#### Elliot H. Berger

E.A.R/Aearo Technologies E.A.RCALSM Laboratory 7911 Zionsville Road Indianapolis IN 46268-1657 USA Tél. : +1 317 692 6666 E-mail : eberger@compuserve.com

#### **Pascal Hamery**

Institut franco-allemand de recherches de Saint Louis (ISL) 5, rue du général Cassagnou 68301 Saint Louis Tél : 03 89 69 50 95 E-mail: hamery@isl.tm.fr

### Résumé

La réalisation de bouchons d'oreille passifs permettant une atténuation modérée aux faibles niveaux de bruit tout en protégeant contre les bruits de très forts niveaux a été un objectif des derniers développements de protecteurs auditifs (PAs). Ceci a soulevé la question non seulement de savoir comment réaliser de tels systèmes mais aussi de savoir comment les évaluer. Une autre question se pose alors également : les PAs conventionnels ne sont-ils pas aussi dépendants du niveau de bruit ? Une atténuation dépendante du niveau de bruit est réalisée via un petit orifice qui oblige les sons transmis à décroître quand le niveau augmente. Nous avons utilisé une source de bruits impulsionnels (explosifs) dont les niveaux de crête varient entre 110 dB et 190 dB SPL afin de mesurer les coefficients de perte d'insertion (IL=Insertion Loss) de différents bouchons disponibles dans le commerce. Les essais ont été réalisés en incidence normale au-dessus d'une surface plane réfléchissante en extérieur à l'aide de la tête artificielle de l'Institut franco-allemand de recherches de Saint Louis (ISL) spécialement conçue pour la mesure de l'atténuation de protecteurs auditifs. Les mousses conventionnelles et les bouchons prémoulés présentent des atténuations essentiellement constantes avec le niveau de bruit alors que le meilleur bouchon d'oreille à atténuation dépendant du niveau de bruit présente une atténuation augmentant d'environ 25 dB sur la dynamique de 80 dB des niveaux du test impulsionnel. Cette dernière réalisation a été utilisée avec succès depuis 2000 dans le Combat Arms® Plug en dotation dans l'armée américaine.

#### Abstract

For several decades, hearing tests have been carried out in audiometric test rooms which must meet acoustical requirements set forth in standards. It is however generally accepted that acoustical environments in which individuals with hearing loss function daily seldom correspond to environments found in audiometric rooms. Constraints regarding the sound attenuation by room walls (i.e. costs) can thus be minimized with a more rigorous control over the sound field, thereby allowing to recreate more realistic environments of daily living. During the planning stage of the Research Unit on Noise and Communication at the University of Ottawa, the researchers opted for a versatile acoustic room with reversible panels (reflective or absorbing) that not only offers adequate sound attenuation by walls but also allows to recreate various typical environments (i.e. restaurants, living rooms, work environments, etc.). The characteristics of this versatile acoustic room, as well as an example describing its applications of use are presented.

est communément observé que l'usage correct et logique de protections auditives (PAs) avec une réduction adaptée du bruit peut empêcher l'apparition de véritables pertes auditives liées aux nuisances sonores. Cependant, un problème évident peut apparaître en présence d'une source de bruit impulsionnelle à laquelle le locuteur ne s'attend pas et qui ne porte pas de protection auditive. Une amélioration utile, spécialement dans le milieu militaire, est un protecteur auditif qui protège suffisamment contre les explosions inattendues et qui peut néanmoins être porté en permanence pour prévenir d'un possible danger pour l'audition sans empêcher la perception de son environnement sonore et assurer ainsi sa capacité opérationnelle (en langage militaire). Il est possible de concevoir un

produit électronique avec un tel système constitué d'une aide auditive pour les faibles niveaux de bruit avec une atténuation par filtrage des niveaux sonores plus élevés. Une tout autre approche consiste à concevoir un protecteur entièrement passif, avec peut-être des parties mobiles, mais sans besoin d'apport d'énergie pour protéger contre les bruits inattendus ou les ondes de choc.

