

Double protection passive pour les équipages de l'hélicoptère d'attaque "Tigre" : concept et étude expérimentale

J. Baudou ; joel.baudou@fr.thalesgroup.com

G. Reynaud ; gerard.reynaud@fr.thalesgroup.com

G. Poussin ; gilles.poussin@fr.thalesgroup.com

A. Leger ; alain.leger@fr.thalesgroup.com

THALES Aerospace
Rue Toussaint Catros
33187 Le Haillan
FRANCE

RESUME

Les coques des écouteurs du casque Topowl ont déjà fait l'objet d'une étude visant à optimiser leur protection auditive dans les stricts budgets de masse et de volume impartis. La présente démarche consistait donc à sélectionner puis évaluer des solutions permettant d'améliorer sensiblement cette protection face aux niveaux de bruit plus élevés que prévu relevés en cockpit. Par sa simplicité de mise en œuvre, sans impact sur le casque, son faible coût et son efficacité d'atténuation propre, la protection complémentaire offerte par les bouchons d'oreille passifs s'est naturellement imposée comme axe de travail.

Préalablement évalués de façon empirique, des bouchons de type " mousses Quies " ont été sélectionnés pour leur port confortable et leur forte atténuation dès les basses fréquences. Les mesures, réalisées par test audiométrique (méthode REAT), ont effectivement démontré une atténuation globale très importante sur l'ensemble du spectre. Malheureusement les essais en vol effectués ont immédiatement révélé de multiples défauts dont certains étaient rédhibitoires d'un point de vue opérationnel : dégradation de l'intelligibilité des communications, non perception d'alarmes critiques, sensation d'occlusion. des bouchons personnalisés ont alors été évalués en laboratoire mais leur atténuation dans la bande audiophonique était encore trop importante pour tenter de nouveaux essais en vol avec des perspectives de succès.

En revanche, des bouchons personnalisés à atténuation linéaire – i.e. approximativement constante sur l'ensemble du spectre – ont fourni des résultats remarquables. Les mesures montrent un couplage très satisfaisant avec le casque puisque la protection globale est significativement améliorée alors que la bande audiophonique est modérément atténuée. Suite aux essais en vol effectués avec différents modèles de casques et sur divers types d'hélicoptères, les impressions des neuf pilotes évaluateurs, y compris chez les plus réticents au port des bouchons, sont très favorables à l'utilisation de ce type de protection : préservation de la sécurité du vol par la réduction de la fatigue liée au bruit, amélioration de la qualité d'écoute et de l'intelligibilité globale par un meilleur filtrage des bruits parasites, ergonomie satisfaisante grâce à la personnalisation.

Sous réserve d'une sélection adéquate des bouchons d'oreille et de leur évaluation poussée, en couplage avec le casque, tant en laboratoire qu'en situations réelles, cette démarche montre donc l'intérêt de la double protection passive comme solution simple et efficace dans le cas où la protection d'origine ne peut être modifiée.

Baudou, J.; Reynaud, G.; Poussin, G.; Leger, A. (2005) Double protection passive pour les équipages de l'hélicoptère d'attaque "Tigre" : concept et étude expérimentale. Dans *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. Disponible sur le site : <http://www.rto.nato.int/abstracts.aps>.

Report Documentation Page

*Form Approved
OMB No. 0704-0188*

Public reporting burden for the collection of information is estimated to average 1 hour per response, including the time for reviewing instructions, searching existing data sources, gathering and maintaining the data needed, and completing and reviewing the collection of information. Send comments regarding this burden estimate or any other aspect of this collection of information, including suggestions for reducing this burden, to Washington Headquarters Services, Directorate for Information Operations and Reports, 1215 Jefferson Davis Highway, Suite 1204, Arlington VA 22202-4302. Respondents should be aware that notwithstanding any other provision of law, no person shall be subject to a penalty for failing to comply with a collection of information if it does not display a currently valid OMB control number.

1. REPORT DATE 01 APR 2005	2. REPORT TYPE N/A	3. DATES COVERED -	
4. TITLE AND SUBTITLE Double protection passive pour les équipages de lhélicoptère dattaque Tigre : concept et étude expérimentale		5a. CONTRACT NUMBER	
		5b. GRANT NUMBER	
		5c. PROGRAM ELEMENT NUMBER	
6. AUTHOR(S)		5d. PROJECT NUMBER	
		5e. TASK NUMBER	
		5f. WORK UNIT NUMBER	
7. PERFORMING ORGANIZATION NAME(S) AND ADDRESS(ES) THALES Aerospace Rue Toussaint Catros 33187 Le Haillan FRANCE		8. PERFORMING ORGANIZATION REPORT NUMBER	
9. SPONSORING/MONITORING AGENCY NAME(S) AND ADDRESS(ES)		10. SPONSOR/MONITOR'S ACRONYM(S)	
		11. SPONSOR/MONITOR'S REPORT NUMBER(S)	
12. DISTRIBUTION/AVAILABILITY STATEMENT Approved for public release, distribution unlimited			
13. SUPPLEMENTARY NOTES See also ADM001856, New Directions for Improving Audio Effectiveness (Nouvelles orientations pour l'amélioration des techniques audio)., The original document contains color images.			
14. ABSTRACT			
15. SUBJECT TERMS			
16. SECURITY CLASSIFICATION OF:			17. LIMITATION OF ABSTRACT
a. REPORT unclassified	b. ABSTRACT unclassified	c. THIS PAGE unclassified	UU
			18. NUMBER OF PAGES 14
			19a. NAME OF RESPONSIBLE PERSON

1 DESCRIPTION DU VISEUR DE CASQUE

Un viseur de casque n'est acceptable du point de vue opérationnel que si les fonctions ajoutées sur la tête n'altèrent pas les niveaux de protection du casque ni la sécurité du pilote. C'est pourquoi un viseur de casque performant est conçu comme un équipement de tête et non comme un accessoire du casque. En effet, c'est en intégrant les fonctions de visualisation au casque de protection qu'on pourra atteindre en particulier les critères biomécaniques de masse et de centre de gravité, tout en respectant les niveaux de protection passive.

