusieurs reprises.

Certains PN se plaignent de ne plus entendre suffisamment leur radio ou leur alarme de bord. Ces opérateurs perdent aussi la possibilité de discriminer les communications au moyen du réglage des volumes sonores des radios. D'autres PN, au contraire sont gênés et fatigués (perte auditives temporaires) par le niveau élevé de la nuisance sonore du cockpit.

Après mise en relation des réponses et commentaires obtenus avec les mesures objectives pour chaque PN, la convergence est vérifiée entre performances acoustiques et perception de l'environnement. Les PN (S1 et S4) équipés de bouchons d'oreilles présentant une atténuation de près de 30 dB au lieu de 15 dB nominale sont ceux qui n'entendent plus la radio de bord et difficilement les alarmes. Les PN (S7 et S10) équipés de bouchons d'oreilles dont l'atténuation est presque nulle, sont ceux qui présentent une perte auditive temporaire.

La cause du rejet du port du bouchon est sans ambiguïté : douleur au niveau du CAE. Des essais complémentaires ont montré que même portés seuls les bouchons ne sont pas tolérés : la cause du rejet n'est donc pas la double protection mais bien le bouchon lui-même.

Sur un autre plan, l'absence de kit d'entretien peut entraîner un risque sur l'hygiène de l'oreille et sur les performances acoustiques attendues (filtre acoustique bouché).

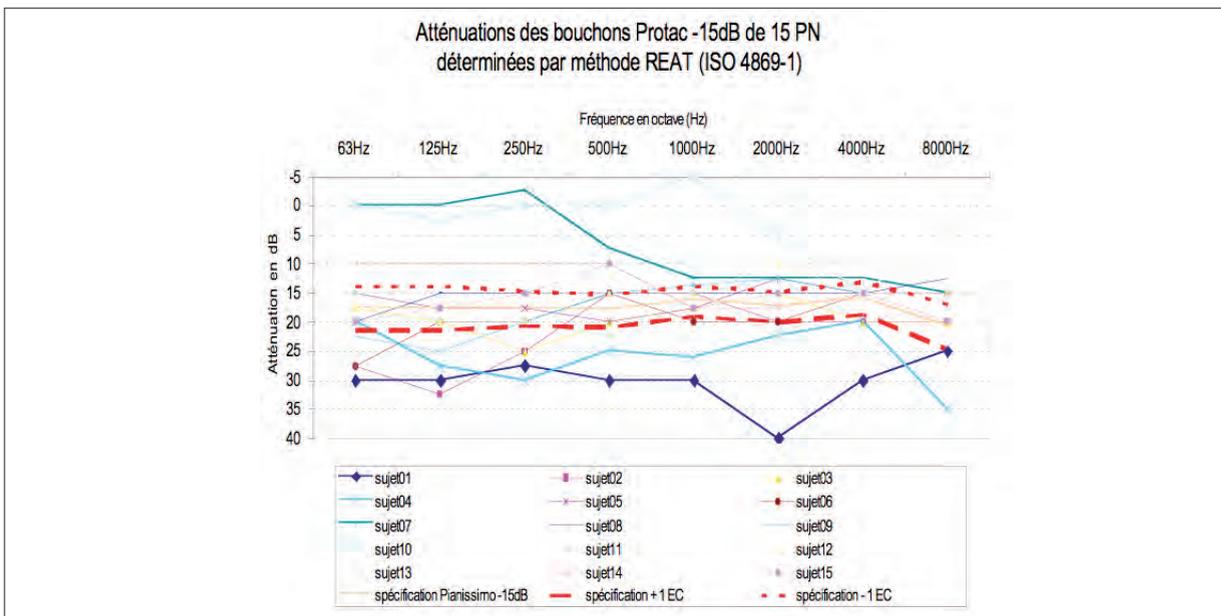


Fig. 3 : Atténuations des bouchons personnalisés en silicone de chaque PN, mesurées à l'IRBA  
*Individual attenuation characteristics of Protac-Pianissimo earplugs measured in 15 individuals, and manufacturer mean and standard deviation characteristics*