Dans les années 1960, le concept d'orifices «dépendants du niveau» (souvent appelés « non-linéaires ») au sein d'un bouchon d'oreille ou d'un casque antibruit a été exploré [1,2]. Un des précurseurs d'une telle idée, Clay Allen, a développé ce concept pour un bouchon d'oreille, examiné par la suite par Forrest [3], et commercialisé sous le nom de Gunfender par la société Racal Safety. D'autres réalisations passives sont apparues au cours des années suivantes comme la valve bien connue « Lee Sonic Ear Valvs » (qui est devenue « North Sonic Ear Valvs<sup>®</sup> » en différentes versions) et le filtre « Aural Technology Protectear<sup>™</sup> » plus connu récemment sous le nom de « Hocks Noise Braker ». Dans les années 1990, à l'Institut franco-allemand de recherches de Saint Louis (ISL), un travail a commencé sur l'étude du comportement d'orifices non-linéaires. Cette étude a conduit à un filtre optimisé spécialement pour les bruits d'armes. Il a été inséré dans le bouchon d'oreille « Combat Arms Earplug » et dans d'autres versions détaillées plus loin dans cet article.

Différents systèmes contenant des valves ont été employés ces dernières années et plus récemment des diaphragmes qui sont censés réagir à des sons de très fort niveau, procurant ainsi, par obturation, une augmentation de la protection. Bien que ces réalisations semblent procurer une mesure de la dépendance au niveau de bruit, aucune donnée concernant ces systèmes n'est disponible dans la littérature qui suggère qu'une valve bouge suffisamment pour obturer efficacement un orifice. Le système « Protectear/Noise Braker » est un tube présentant une discontinuité de sections qui a la prétention d'utiliser le « principe de la décroissance accélérée de la résonance » qui empêcherait les sons de plus de 80 dB de passer à travers ce filtre [4]. Une revendication aussi extravagante n'a jamais été proprement documentée et est en désaccord avec les explications théoriques classiques de la dépendance au niveau de bruit due à la non-linéarité de petits orifices [5,6].

Malgré un grand intérêt pour les bouchons d'oreille passifs à atténuation dépendant du niveau de bruit et de fortes revendications faites par certains fabricants concernant leurs performances, peu de données sont disponibles dans la littérature. Ceci est probablement dû en partie à la difficulté de mesurer les performances de ces produits pour les forts niveaux de bruit. Une ancienne étude utilisant des cadavres comme système de tests acoustigues. dans le but de réaliser des mesures objectives, a démontré la dépendance du niveau pour l'atténuation apportée par les produits Gunfender et Lee Sonic [7]. Les résultats de plusieurs études utilisant des sujets humains exposés à des tirs d'armes et des explosions ont également été reportées dans la littérature et démontrent la capacité à protéger de bouchons d'oreille et casques perforés supposés dépendant du niveau de bruit pour de telles sources sonores [8-10]. Cependant, nous ne connaissons aucune étude ayant examiné et analysé l'atténuation mesurée avec une grande variété de protecteurs auditifs prétendus dépendant du niveau de bruit pour des niveaux de bruits atteignant 190 dBP SPL, et cela justifie le besoin de cette étude.

## Atténuation passive dépendante du niveau – Éléments théoriques

La dépendance au niveau de bruit dans les protecteurs auditifs passifs peut se traduire, soit par une augmentation, soit par une diminution de l'atténuation avec l'augmentation du niveau. Il est clair que la première solution est préférable, mais la seconde peut être observée quand, par exemple, une explosion est suffisamment intense pour que le mouvement induit dans le bouchon ou le serre-tête provoque une fuite acoustique momentanée ou permanente. D'un autre côté, il a été démontré théoriquement et empiriquement qu'un protecteur auditif avec des petits orifices permet d'augmenter l'atténuation.

L'atténuation d'un petit orifice peut être comparée à un élément résistif qui est le rapport de la pression acoustique à la vitesse particulaire au sein de l'orifice. Aux faibles niveaux de bruit, un écoulement laminaire prédomine et la pression aux bornes de l'orifice est liée linéairement à la vitesse particulaire. Par contre, à des niveaux d'excitation suffisamment forts des processus turbulents entrent en jeu et des anneaux tourbillonnaires (*vortex ring*) sont générés à la sortie de l'orifice. Dans ce cas, la pression acoustique devient proportionnelle au carré de la vitesse particulaire ce qui se traduit par une augmentation de l'impédance acoustique de l'orifice et donc par une augmentation de l'atténuation. Une analyse détaillée peut se trouver dans [6].

Ce qui peut paraître exceptionnel, c'est le fait que, dans de telles réalisations, la dépendance au niveau de bruit est due à un orifice qui, aux faibles niveaux au-dessous desquels sa sensibilité à l'amplitude devient apparente, est en réalité une fuite acoustique qui dégrade l'atténuation basique apportée par le protecteur.