Il a été montré [2] que pour un pilote d'hélicoptère, la masse supportée par la tête est le paramètre dimensionnant vis à vis des risques de lésions du rachis cervical. Elle ne doit pas dépasser 2,3 kg pour un niveau de crash normalisé.

L'autre paramètre dimensionnant est le centre de gravité de l'équipement de tête qui doit être aussi proche que possible de celui de la tête nue afin de respecter la mobilité naturelle de la tête et réduire les risques de cervicalgies et de fatigue.

Le respect de ces critères amène naturellement le concepteur à alléger les éléments de protection passive du casque au profit des fonctions actives du visuel.

Le viseur de casque TopOwl qui équipe l'équipage de l'hélicoptère d'attaque TIGRE a été conçu selon cette démarche. Il utilise la visière pour présenter des images d'aide au pilotage, conduite de tir et navigation, il intègre un système de Détection de Posture qui le relie au calculateur du système de mission et comprend des modules de vision nocturne à intensificateurs de lumière.



Figure 1 : Viseur de casque Topowl.

Le tableau ci après présente une décomposition des fonctions des équipements de tête Topowl et SPH 5 en comparant leurs masses respectives. On voit que le casque qui assure principalement la protection passive a été allégé pour compenser la masse ajoutée par le dispositif de visualisation.

Tableau 1 : Comparaison des masses par fonction entre un viseur de casque et un casque conventionnel.

Equipement de tête	TopOwl	SPH 5
Protection faciale	100 g	2 x 90 g
Protection aux impacts	475 g	700 g
Protection acoustique	75 g	200 g
Communication	80 g	120 g
Liaisons mécaniques	120 g	220 g

Dans le viseur de casque Topowl, une partie de l'énergie d'impact est absorbée par les structures du dispositif de visualisation afin d'alléger d'autant le casque et atteindre au global un niveau de protection équivalent à celui d'un casque conventionnel.

Afin d'obtenir un centre de gravité acceptable, les dispositifs de vision nocturne ont été placés sur les cotés du casque et à hauteur des yeux pour ne pas dégrader le champ de vision.

Cette disposition a entraîné une réduction du volume disponible pour la protection acoustique dont la conception est présentée dans cet article.

2 SPÉCIFICATION

La protection acoustique à obtenir est en général définie par l'avionneur pour l'équipementier sous forme d'une atténuation en fonction de la fréquence. Les valeurs d'atténuation spécifiées devraient être définies en fonction du spectre de bruit ambiant et de la dose maximale admissible pour l'oreille humaine. La spécification d'atténuation est aussi souvent définie en référence à ce qui se fait de mieux dans le domaine. La spécification pour le casque du Tigre est la suivante :

Tableau 2 : Spécification d'atténuation en fonction de la fréquence.

Fréquence	< 250 Hz	250 Hz à 500 Hz	500 Hz à 1 kHz	1 kHz à 3 kHz	3 kHz à 4 kHz
Atténuation	> 10dB	> 20 dB	> 25 dB	> 35 dB	> 40 dB

La méthode de mesure associée à cette spécification n'est pas précisée.

A cette spécification d'atténuation, s'ajoutent les contraintes de conception suivantes pour les protecteurs acoustiques :

Les protecteurs incluent les transducteurs audio.

Les dimensions des protecteurs assurent une couverture anthropométrique du 5^{ème} percentile au 95^{ème} percentile (MIL STD 1472 C).

Les protecteurs doivent être conçus pour un port prolongé de plus de 4 heures en continu, 8 heures par jour.

Les protections acoustiques ne doivent pas engager la sécurité de l'utilisateur en cas d'impact latéral.

La masse de chaque protecteur complet ne doit pas dépasser 50g.

3 CONCEPTION

Les protecteurs acoustiques des casques d'écoute, casques anti-bruit ou des casques conventionnels pour pilotes d'hélicoptères sont constitués d'une cavité comportant une mousse interne absorbante, un coussinet d'étanchéité et un dispositif de maintien et d'ajustement de la pression de contact autour de l'oreille.

On sait [3] que la masse et le volume de la cavité, la souplesse du coussinet, l'effort de maintien et surtout l'étanchéité sont les facteurs clé pour une bonne atténuation.

Une première étude théorique a été menée avec l'aide du laboratoire spécialisé du Centre de Transfert de Technologie de l'université du Mans afin de d'appréhender l'influence de chaque composant et préparer la conception des cavités acoustiques à volume réduit. Cette étude a montré que pour le volume et la masse donnés :

- le coussinet et la liaison du protecteur au casque sont les paramètres principaux pour l'atténuation des basses fréquences avec une préférence pour un coussinet de faible périmètre afin de faciliter l'étanchéité circumaurale et une épaisseur aussi faible que possible afin de limiter la transmission de vibrations,
- la coque et la mousse absorbante n'influencent que les moyennes et hautes fréquences avec une préférence pour une coque en matériau intrinsèquement amortissant ou très rigide afin de repousser ses vibrations aux hautes fréquences où elles seront atténuées par le matériau absorbant.