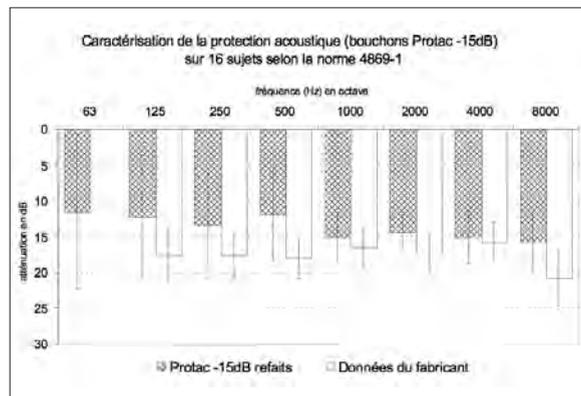
### Etude n°2 : bouchons d'oreilles personnalisés en silicone refaits

Suite au constat précédent, les bouchons sont refaits sur 16 participants non PN et sur 3 PN ayant participé à l'étude n°1. Les bouchons testés sont du même type que précédemment (Protac Pianissimo) et ils sont neufs. Par rapport au protocole initial, les particularités de l'expérimentation sont les suivantes :

- Les 16 participants sont «naïfs» au port de la protection auditive et aucun questionnaire n'est utilisé,
- Un entretien verbal est réalisé par les 3 PN communs à l'étude n°1.

L'atténuation des bouchons Protac (-15dB) reste en moyenne assez proche des spécifications du fabricant (cf. figure 4). A partir de l'octave 1 000Hz, les écarts-types mesurés sont proches de ceux du fabricant.

Les 3 PN déclarent que leurs nouveaux bouchons semblent mieux d'un point de vue acoustique (bonne atténuation, et perception correcte de la radio). Cependant, les 3 PN mentionnent que leurs nouveaux bouchons provoquent des douleurs et qu'en vol ils préfèrent remettre les anciens bouchons. Une mesure dimensionnelle comparative entre les 3 anciennes et les 3 nouvelles paires de bouchons d'oreilles montre que la partie correspondant au conduit auditif est plus longue sur la nouvelle paire de 3 mm environ.



**Fig. 4 : Comparaison des atténuations moyennes et écarts-types des bouchons Protac (-15dB) refaits**  
Mean attenuations measured in this study for improved Protac-Pianissimo earplugs, 16 participants, compared with the manufacturer-provided specifications. Error bars show +/-1 standard deviation

L'écart-type moyen de l'atténuation de cette nouvelle série de 16 paires de bouchons est inférieur de 1,5 dB par rapport à la série précédente mesurée sur les 15 PN. On peut supposer qu'il en est de même pour les nouveaux bouchons des 3 PN issus de la même série. Dans ce cas, les bouchons refaits montreraient une amélioration de performances acoustiques (réduction de l'écart-type) au détriment du confort (intolérance au port). En effet, 3mm de plus dans la partie profonde et sensible du CAE n'est pas indolore. Cela reste à prouver par des mesures objectives sur les 3 PN.

### Etude n°3 : bouchons d'oreilles en acrylique personnalisés

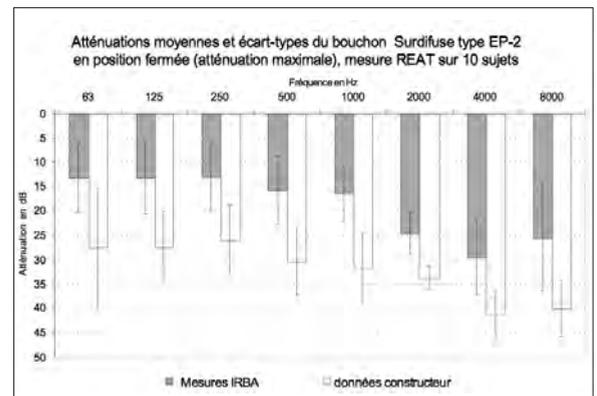
Une autre étude a été menée concernant le personnel aéronautique intervenant au sol à proximité d'avions de chasse. Les bouchons d'oreilles utilisés (marque Surdifuse type EP-2) sont moulés en acrylique et équipés d'une molette vissée (permettant de régler l'atténuation) et ont une vétusté en moyenne de 1,2 ans. L'intérêt de l'acrylique est que cette matière rigide est plus solide à l'usage et à l'entretien que le silicone, la contre partie est en théorie un confort moindre. Par rapport au protocole initial, seuls 10 personnels aéronautiques ont pu participer.