Ainsi, l'augmentation d'atténuation liée à la dépendance au niveau de bruit ne peut pas augmenter l'atténuation audessus de celle du protecteur passif pour lequel on aurait bouché l'orifice, mais sert plutôt à diminuer la perte d'atténuation due à l'orifice aux faibles niveaux de bruits. La dépendance au niveau de bruit ne devient apparente que lorsque le niveau sonore augmente au-dessus d'un niveau à partir duquel la turbulence se manifeste.

Le plus efficace des systèmes passifs avec un orifice montre une apparition de la dépendance au niveau de bruit autour de 110 à 115 dB SPL (niveau crête d'une impulsion)[6]. Une fois que la dépendance au niveau de bruit est initiée, le taux maximal théorique d'augmentation est de 0,5 dB par augmentation de 1 dB du niveau de bruit au-dessus du niveau de transition critique.

# Méthodes de mesure

Afin de référencer l'atténuation des différents protecteurs auditifs à atténuation dépendante du bruit, ils ont été évalués par le premier auteur avec la méthode standardisée de la mesure au seuil de l'atténuation dans une oreille réelle (REAT : Real Ear At Threshold). Comme ces mesures sont effectuées à des niveaux relativement bas, entre 40 et 50 dB, correspondant aux niveaux de seuil auditif de sujets entendant parfaitement, ces données représentent l'atténuation à faible amplitude des protecteurs étudiés, bien en dessous de la région de transition [11].

Les différentes méthodes utilisées pour la mesure de la dépendance au niveau de bruit sont faites soit à partir d'un microphone intégré dans l'oreille réelle (MIRE : Microphone In Real Ear) soit à partir d'un système de test acoustique artificiel (ATF) du type tête artificielle. L'ATF utilisé pour cette étude a été implémenté par le second auteur [11].

Les deux méthodes de mesure REAT et ATF sont décrites en détail ci-dessous.

## Mesures du seuil auditif sur oreille réelle (REAT)

Les mesures REAT ont été réalisées dans les laboratoires E.A.RCALSM de la société AEARO Technologies en respectant la norme ANSI S12.6-1997 (R2002) [12]. Suivant le protecteur, le nombre de sujets et de mesures par sujet était soit 10x3 ou 5x2 alors que la norme S12.6 préconise 20x2. La méthode exacte de positionnement du bouchon d'oreille varie légèrement de celle décrite dans la norme, bien qu'elle soit très proche de la méthode A de la norme.

Le but est d'être sûr que les protecteurs sont bien ajustés, de façon à ce que les fuites contrôlant l'atténuation et contribuant à la dépendance du niveau de bruit soient celles qui sont souhaitées et non pas des fuites liées à une mauvaise position du bouchon.

### Mesures sur tête artificielle (ATF)

La tête artificielle utilisée a été conçue et réalisée par l'ISL [13]. Les tests ont été réalisés en extérieur au-dessus d'une surface réfléchissante avec des bruits impulsionnels créés par un fusil pour le niveau le plus faible et pour les niveaux de plus en plus forts, par un détonateur et des relais d'explosif. Les spectres de bruits de ces sources sonores sont représentés sur la figure 1. Les ondes arrivaient sur la tête artificielle en incidence frontale (incidence rasante à la surface des microphones représentant le tympan derrière les bouchons).



Fig. 1 : Spectres des impulsions utilisées pour les tests Spectra of the impulses used for testing

Les niveaux de bruits ont été mesurés simultanément en dehors de l'oreille et au niveau du tympan artificiel. Ces enregistrements permettent de calculer les coefficients de réduction de bruit (*Noise Reduction : NR*) et de les convertir par la suite en coefficients de perte d'insertion (*Insertion Loss : IL*) en faisant usage de la fonction de transfert de l'oreille ouverte (*Transfert Function of Outer Ear : TFOE*) de la tête artificielle (*Artificial Test Fixture : ATF*). Les détails de la procédure expérimentale de l'ISL se trouvent dans la référence [6].

Un indicateur de la reproductibilité des données mesurées peut être observé sur la figure 2. Ces données regroupent des mesures effectuées lors de huit essais sur une période de deux ans avec quatre échantillons du bouchon non-linéaire «Combat Arms Earplug». Ce sont les données brutes des valeurs de perte d'insertion mesurées sur l'ATF sans les corrections décrites dans le paragraphe suivant. La dispersion des valeurs sur les huit essais est de 2-3 dB à chaque fréquence quel que soit le niveau de l'impulsion.