Un calcul des fréquences de résonance par éléments finis a été réalisé afin de vérifier cette hypothèse avec le dessin de la cavité finale.

Ces résultats ont permis de réaliser un prototype utilisé pour la sélection des matériaux et composants avec le concours de l'Institut de Médecine Aéronautique du Service de Santé des Armées (IMASSA). Différentes configurations de protecteurs ont été testées sur une tête artificielle de l'Institut Saint Louis (ISL), les protecteurs étant maintenus par un arceau à serrage contrôlé.

Le matériau de la coque a d'abord été sélectionné parmi des composites carbone, verre et aramide avec matrice époxy, tissus et nombre de plis variables. Le composite carbone époxy en 3 plis a été retenu car il présente le meilleur compromis masse / atténuation.

A partir de cette coque, différents coussinets issus de protecteurs anti-bruits du commerce ont été testés. Parmi plus de 20 références de produits comprenant également des coussinets avec gel de silicone pour le confort thermique et l'étanchéité, le coussinet BILSOM 2742 est celui qui présente le meilleur rapport masse / atténuation.

Le matériaux absorbant interne retenu est une mousse mélamine car elle présente une atténuation supérieure de 1 dB dans les basses et moyennes fréquences et jusqu'à 8dB sur certaines fréquences par rapport aux autres mousses testées. L'ajout de matériau viscoélastique type Butyl et polychloroprène à l'intérieur de la cavité n'a pas apporté d'amélioration.

Enfin, le mode de liaison au casque a été conçu de manière à limiter la transmission des vibrations à la cavité et assurer son étanchéité. Ainsi, la coque est reliée au casque par l'intermédiaire de cales en tissu auto agrippant (Velcro) et le casque possède un dispositif d'ajustement de la position du protecteur permettant de loger l'oreille entière à l'intérieur du coussinet et d'ajuster la répartition de la pression autour de l'oreille.

Le casque qui intègre les cavités acoustiques est lui même fermé par un bourrelet de contour disponible en plusieurs tailles afin d'assurer le contact avec la tête et participer à l'isolation acoustique.



Figure 2 : Conception des protecteurs.

4 MESURE DE L'ATTÉNUATION DE L'ÉQUIPEMENT DE TÊTE

Pour mesurer l'atténuation du viseur de casque ainsi défini, c'est l'équipement de tête complet qui a été testé afin de tenir compte des éventuels effets de transmission et de couplage. La mesure a été réalisée dans le laboratoire de l'IMASSA selon la méthode MIRE définie par la norme ANSI S12-42-1995 sur 4 personnes et non plus sur tête artificielle, pour plus de représentativité.

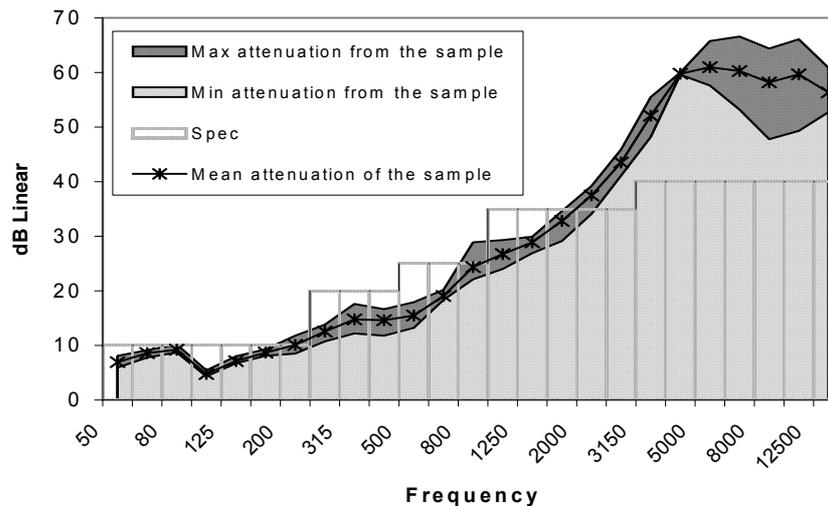


Figure 3 : Atténuation de l'équipement de tête sur 4 sujets, méthode MIRE à l'IMASSA.

Ces mesures étant faites sur 4 sujets seulement, on conserve les valeurs extrêmes et la moyenne plutôt que des écarts types. On constate que les écarts entre les différents sujets sont faibles, ce qui démontre l'efficacité du dispositif de maintien qui assure un effort de serrage reproductible et une bonne étanchéité du protecteur. L'atténuation globale est donc insuffisante au regard de la spécification. On sait que la méthode MIRE donne des résultats d'atténuation inférieurs à basse fréquence comparativement à une méthode subjective de type Real Ear Attenuation at Threshold (REAT) et on peut estimer être proche de l'objectif en dessous de 250 Hz mais entre 250Hz et 1500 Hz, il manque jusqu'à 10 dB pour atteindre la spécification.

5 ANALYSE

Il apparaît donc impossible de respecter la spécification initiale avec des protecteurs dont le volume est réduit et la masse limitée. On remarque que cette spécification n'est pas tenue non plus avec un casque conventionnel comme le casque MK4 britannique [4] pourtant réputé performant sur le plan de l'atténuation acoustique.