L'atténuation des bouchons Surdifuse EP-2 fermé, mesurée sur les 10 participants, est de l'ordre de 14 dB en dessous des spécifications du fabricant (cf. figure n°5). L'écart type est de l'ordre de 7 dB. Les écarts-types sont proches de ceux du fabricant exceptés pour les octaves 63Hz, 4 000Hz et 8 000Hz (5dB max. de différence). D'après les questionnaires :

- 30% du personnel portent rarement ou jamais leurs bouchons d'oreilles.
- 30% du personnel se plaignent d'une douleur assez importante au port des bouchons.
- 70% du personnel considèrent pénible à impossible le port des bouchons à raison de 2 fois 3 heures par jour.

Suite aux entretiens, les remarques suivantes sont exprimées :

- La tolérance est jugée meilleure avec les bouchons en mousse (non personnalisés),
- Les bouchons nécessitent un temps d'adaptation,
- Absence de produits de rechange pour l'entretien,
- La cordelette se détache du bouchon.



**Fig. 5 : Comparaison des atténuations du bouchon personnalisé en acrylique**  
Mean attenuations for individualized acrylic earplugs, 10 participants, compared with manufacturer specifications

La détérioration des performances acoustiques peut être liée à une étanchéité acoustique insuffisante induite par l'emploi d'une matière rigide comme l'acrylique. Une autre cause peut être le vieillissement du filtre du bouchon car l'observation montre des bouchons d'oreilles très usagés. La juxtaposition des données montre que les participants qui rejettent le port du bouchon ne sont pas ceux dont l'atténuation est quasi nulle.

La cause du rejet n'est pas dans ce cas liée à la performance insuffisante du bouchon. Ces mêmes opérateurs préfèrent le port de bouchons universels. L'observation du bouchon montre qu'il remplit toute la conque et que sa masse n'est pas négligeable. Un des motifs possible du rejet est donc le bouchon lui-même. Est-ce la forme ou la matière qui cause le rejet ? Cela reste à déterminer. Apparemment, la matière acrylique semble entraîner un taux de rejet plus important que le silicone (environ 30% contre 13%).

**Etude n°4 : bouchons d'oreilles en matière souple personnalisés avec contrôle qualité *in situ***

Une étude de bouchons d'oreilles personnalisés avec contrôle qualité est réalisée sur 20 participants non opérationnels et 4 PN. Ce bouchon de marque Sonomax présente les caractéristiques suivantes :

- Moulage réalisé en une seule fois et directement dans l'oreille (peu d'erreur de fabrication),
- Plusieurs filtres d'atténuations disponibles identifiés par une couleur et pouvant être changés sans réfection du bouchon,
- Test de qualité effectué immédiatement *in situ* (les bouchons défectueux sont détectés et refaits),
- Conception ergonomique pour la mise en place du bouchon (façon ¼ de tour auto-bloquant, faible disparité de l'insertion).

Plusieurs caractéristiques de ce type de bouchons semblent combler les défauts inhérents aux bouchons habituels (forte variabilité des performances acoustique, insertion aléatoire, inconfort).

Par rapport au protocole initial, les particularités de l'expérimentation sont les suivantes :

- Mesures de la protection acoustique du bouchon avec un filtre d'atténuation spécifique,

- 20 participants non opérationnels, 19 retenus,
- Bouchons neufs,
- Pas de questionnaires pour les 19 participants,
- Test ergonomique et de perception des alarmes et des communications en vol sur 4 PN pendant plusieurs vols, recueil sous forme d'entretien.