Fig. 2 : Reproductibilité des coefficients d'atténuations IL avec des échantillons du "Combat Arms Earplug" mesurés huit fois sur une période de deux ans

Repeatability of IL measurements on one sample "Combat Arms Earplug" measured 8 times over 2-yr. time fram

L'ATF utilisée permet de mesurer des valeurs de perte d'insertion sur une dynamique de 65 dB de 80Hz jusqu'à 10kHz, ce qui est plus grand que les limites de la conduction par voie osseuse (BC :bone conduction) ou par les tissus chez l'Homme. Ceci permet de ne mesurer que les bruits d'origine aérienne au travers du conduit auditif de l'ATF. D'un autre côté, ceci signifie que des valeurs trop grandes de coefficient de perte d'insertion peuvent être mesurées sur l'ATF en comparaison de celles obtenues sur des têtes humaines. C'est pourquoi les données ont été corrigées numériquement en supposant l'existence d'un chemin acoustique par conduction osseuse en parallèle avec le chemin acoustique à travers le protecteur. Ces corrections liées à la conduction osseuse sont issues des travaux de Berger et al [14]. Ces valeurs ont également été ajustées par l'amplitude de l'effet d'occlusion observé habituellement dans les tests REAT afin d'être le plus proche possible de mesures sur tête humaine. Ces corrections sont de 2 dB à 125 Hz et décroissent jusqu'à 0 dB à 250 Hz.

Des mesures avec des bruits continus de 85 dB(A) en salle réverbérante (champ quasi-diffus) ont été réalisées en parallèle des mesures en bruits impulsionnels afin de caractériser les performances des systèmes pour des niveaux en dessous de la région de transition.

## Les échantillons testés

Les bouchons d'oreille évalués dans cette étude sont représentés sur la figure 3 et la description des éléments dépendants du niveau dont ils sont constitués est reportée dans le tableau 1. Les caractéristiques liées à la dépendance du niveau de bruit pour le Combat Arms Earplug à deux faces sont les mêmes que celles de la version en simple face constituée d'un filtre ISL inséré dans le bouchon d'oreille prémoulé UltraFit® tout comme la version plus récente en simple face avec un sélecteur pour obturer manuellement le filtre.



Figure 3 : Bouchons d'oreille testés dans cette étude (description dans le tableau 1). Gunfender (vue avant et arrière), Combat Arms, Noise Braker, Ear Valvs, Sound Baffler, et Quiet Please (de gauche à droite, et de haut en bas)

> Earplugs tested in this study as described in Tableau 1 Gunfender (back and front view), Combat Arms, Noise Braker, Ear Valvs, Sound Baffler, and Quiet Please (left to right, top to bottom)

# Résultats

Le bouchon que nous avons étudié le plus complètement est le « Combat Arms Earplug » contenant le filtre ISL. Ce filtre constitué d'une petite cavité en matière plastique percée à chaque extrémité d'orifices de 0,3 mm de diamètre intérieur est inséré dans différentes versions du bouchon Ultrafit<sup>®</sup>, soit à double face (voir figure 3) soit dans sa version simple face originale. Nous commençons par présenter sur la figure 4 les résultats graphiques pour la version à double face.

La courbe discontinue représente le coefficient IL (corrigé : BC et effet d'occlusion) pour une ambiance de bruit rose à 85 dB(A) et est comparée aux coefficients IL mesurés pour cinq niveaux d'impulsion dont les valeurs crêtes vont de 110 à 190 dB peak SPL. On note les allures très proches l'une de l'autre des courbes IL pour un bruit rose et pour une impulsion de 110 dB (les deux mesures sont réalisées sur le même ATF). On observe donc le même degré d'atténuation que l'excitation soit d'origine continue ou impulsionnelle tant que le niveau ne dépasse pas un certain seuil. Les coefficients d'atténuation IL augmentent considérablement quand le niveau crête de l'impulsion dépasse 110 dB. Les courbes REAT (mesures sur sujets humains) sont reportées sur la figure 4. Idéalement, la courbe REAT en position ouvert (*open*, signifiant que l'orifice dépendant du niveau de bruit est exposé au champ acoustique) serait superposée à celle obtenue avec un bruit rose de 80dB. La concordance est bonne à quelques dB prés excepté pour la bande de fréquence 2-4 kHz où les valeurs pour l'ATF peuvent être 7 dB plus grande. Cela peut être dû à la différence entre les sources sonores et aussi au fait que l'ATF ne représente pas exactement les performances de l'oreille humaine.