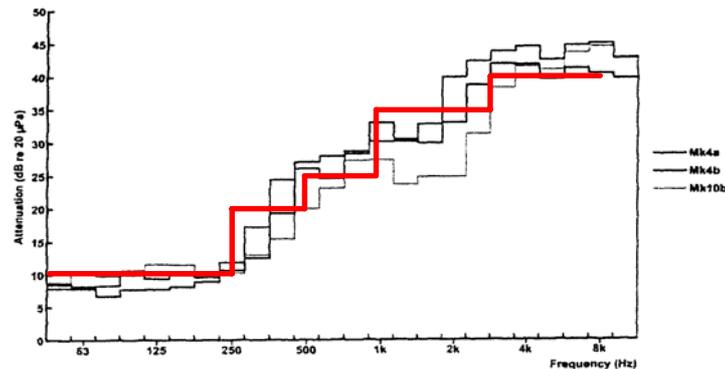


Figure 4 : Atténuation de casques Mk4 et spécification Tigre [4].

Législation

La législation du travail française applique la directive européenne 2003/10/CE basée sur la norme ISO 1999 :1990. Cette législation ne s'adresse pas aux pilotes militaires mais elle nous sert de référence pour l'analyse du risque de dommage auditif.

Cette directive fixe la durée d'exposition en fonction de la dose de bruit continu au delà de laquelle l'usage de protection est nécessaire. Pour un niveau global de 85 dBA, la durée d'exposition quotidienne ne peut dépasser 8 heures. En travaillant à énergie constante, cette durée d'exposition peut être divisée par deux chaque fois que le bruit augmente de 3 dBA, ainsi pour un bruit ambiant de 100 dBA, la durée du vol ne doit pas dépasser 15 min. En pic, le niveau de bruit ne doit pas dépasser 135 dBLin.

Il est rare que l'équipage d'un hélicoptère soit en vol 8 heures par jour et il est improbable que cet équipage vole 5 jours par semaines et 8 heures par jour. S. James [3] propose donc un facteur de correction du seuil en fonction du nombre d'heures de vol rapporté sur une année. Ainsi pour 350 heures de vol annuelles, le seuil devient 92,4 dBA.

Le dépassement de ces doses peut provoquer une réduction temporaire de l'acuité auditive et aboutir à terme à une baisse définitive de l'audition. Le temps de récupération d'une perte temporaire d'audition dépend du niveau et de la dose auxquels on a été exposé, en général une audition normale est recouvrée au bout de 3 à 5 jours.

La perte d'audition est détectée lors d'un audiogramme lorsque le seuil d'audition est supérieur à 20 dB. En général, l'acuité auditive est d'abord plus faible pour les fréquences situées autour de 6 kHz.

D'autre part, un niveau de bruit ambiant trop élevé cause également des risques opérationnels tels que fatigue d'où diminution de l'efficacité et dégradation de l'intelligibilité de la communication électro-acoustique. Buck et al. [1] reporte que le succès d'une mission est en rapport direct avec l'intelligibilité de la communication, il est donc nécessaire d'atténuer les bruits de basses fréquences pour améliorer l'intelligibilité des plus hautes fréquences de la parole.

On retient donc le critère de $85 \text{ dBL}_{\text{Aeq8}}$ pour remplacer la spécification initiale mais également pour réduire les risques de perte temporaire d'audition et la fatigue auditive, avec le temps de repos qui pourrait s'en suivre. On comprend que c'est l'atténuation des basses fréquences qu'il faudra privilégier pour une bonne intelligibilité des communications.

Bruit hélicoptère

Le bruit d'un hélicoptère est un bruit continu, il présente en général un niveau élevé pour les basses fréquences et un spectre très étendu de 15 Hz à plus de 6 kHz. Chaque hélicoptère possède un bruit caractéristique qui dépend entre autres du nombre de turbines, de la charge embarquée, de la configuration des rotors, de l'aérodynamique et donc de la vitesse, des vibrations des structures mécaniques etc. ; dans le cockpit on trouve également des sources supplémentaires de bruit comme le conditionnement d'air et l'avionique.

Dans un hélicoptère de transport ou de liaison, le bruit en cockpit est plus faible que dans un cockpit d'hélicoptère de combat comme le Tigre où les postes sont en tandem et dans lequel le co-pilote, en place arrière, se situe très près de la boîte de transmission et des turbines.

Des mesures de bruit ont donc été faites en cockpit arrière dans différentes configurations de vol, du vol stationnaire à la vitesse maximale.

Ces mesures ont été réalisées avec un micro placé dans l'oreille et un micro placé à l'extérieur du casque, comme dans une mesure MIRE. Ces mesures ont également permis d'évaluer le volume de la radio communication.

Atténuation réelle de l'équipement de tête

A partir des atténuations du casque mesurées aux mêmes fréquences que dans on obtient un niveau sous le casque de 84 dBA. Il s'agit d'une valeur moyenne couvrant 50% de la population. Pour couvrir une plus grande part de la population, on tient compte des dispersions individuelles et donc de la valeur de l'écart type sur la moyenne des atténuations globales individuelles : 0,6 dBA. La dose de bruit sous casque devient ainsi 84,6 dBA pour 84% de la population et 85,6 dBA pour 95% de la population. Ces valeurs sont indicatives et seraient à affiner avec un plus grand nombre de mesures : 10 suivant normes ANSI.

Communication radio

S. James [4] rapporte que la pression acoustique due à la communication radio est de 6 à 10 dB. Compte tenu de l'occurrence et de la durée des messages, on évalue le niveau acoustique pondéré de la communication à 3 dBA sur tout le vol.