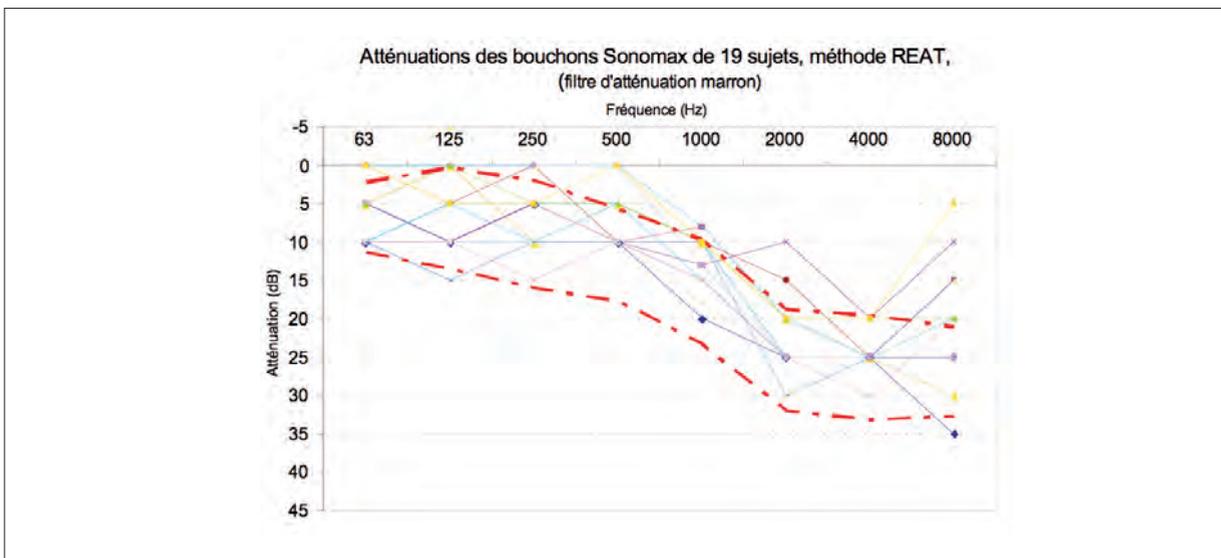
L'atténuation moyenne mesurée est d'environ 3 dB en dessous de la spécification du fabricant (0,7 dB à 6,3 dB de différence selon les octaves). Les écarts-types sont proches de ceux des valeurs du fabricant et ne dépassent pas en général 5 dB. Plusieurs courbes d'atténuation sont très proches mais seulement 2 sont rigoureusement dans l'étendue de  $\pm 1$  écart-type. Toutefois, les courbes suivent l'allure générale du gabarit du fabricant (cf. figure 6).

D'après les essais en vol des bouchons testés par 4 PN, les constats sont les suivants :

- Les bouchons atténuent trop les communications et les alarmes,
- Le port des bouchons n'est pas toléré en vol par les 4 PN (douleur et port insoutenable au-delà de 2h).

Le test qualité a permis de réduire les dispersions en atténuation habituellement observés (écart type d'environ 5 dB contre 7 à 9 dB).

Concernant le problème de perception de la phonie, une explication est le spectre du bruit cockpit qui comporte beaucoup d'énergie en basses fréquences, alors qu'à ces mêmes fréquences l'atténuation du bouchon et du casque est faible (5 dB). Par conséquent, l'énergie acoustique est peu atténuée et des phénomènes de masquage induits par le bruit aux basses fréquences peuvent apparaître réduisant l'audibilité de la communication ainsi que l'intelligibilité [11].



**Fig. 6 : Comparaison des atténuations du bouchon Sonomax de chaque participant avec la spécification  $\pm 2$  écarts-types du fabricant (courbes pointillées)**  
**Individual attenuations for the Sonomax earplugs, 19 participants. The dash-dot lines correspond to the lower and upper bounds of  $\pm 2$  standard deviation for the manufacturer-provided specifications**

Le rejet de port du bouchon est de 100% de la part des 4 PN. Nous avons comparés les bouchons testés (Sonomax) avec ceux utilisés habituellement (Protac). La comparaison montre que la longueur de la partie du bouchon correspondant au CAE est plus longue de 2 mm environ. L'objet du rejet est lié aux problèmes de perception de la phonie et vraisemblablement aussi à l'intolérance du port en partie due à une emprise trop profonde du bouchon et à l'appui de la coquille de l'écouteur sur le bouchon. Le volume de la coquille du casque est un paramètre important à examiner dans l'ajout de bouchons d'oreilles afin d'éviter tous points de contact.

### Etude n°5 : bouchons d'oreilles CEP

Étant donné les problèmes rencontrés avec des bouchons personnalisés et notamment vis-à-vis de l'écoute de la radio de bord, le bouchon CEP à base de bouchon universel est une solution à évaluer déjà employée dans plusieurs forces aériennes de l'OTAN. Le bouchon employé est de type miniCEP avec un bouchon universel en mousse. Par rapport au protocole initial, les particularités de l'expérimentation sont les suivantes :

- 16 participants non opérationnels, pas de questionnaires
- Bouchons en mousse CEP neufs,
- Mesures sur 12 PN et questionnaires renseignés.

Les résultats de mesure des 16 participants sont similaires à ceux des 12 PN. Les atténuations sont inférieures d'environ 4 dB à celles des données du fabricant. Les différences varient de 0 à 9 dB selon les octaves. L'écart type de l'atténuation des bouchons mini CEP est de l'ordre de 7,5 dB (cf. figure 7). Les écarts types mesurés sont assez proches de ceux des données du fabricant (différences de moins de 1 dB à 3 dB selon les octaves). L'ensemble des courbes d'atténuation est homogène excepté deux courbes d'entre elles. L'atténuation est au minimum de 15 dB. Cinq courbes sont rigoureusement comprises dans l'étendue de  $\pm 2$  écart-type. Cela correspond à 31% des participants.