Les valeurs « REAT fermé » (*closed*) sont mesurées avec l'orifice en position obturée. Elles représentent le IL maximal que peut présenter un tel bouchon pour ces tests. Ainsi, l'atténuation dépendante du bruit avec l'orifice ouvert ne devrait pas dépasser ces valeurs jusqu'à ce que l'orifice se comporte comme s'il était fermé. Les données présentées sur la figure 4 confirment cette hypothèse exceptée pour la gamme de fréquence 2-4 kHz pour laquelle les performances de dépendance du niveau de bruit dépassent les valeurs attendues (mêmes explications qu'au paragraphe précédent).

Les courbes pour le Gunfender sont présentées sur la figure 5 (page suivante). C'est un design classique d'orifice dépendant du niveau et comme Allen et Berger[5] l'ont écrit, il est effectivement dépendant du niveau de bruit. Comme pour la figure 6 (page suivante), les valeurs enregistrées



Fig. 4 : Coefficient d'atténuation de perte d'insertion IL pour le bouchon "Combat Arms Earplug" sur une dynamique de 80 dB du niveau de crête de bruits impulsionnels et pour un bruit rose de 85 dB. Les courbes en noir représentent les mesures REAT avec l'orifice fermé (Closed) et ouvert (Open)

> IL for the Combat Arms Earplug over an 80 dB range in impulse sound levels and for steady 85 dB pink noise as compared to REAT measurements for the open and closed orifices

Bouchons d'oreille	Description des éléments dépendant du niveau
Amplivox Gunfender	Disque métallique avec un orifice de $\emptyset$ = 0,6 mm
E•A•R <sup>®</sup> Combat Arms Earplug	Filtre ISL avec un orifice de $\emptyset$ = 0,3 mm à chaque extrémité d'une cavité
Hocks Noise Braker <sup>®</sup> Earplugs	Tube discontinu de 5,5 mm ; $\emptyset$ = de 0,3 à 0,9 mm
North Sonic Ear Valvs <sup>®</sup> Earplugs	Diaphragme en caoutchouc entre des plaques métalliques
Silencio <sup>®</sup> Super Sound Baffler	Diaphragme en caoutchouc entre des plaques métallique et plastique
Tico Quiet Please	Métal fritté et filtre en tissus

Spécial « Audiologie » 56 Acoustique @Techniques n° 56

Tabl. 1 : Bouchons d'oreille testés dans cette étude



Acoustique 🕲 Techniques n° 56

écial « Audiologie





IL for the Gunfender earplug over an 80 dB range in impulse sound levels and for steady 85 dB pink noise as compared to REAT measurements for the open orifice

avec un bruitrose et celles avec un bruit impulsionnel de 110 dB sont très proches et cette fois les valeurs « REAT ouvert » sont raisonnablement en accord également.

Un dernier exemple est montré sur la figure 6 pour le bouchon d'oreille Noise Braker. C'est également un filtre avec orifice, mais cette fois un orifice tubulaire avec une discontinuité de section. Pour les hautes fréquences, il y a au moins 4 dB d'écart autour de 4 kHz entre les courbes obtenues avec le bruit rose et celles obtenues avec une impulsion de 110 dB mais la concordance est meilleure à 8kHz. Il y a également une divergence inexpliquée entre les mesures avec le bruit rose et les mesures REAT sur une grande plage de fréquences. Bien que le Noise Braker présente un comportement dépendant du niveau de bruit, il n'y a pas d'indication qui prouve les revendications du produit concernant une brutale augmentation de l'atténuation pour des niveaux de bruits autour de 80 dB.

Nous ne présentons pas ici tous les résultats obtenus mais chacun des protecteurs listés dans le tableau a fait l'objet de tests similaires. Les résultats pour tous les protecteurs sont résumés sous une autre forme sur la figure 7 où le coefficient de réduction de bruit global des impulsions est présenté en fonction du niveau de l'impulsion. Ces valeurs sont calculées comme le taux de réduction de bruit global (NRR : Noise Reduction Rating) utilisé aux USA avec un écart type de 4,0 dB sur toutes les fréquences, représentant la variabilité rencontrée lors d'évaluations REAT avec ce type de protecteurs.