Bruit d'armes

Lors d'un tir canon, le bruit impulsionnel est très élevé mais reste inférieur au critère de 160 dB SPL retenu par la France [5] pour l'exposition aux bruits d'armes. La pression acoustique au niveau de l'oreille étant encore diminuée par le casque, il n'y a donc pas de risque de dommage auditif. Dans le cas des bruits d'armes, la durée admissible d'exposition dépend du nombre de coups tirés durant le vol, voire 24 heures. L'utilisation d'armes est naturellement limitée dans le temps, même pour une mission de combat. On définit donc l'exposition admissible au bruit impulsionnel par l'intermédiaire d'une réduction de la durée d'exposition au bruit continu. Il a été déterminé que la durée d'exposition pouvait être réduite jusqu'à 30% pour une utilisation intensive du canon.

Niveau de bruit réel

Compte tenu du bruit réel de l'hélicoptère sous le casque et du volume de communication, la dose de bruit perçue par le co-pilote atteint 88,6 dBA pour un taux de couverture de 95%.

Le risque de perte d'audition avec la protection actuelle est donc assez faible mais il faut respecter les durées d'exposition définies par iso-énergie si on veut être à l'abri.

Dans ce cas, la durée de vol doit être inférieure à 3 h 30 min pour respecter le critère de 85 dBL_{Aeq8}, ce qui paraît trop faible en temps de paix, notamment pour des pilotes instructeurs.

En cas de tirs intenses, cette durée est réduite à 2 h 30 min ce qui n'est pas suffisant en temps de guerre.

6 AMÉLIORATION DE L'ATTÉNUATION

Il nous faut donc améliorer l'atténuation globale de l'équipement de tête afin de respecter le critère de 85 dBA. Les améliorations possibles sont listées dans le tableau suivant :

Tableau 3 : Comparaison des solutions d'amélioration d'atténuation.

	Performance	Impact sur casque	Impact sur masse
Protecteurs passifs plus efficaces	+5 dB jusqu'à 2 kHz	Augmentation volume et déplacement des intensificateurs de lumière	+ 110 g
Atténuation Active de Bruit	+5 dB à +30 dB jusqu'à 500 Hz	Augmenter le volume des cavités et ajouter l'alimentation	+ 50 g
Bouchons d'oreilles actifs Type CEP	> 20 dBA	Ajout d'un connecteur sur le casque	+ 25 g
Bouchons d'oreille passifs Type mousse ou moulés	> 20 dBA	Aucun	< 3 g

Amélioration des protecteurs

Pour rendre les protecteurs actuels plus efficaces en basses fréquences, il faudrait augmenter leur volume et leur masse si on se réfère aux casques anti-bruit du commerce ou ceux des casques d'hélicoptère type SPH 4, HGU 56 ou Alpha MK 4. Une augmentation de masse supérieure à 100 g remettrait en cause la tenue du critère de lésion au crash, en particulier pour les femmes. L'augmentation du volume pour atteindre celui des protecteurs connus nécessiterait de revoir la disposition des intensificateurs de lumière avec pour conséquence la dégradation du centre de gravité de l'équipement de tête et de l'ergonomie visuelle.

Atténuation active de bruit

Parmi les différents systèmes ANR [1], le plus simple à intégrer est certainement l'ANR feedback analogique (mesure du son à l'intérieur du protecteur) car il suffit d'intégrer le module ANR dans la cavité à la place du transducteur et d'ajouter les fils d'alimentation. Une adaptation du dessin du protecteur est quand même à prévoir pour un fonctionnement optimum dans tout le spectre, le surcroît de masse de 50g environ pourrait être admissible pour une population de pilotes supérieure au 25ème percentile.

Le système feed-forward (mesure du son à l'extérieur du casque) paraît théoriquement mieux adapté au bruit d'un hélicoptère peu fluctuant mais sa mise en œuvre en pratique est délicate car il nécessite une parfaite reproductibilité du fonctionnement du protecteur sur chaque pilote, ce qui est difficile compte tenu des variations anatomiques naturelles. Cette contrainte pourra être levée avec un filtrage digital à la place du filtrage analogique actuel.

L'efficacité optimale de l'ANR est centrée autour de 300 Hz avec 15 dB d'atténuation en fonction du filtrage adopté. La contribution de l'ANR sur l'atténuation du bruit se situe entre 50 Hz et 500 Hz, au delà l'atténuation est nulle et il peut même apparaître une amplification du signal autour de 800 Hz.

Cette atténuation du bruit en basses fréquences diminue l'effet de masque des fréquences plus hautes de la communication et facilite leur audition sans nécessiter un fort volume. Cette performance est donc intéressante vis à vis du bruit hélicoptère pour abaisser le niveau global d'exposition mais n'est peut être pas suffisante pour combler le déficit d'atténuation du protecteur actuel dans la bande 500 Hz à 1500 Hz compte tenu notamment du risque d'amplification du bruit par l'ANR dans cette même bande.

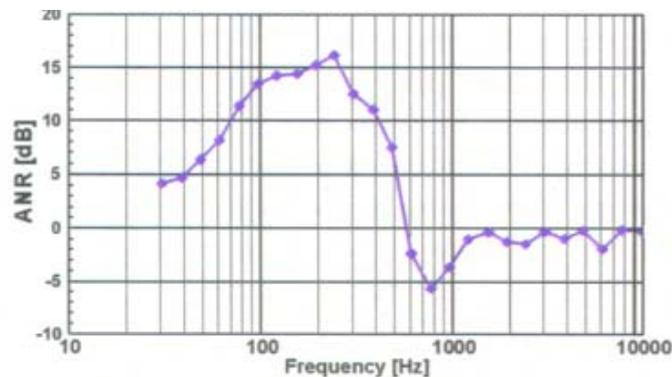


Figure 5 : Contribution de l'ANR sur l'atténuation [1].