Sur les 12 PN, seulement 5 utilisent des bouchons CEP. Cette protection complémentaire est ajoutée principalement pour les longs vols (supérieurs à 1 heure) et lors d'exercice de tir en vol. Le taux de rejet au port du bouchon CEP est élevé (plus de 30%) mais est à relativiser avec le peu de données et le peu d'utilisation. Les communications radio sont jugées excellentes avec ce type de bouchons. Le port du CEP pendant 1h30 ne provoque pas de gêne mais cette durée n'est pas dépassée.

L'écart type de l'atténuation des bouchons mini CEP est de l'ordre de 7,5 dB soit 2 dB de moins que celui de bouchons personnalisés comme le Protac -15 dB. Cet équipement à base de bouchon universel présente le meilleur score de conformité (31%) par rapport aux données du fabricant (étendue de  $\pm 2$  écart-types). L'acceptabilité de ce bouchon est très contrastée. Les appréciations favorables recueillies sur ce bouchon CEP sont dues au fait que les PN disposent de deux tailles de bouchons favorisant une insertion confortable. Ceux qui refusent de l'utiliser, n'en éprouvent pas le besoin car l'hélicoptère employé est issu d'une gamme civile et est moins bruyant que celui de la gamme militaire.

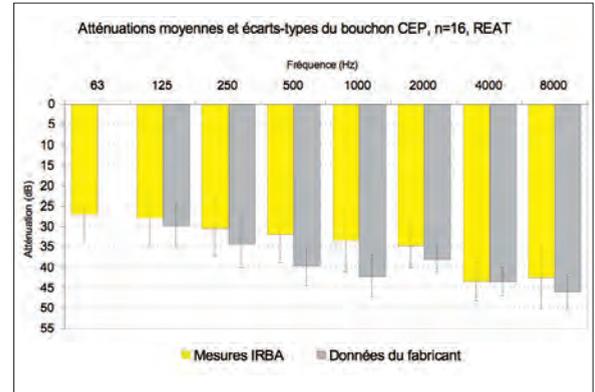


Fig. 7 : Comparaison des atténuations moyennes et des écarts-types des bouchons CEP  
Mean attenuations for the CEP earplugs, 16 participants, compared to manufacturer data. Error bars indicate  $\pm 1$  standard deviation

### Conclusion et perspectives

Les bouchons d'oreilles évalués sont un compromis pouvant être jugé insatisfaisant au regard des présentes études. Ils sont pourtant indispensables (en l'absence d'un nouvel équipement de tête) afin de préserver l'audition d'un maximum d'opérateurs. Actuellement, le bouchon d'oreille doit rester si possible un palliatif à court terme pour les opérateurs en attendant une amélioration acoustique de l'équipement de tête.

Les performances acoustiques mesurées sur les opérateurs sont en générales inférieures à celles du fabricant conformément à la littérature [12 à 15]. En général, les protections moulées seraient mieux tolérées et les bouchons universels susciteraient peu d'adhésion. Mais en réalité, les résultats sont très contrastés selon le type d'aéronef, d'activité, voire même de groupe. La problématique de la tolérance au port des bouchons est importante à prendre en compte [16]. Ces études ont montré que l'intolérance au port du bouchon est liée à la longueur de l'emprise du bouchon dans le CAE. Par ailleurs, la surprotection causée par des bouchons non conformes en atténuation peut gêner la perception des informations auditives nécessaire à la sécurité des vols.

La qualité de fabrication des bouchons d'oreilles est un facteur prépondérant pour la protection auditive. Depuis récemment, plusieurs fabricants (Howard Leight, Phonak, CeoTronics) proposent des bouchons d'oreilles avec un contrôle qualité *in situ*. Cette technique devrait permettre de réduire les dispersions importantes de fabrication et de garantir les performances acoustiques attendues.

Les futures conceptions de bouchons personnalisés sont basées sur un scanner 3D de l'oreille externe qui permettra une optimisation et une automatisation de la confection du bouchon sans intervention manuelle. Ceci devrait réduire la part inévitable de la variabilité et de l'erreur humaine à la confection. De nouveaux types de bouchons actifs et multifonction sont en cours de développement. Ces dispositifs font naître de nouveaux défis en termes de mesure des performances et de compréhension des mécanismes d'intégration associés.