Les données reportées sur la figure 7 indiquent que tous ces bouchons d'oreille supposés dépendants du niveau de bruit doivent être fournis avec des mesures de leur dépendance au niveau de bruit. Bien que la théorie suggère que le taux d'accroissement de l'atténuation est de 0,5 dB par dB d'augmentation du niveau, le meilleur taux en pratique est de 0,25 dB par dB comme on peut le voir sur la figure 7 avec la courbe en traits pointillés. Certains protecteurs, comme le Gunfender, présentent une augmentation uniforme sur toute la gamme, mais démarrent avec une atténuation initiale si faible en basse fréquence (voir figure 5) que la réduction de bruit globale est inférieure ou égale à 0 dB





IL for the Noise Braker earplug over an 80 dB range in impulse sound levels and for steady 85 dB pink noise as compared to REAT measurements for the open orifice

tant que le niveau de l'impulsion n'a pas atteint 150 dB. Le Combat Arms Earplug présente une augmentation uniforme sur toute la gamme de mesure avec une dépendance au niveau apparaissant autour de 110 dB.

Dans le but de tester le système de mesure et de vérifier si toutes les sortes de bouchons ont un comportement non linéaire et ont les moyens de protéger à tous les niveaux de bruits intenses, un certain nombre d'essais a été mené sur des bouchons supposés procurer une atténuation dépendant du niveau de bruit. Le résultat d'un tel test est présenté sur la figure 8 pour le Combat Arms Earplug ouvert (open) et fermé (sealed shut). Bien qu'une dépendance au niveau de bruit soit apparente dans la position fermée, elle est considérablement inférieure à celle dans la position ouverte, et comme on peut le voir sur la figure 4, le maximum d'atténuation de l'orifice ouvert aux plus forts niveaux est équivalent à la version fermée du protecteur.



Fig. 7 : Réduction de bruit globale (calculée comme le taux de réduction de bruit global -NRR : Noise Reduction Rating- mais en supposant un écart type de 4 dB sur toutes les fréquences) en fonction du niveau de bruit crête SPL, pour six bouchons d'oreille dependants du niveau de bruit et comparé à une augmentation uniforme de 0,25 dB par dB d'augmentation du niveau crête.

> Overall noise reduction (computed like the Noise Reduction Rating, but using an assumed standard deviation of 4,0 dB at all frequencies) as a function of peak SPL, for six level dependent earplugs as compared to a uniform increase of 0,25 dB per dB increase in SPL.



Fig. 8 : Réduction de bruit globale en fonction du niveau crête SPL pour un protecteur dépendant du niveau de bruit dont l'orifice est ouvert (open) ou fermé (sealed shut)

Overall noise reduction as a function of peak SPL for an orifice-type level-dependent earplug with the orifice open or sealed shut

Des tests supplémentaires avec un bouchon prémoulé et un bouchon en mousse ont aussi été conduits. Les données ne sont pas reportées ici mais il a été observé que ces systèmes présentent des coefficients de perte d'insertion IL fortement indépendants du niveau de bruit avec des changements faibles et marginaux (environ 5 dB) pour l'atténuation mesurée à certaines fréquences sur une large gamme de niveaux sonores. Ce type de performance est attendu pour un protecteur non perforé jusqu'à ce que le niveau sonore ou l'exposition au blast soit suffisant pour détériorer l'étanchéité du produit.

# Conclusion

Un ensemble de protecteurs supposés dépendants du niveau de bruit ou intentionnellement dépendants du niveau de bruit ont été évalués. Différents protocoles de mesures ont été utilisés : le REAT pour déterminer l'atténuation des protecteurs aux faibles bruits dans l'oreille humaine, et une méthode utilisant une tête artificielle (ATF) permettant la mesure objective avec des bruits roses modérément forts (85 dB) et la mesure objective de bruits impulsionnels de 110 à 190 dB SPL. Tous les systèmes qui ont été créés pour être dépendants du niveau de bruit incluent un orifice ou un assemblage de valves et présentent tous un comportement non linéaire au regard de la variation de niveau de bruit. Le plus efficace, le Combat Arms Earplug, procure une augmentation de 19 dB de l'atténuation en réduction globale (25 dB pour les niveaux crêtes) sur une dynamique de 80 dB des niveaux de bruits testés. De telles réalisations ont montré au travers d'études réalisées sur l'Homme qu'il était possible d'améliorer la vigilance par rapport à un protecteur standard tout en procurant une protection suffisante pour les bruits d'armes [8,10].