Bouchons d'oreilles

Les bouchons d'oreilles sont largement utilisés dans l'industrie sous diverses formes, en mousses avec différentes formes, bouchons souples en élastomère ou personnalisés par moulage en acrylique ou silicone.

Le système présentant le meilleur rapport efficacité/simplicité est certainement le bouchon en mousse qui se forme facilement à la taille du conduit auditif et qui procure une atténuation supérieure à 20 dB lorsqu'il est mis en place correctement [3].

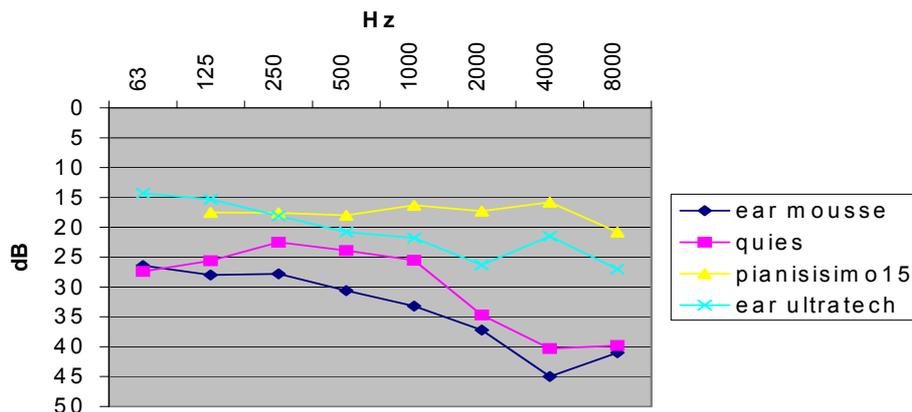


Figure 6 : Atténuation de différents bouchons (IMASSA).

L'utilisation de bouchons d'oreille en complément de la protection apportée par l'équipement de tête actuel paraît donc être la voie à la fois la plus simple et la sûre d'améliorer l'atténuation.

Des premiers tests en laboratoire effectués selon la méthode REAT, ont confirmés que l'ajout de bouchons permet d'atteindre une très bonne protection de l'ordre de 35 dBA.

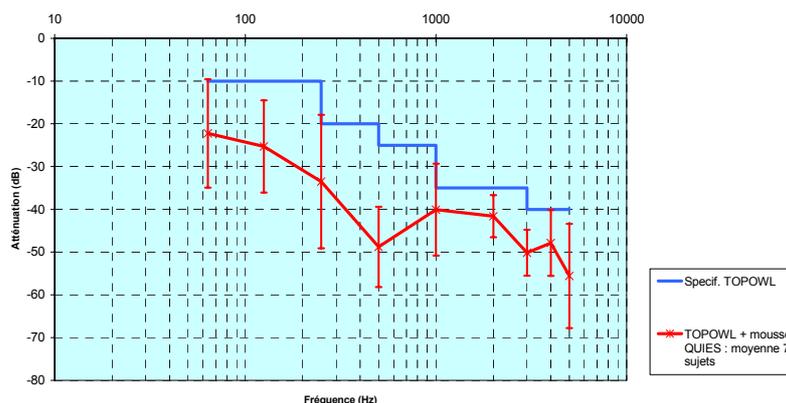


Figure 7 : Atténuation de la double protection avec bouchons mousse.

L'apport des bouchons est très important en basses fréquences et surtout autour de 500 Hz, justement où on recherche une amélioration de la performance de l'atténuation du protecteur. A hautes fréquences, l'atténuation est inférieure à la somme des atténuations du casque et des bouchons. Les écarts types sont très importants à cause d'une part des mesures selon une méthode subjective mais surtout à cause de l'efficacité des bouchons qui dépend fortement de leur insertion dans le canal auditif. En effet, l'atténuation peut être nulle si le bouchon n'est inséré que de 25% de sa longueur dans le conduit auditif [3] et peut atteindre 22 dB lorsque le bouchon est complètement inséré (presque plus visible). Cette insertion dépend de la taille du conduit auditif mais aussi de l'effet psychologique du risque de ne pas pouvoir ressortir le bouchon.

Avec cette double protection, l'atténuation est telle que l'audition des communications est affaiblie, ce qui peut être compensé par une augmentation du volume au niveau du casque, mais surtout celle des alarmes cockpit devient insuffisante, ce qui est beaucoup plus critique du fait de l'impossibilité d'ajuster leur volume individuellement. Enfin, une sensation d'occlusion et d'isolation de l'environnement perçue lors des essais en vol a définitivement rendu rédhitoire cette double protection.

Bouchons actifs

L'utilisation de bouchons actifs type CEP (Communication Ear Plug) paraît être une bonne solution pour régler à la fois le problème de l'atténuation du bruit et de la conservation de l'audition des communications.

Un modèle de ce type de bouchon comprend une partie en mousse qui obstrue le conduit auditif et un transducteur miniature à l'extérieur, le son est transmis via un conduit qui traverse la partie en mousse. La encore, l'efficacité de la protection dépend de l'insertion correcte du bouchon. Dans quelques cas, des problèmes de confort liés à la taille du transducteur externe ou à la présence du fil d'alimentation contre l'oreille ont également été notés. Le problème de l'audition des alarmes en cockpit demeure le même qu'avec des bouchons mousse.