## Remerciements

Les auteurs remercient grandement les participants de leur patience et de leur bonne volonté, appréciées au cours de ces longues expérimentations.

## Références bibliographiques

- [1] Michiels, F. « Affections d'origine professionnelle des organes des sens » Documents pour le Médecin du Travail, (112), pp. 543-546 (2007)
- [2] Avan, P., Campo, P., Lataye, R., & Dancer, A. « Gêne et risques encourus selon les différentes ambiances au travail » Acoustique & Technique, (12), pp. 6-12 (1998)
- [3] NATO. "Hearing Protection –Needs, Technologies and Performance", RTO-TR-HFM-147, RTO Technical Report, AC/323(HFM-147)TP/337. Neuilly sur Seine, France: North Atlantic Treaty Organisation (2010)
- [4] Baudou, J., Reynaud, G., Poussin, G., & Leger, A. « Double protection passive pour les équipages de l'hélicoptère d'attaque "Tigre" : concept et étude expérimentale ». In Nouvelles orientations pour l'amélioration des techniques audio (p. 17-1 – 17-14). Compte rendu de réunion RTO-MP-HFM-123, Communication 17. Neuilly-sur-Seine, France : RTO (2005)
- [5] Association Française de Normalisation (AFNOR). « ISO 1999:1990 – Détermination de l'exposition au bruit en milieu professionnel et estimation du dommage auditif induit par le bruit », Bruxelles : Comité Européen de Normalisation (1999)
- [6] Journal Officiel de la République Française, « Décret n°2006-892 du 19 juillet 2006 relatif aux prescriptions de sécurité et de santé applicables en cas d'exposition des travailleurs aux risques dus au bruit et modifiant le code du travail » (2006)
- [7] Job, A., Raynal, M., & Kossowski, M. "Suceptibility to Tinnitus Revealed at 2 kHz Range by Bilateral Lower DPOAEs in Normal Hearing Subjects with Noise Exposure". Audiology & Neurotology, 12(3), pp.137-144 (2007)
- [8] Association Française de Normalisation (AFNOR) « NF en ISO 4869-2, Protecteurs individuels contre le bruit, Partie 2 : Estimation des niveaux de pression acoustique pondérés A en cas d'utilisation de protecteurs individuels contre le bruit », Bruxelles : Comité Européen de Normalisation (1995)
- [9] Sarafian, D. « Ergonomie et performances acoustiques de bouchons d'oreilles en aéronautique militaire » Mémoire du Diplôme Universitaire en bases facteurs humains pour la conception des systèmes homme-machine en aéronautique, Université Paris-Descartes (2011)
- [10] Bjorn, V.S., Albery, C.B., Shilling, R., & McKinley, R.L. "U.S. Navy Flight Deck Hearing Protection Use Trends: Survey Results" In New Directions for Improving Audio Effectiveness (pp. 1-1 – 1-20). Meeting Proceedings RTO-MP-HFM-123, Paper 1. Neuilly-sur-Seine, France : RTO (2005)
- [11] Pellieux, L., & Sarafian, D. « Intérêt en aéronautique militaire de la double protection acoustique passive, pour l'intelligibilité de la parole dans le bruit. Etude préliminaire » Rapport technique n° 97-21. Brétigny sur Orge, France : Institut de Médecine Aérospatiale du Service de Santé des Armées (1997)
- [12] Alberti, P.W., Riko, K., Abel, S.M., & Kristensen, R. "The effectiveness of hearing protectors in practice". Journal of Otolaryngol 8(4), pp. 354-359 (1979)
- [13] Kusy, A. « Evaluation de l'affaiblissement acoustique réel des bouchons moulés individualisés » Hygiène et sécurité du travail, (220), pp. 35-42 (2010)
- [14] Casali, J.G., & Park, M.Y. "Attenuation performance of four hearing protectors under dynamic movements and different user fitting conditions" Human Factors, 32(1), pp. 9-25 (1990)
- [15] Berger, E., Royster, E., Royster, J., Driscoll, D., & Layne, M. "The Noise Manual", American Industrial Hygiene Association (AIHA) Press (2000)
- [16] Arezes, P.M., & Miguel, A.S. "Hearing Protectors Acceptability in Noisy Environments" The Annals of Occupational Hygiene, 46(6), pp. 531-536 (2002)