Au contraire, des bouchons prémoulés ou en mousse dépourvus d'orifice ont également été évalués et ont montré une atténuation indépendante du niveau de bruit. Cela a également été illustré avec un bouchon dépendant du niveau de bruit évalué avec son orifice ouvert et fermé.

Le comportement de la dépendance au niveau de bruit a été observé mais cette dépendance n'est pas aussi marquée que ce qui a été revendiqué pour certaines valves passives ou bouchons constitués d'orifice et pour lesquels il était annoncé un changement brutal de l'atténuation quand le niveau passait un certain seuil bien inférieur à 100 dB. En fait, le plus efficace des protecteurs dépendant du niveau de bruit ne présente une sensibilité à l'amplitude qu'à partir d'un niveau sonore supérieur ou égal à 110 dB. Ainsi, ce type de bouchon n'est adapté qu'à la protection contre les bruits impulsionnels puisque, pour des niveaux de bruits continus atteignant 110 dB, l'atténuation procurée n'est pas suffisante pour la protection auditive.

# **Références bibliographiques**

 C. H. Allen, "Investigation of the performance and deterioration of acoustical absorbing materials under the influence of intense sound fields," BBN Report No. 792, Bolt, Beranek and Newman, Cambridge, MA, (1960)

[2] U. Ingard and H. Ising, "Acoustic nonlinearity of an orifice," J. Acoust. Soc. Am., 42(1), 6-17 (1967)

[3] M. R. Forrest, "Laboratory development of an amplitude-sensitive ear plug," Royal Naval Personnel Res. Committee, Rept. HeS 133, Med. Res. Council, London, England (1969)

[4] EarPro™ by Surefire® earplug data sheet at www.earprocom.com, downloaded 2008, data referenced to the Noise Braker earplug and a study by Jack Vernon.

[5] C. H. Allen and E. H. Berger, Development of a unique passive hearing protector with level-dependent and flat attenuation characteristics," Noise Control Eng. J. 34(3), 97-105 (1990)

[6] P. Hamery, A. Dancer, and G. Evrard, "Study and production of nonlinear perforated earplugs (in French)," ISL R 128/97, Saint-Louis, France (1997)

[7] M. R. Forrest and R. R. A. Coles, "Use of cadaver ears in the acoustic evaluation of ear plugs," Royal Naval Personnel Res. Com., Rept. HeS 134, Med. Res. Council, London, England (1969)

[8] A. Dancer, P. Grateau, A, Cabanis, G. Barnabe, G Cagnin, T. Vaillant, and D. Lafont, "Effectiveness of earplugs in high-intensity impulse noise," J. Acoust. Soc. Am. 91(3), 1677-1689 (1992)

[9] J. H. Patterson Jr., B. T. Mozo, and D. L. Johnson, "Actual effectiveness of hearing protection in high level impulse noise," in Noise & Man '93 – Proceedings of the 6th. Int. Congr., Noise as a Public Health Problem, Vo. 3, 122-127 (1993)

[10] P. Hamery, A. Dancer, E. H. Berger, "Amplitude-sensitive attenuating earplugs," Conference/Workshop on the Effects of high intensity continuous and impulse/blast noise on humans, Moab, UT (2008)

 $\left[ 11\right]$  E. H. Berger, "Preferred methods for measuring hearing protector attenuation," in Proceedings of Inter-Noise 05, p. 58 (2005)

[12] ANSI, "Methods for measuring the real-ear attenuation of hearing protectors," Am. Natl. Stds. Inst., S12.6-1997(R2002), New York, NY (1997)

[13] G. Parmentier, A. Dancer, K. Buck, G. Kronenberger, and C Beck, "Artificial head (ATF) for evaluation of hearing protectors," Acta Acoustica86(5), 847-852 (2000)

[14] E. H. Berger, R. W. Kieper, and D. Gauger, "Hearing protection: surpassing the limits to attenuation imposed by the bone-conduction pathways, J. Acoust. Soc. Am. 114(4), 1955-1967 (2003)

[15] E. H. Berger, "Hearing protection devices," in The Noise Manual, 5th Edition, edited by E. H. Berger, L. H. Royster, J. D. Royster, D. P. Driscoll, and M. Layne, Am. Ind. Hyg. Assoc., Fairfax, VA 379-454