Bouchons personnalisés

Les bouchons personnalisés règlent le problème de l'insertion et de la taille du conduit auditif par prise d'empreinte et reproduction de la forme du conduit de l'oreille du sujet. Les bouchons testés sont insérées dans la parties externe du conduit auditif, c'est à dire la partie malléable autour du cartilage. Il existe des techniques qui améliorent encore plus l'étanchéité du bouchon en prolongeant la partie insérée jusqu'au niveau de la partie du canal comprise dans la partie osseuse rigide de l'oreille [3]. Compte tenu de la délicatesse du procédé de réalisation de ces inserts profonds, seuls le premier type de bouchons a été évalué.

La transmission du son à l'oreille est assurée par un orifice percé à posteriori dans le bouchon moulé, un filtre peut être ajouté à l'entrée ou dans l'orifice de manière à obtenir une atténuation adaptée au bruit à atténuer. Ainsi l'atténuation peut être linéaire, c'est à dire pratiquement constante sur l'ensemble du spectre et présente une très faible distorsion dans les fréquences vocales.

Un premier modèle avec filtre intégré à l'orifice a été testé en laboratoire mais l'atténuation dans la bande audio était encore trop importante pour tenter de nouveaux essais en vol avec des perspectives de succès. En revanche, un modèle avec filtre externe utilisé par les musiciens en particulier et facilement disponible chez les audioprothésistes, a donné des résultats remarquables à plusieurs points de vue. En effet, les mesures en laboratoire montrent un couplage très satisfaisant avec le casque puisque la protection globale est significativement améliorée alors que la bande audio est modérément atténuée.

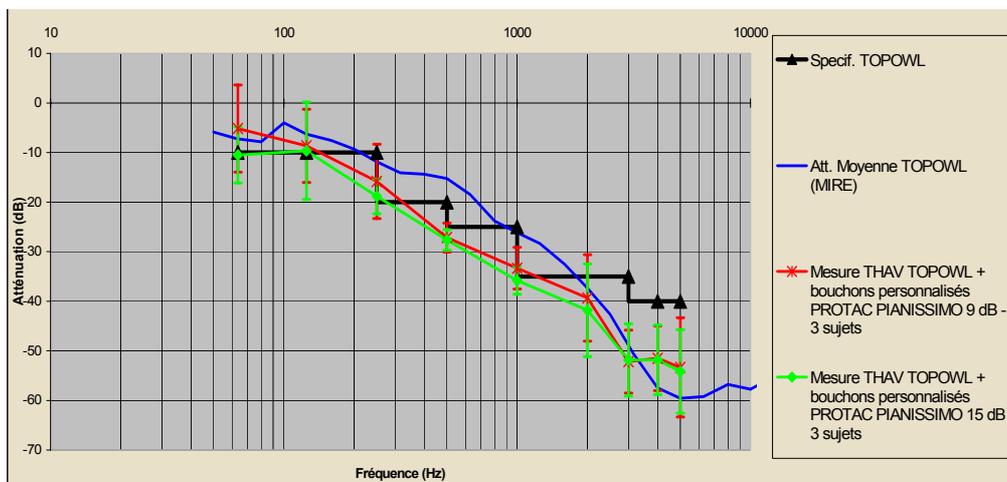


Figure 8 : Atténuation comparée de double protections avec bouchons linéaires 9 dB et 15 dB.

L'atténuation moyenne tangente même la spécification initiale avec des filtres 15 dB. Elle n'est toutefois pas atteinte si on tient compte des écarts types encore importants car liés à la méthode REAT et à cause d'un petit nombre de mesures (3 sujets). L'atténuation à hautes fréquences paraît plus faible avec la double protection qu'avec le casque seul mais les résultats ne sont pas parfaitement comparables car obtenus avec 2 méthodes MIRE et REAT et dans 2 laboratoires différents. Selon ces mesures, la double protection ainsi réalisée atteint 80,4 dBA au global avec les communications soit un apport de 3,6 dBA supplémentaires, ce qui paraît faible mais le nombre d'expérimentation est trop faible pour conclure sur la valeur réelle. Des mesures complémentaires sont donc à prévoir, le bruit en cockpit et l'atténuation devront être déterminés de façon cohérente et aux mêmes fréquences. On a toutefois constaté que la double protection a apporté un gain d'atténuation à chaque fréquence pour chaque expérimentateur, ce qui confirme l'intérêt de la solution et permet d'envisager son application.

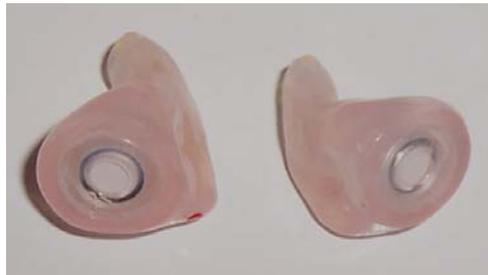


Figure 9 : Bouchons linéaires personnalisés avec filtre 25 dB.

7 ESSAIS EN VOL

La validation de la double protection est passée par une première phase d'essais en vol. Les trois filtres disponibles : 9dB, 15 dB et 25 dB ont été testés par trois pilotes d'essais.

Les rapports d'essais indiquent que :

- l'ergonomie est jugée satisfaisante,
- la sécurité de vol est améliorée du fait de la réduction de fatigue liée au bruit, et qu'aucun problème de décompression n'est relevé,
- la qualité d'écoute est améliorée par un effet de réduction de bruits parasites,
- les bouchons de type 15 dB présentent le meilleur compromis atténuation/qualité d'écoute,
- pour éviter leur perte, les bouchons doivent être équipés d'une cordelette en caoutchouc, suffisamment souple pour s'étirer ou casser et d'éviter de blesser l'oreille en cas de traction involontaire.

A la suite de ces indications, une deuxième phase d'essais avec des pilotes opérationnels a été menée dans différentes machines pour des missions réelles comprenant des vols de navigation, tactique et convoyage, de jour et de nuit, avec tirs canon et roquettes.

Les rapports des pilotes confirment les résultats précédents :

- Qualité de l'écoute : les bouchons utilisés améliorent sensiblement la qualité de l'écoute en filtrant effectivement les bruits parasites. Toutefois, l'utilisation d'un filtre change l'environnement sonore et demande à l'utilisateur une accoutumance lui permettant de se créer de nouveaux repères sonores.

- Audition des alarmes : l'audition des différentes alarmes rencontrées ne pose pas de problème particulier.
- Ergonomie : les bouchons utilisés ne causent pas de gêne particulière pendant le vol. Cette remarque reste valable en tirs canon réalisés au casque. Une gêne peut être perçue si le positionnement de l'écouteur n'est pas parfait. L'utilisateur devra donc avoir une attention particulière lors de la mise en place de son casque et notamment sur le positionnement effectif des écouteurs. Les bouchons eux-mêmes ne provoquent pas de gêne particulière ni d'irritation.
- Tirs canon et roquette : le port des filtres n'apporte pas de modification notable du bruit, généré par le tir, perçu par le tireur. Ceci semble être cohérent si l'on prend en compte que ces bruits sont "sourds" (basse fréquence).
- Effet secondaire : l'utilisation des bouchons lors des vols Tigre a permis de mettre en évidence l'absence de bourdonnements observés lors de vols similaires réalisés sans bouchons. D'où un confort acoustique après le vol qui n'est pas du tout négligeable.

Suite aux essais en vol réalisés à ce jour, les bouchons linéaires 15 dB ont été jugés acceptables par les pilotes.

8 CONCLUSION

Le bruit d'un hélicoptère est surtout riche en basses fréquences, ce qui gêne les communications et entraîne une fatigue auditive avec nécessité de récupération. Le respect du critère d'exposition à 85 dBLAeq8 permet de contenir le risque auditif, que ce soit en bruit continu ou lors de tirs d'armes. L'atténuation active de bruit est actuellement la solution la plus efficace pour réduire le bruit à basses fréquences jusqu'à 500 Hz, elle doit donc être couplée à une protection passive performante pour le reste du spectre. Les futurs développements avec filtrage digital ou intégration dans des bouchons d'oreille permettront certainement d'étendre l'efficacité de l'atténuation active.

Le viseur de casque est un équipement incontournable des hélicoptères de combat actuels. Le respect des critères de lésion au crash et de fatigue limite la masse supportée par la tête et nécessite donc l'allègement des fonctions de protection passive sans en réduire le niveau.

La double protection passive présente un intérêt pour les viseurs de casques car elle permet de réduire la spécification d'atténuation passive du casque et donc de l'alléger. Il s'en suit une plus grande liberté de conception pour les protecteurs et la possibilité d'implanter les capteurs de vision de nuit au niveau des oreilles pour un meilleur équilibrage de l'équipement de tête.

Les bouchons d'oreilles personnalisés à atténuation linéaire représentent un bon complément à l'atténuation du casque car ils réduisent le bruit parasite dans les basses fréquences sans trop atténuer les fréquences de la communication. Ce qui améliore l'intelligibilité des communications tout en réduisant le volume sonore global perçu par l'oreille. Ainsi la fatigue liée au bruit et aux communications est réduite et l'efficacité de la mission est améliorée. L'atténuation peut être ajustée par le choix du filtre, ce qui permet d'éviter l'effet d'occlusion et d'isolement afin de conserver la perception spatiale et de l'environnement.

La double protection est également intéressante dans le cas de casques conventionnels pour améliorer l'atténuation globale face à des machines de plus en plus bruyantes car elle ne nécessite aucune modification matérielle.

Il reste à convaincre les opérationnels de l'utiliser car c'est une opération supplémentaire au départ de la mission et l'effet de la protection supplémentaire n'est pas encore sensible à ce moment là. Cela passe par une sensibilisation et une formation du personnel aux risques d'exposition au bruit.

La logistique reste également à mettre en place dans les forces afin d'équiper les pilotes et maintenir les protections à disposition.

RÉFÉRENCES

- [1] K. Buck and V. Zimpfer-Jost - Active Hearing Protection Systems and their Performance ; Lecture Series HFM-111 on " Personal Active Noise Reduction ", October 2004.
- [2] A. Leger, L. Portier, J. Baudou, X. Trosseille – Crash Survivability And Operational Comfort Issues Of Helmet Mounted Display In Helicopters: Simulation Approach And Flight Tests Results; PROCEEDING "The Design and Integration of Helmet Systems"; Additional paper; December 2-5 1997.
- [3] R. McKinley and V. Bjorn – Passive Hearing Protection Systems and their Performance.
- [4] S. James – Defining the cockpit noise hazard, aircrew hearing damage risk and the benefits Active Noise Reduction can provide.
- [5] A. Dancer et R. Franke – Hearing Hazard from Impulse Noise : a Comparative Study of Two Classical Criteria for Weapon Noises (Pfander Criterion and Smoorenburg Criterion) and Laeq8 Method ; acta acoustica 3 (1995) 539-547.
- [6] ANSI S12.42-1995 – Microphone In Real Ear and Acoustic test Fixture method for the Measurement of Insertion Loss of Circumaural hearing Protection Devices.
- [7] ANSI S12.6-1984 – Method for the Measurement of Real Ear Attenuation of Hearing Protectors.
- [8] ISO 1999:1990 – Détermination de l'exposition au bruit en milieu professionnel et estimation du dommage auditif induit par le bruit.