

scientifique & technique
note
note scientifique
& technique
scientifique
technique

**Atténuation acoustique
apportée par la combinaison
d'un bouchon d'oreille
et d'un casque anti-bruit
(double protection)**

Atténuation acoustique apportée par la combinaison d'un bouchon d'oreille et d'un casque anti-bruit (double protection)

Nicolas Trompette¹, Thomas Bonzom²,
Julien Marchand¹, Patrick Chevret¹

¹Département Ingénierie des équipements de travail,
laboratoire Acoustique au travail,
²Carsat Languedoc-Roussillon

NS 381
janvier 2023

Atténuation acoustique apportée par la combinaison d'un bouchon d'oreille et d'un casque anti-bruit (double protection)

N. TROMPETTE, T. BONZOM, J. MARCHAND, P. CHEVRET

1. Introduction

Lorsque des travailleurs sont soumis à des bruits industriels de très forts niveaux, un des moyens de protection de l'ouïe est le recours à une double protection, c'est-à-dire au port simultané de bouchons d'oreille et d'un casque anti-bruit. Il existe très peu de combinaisons bouchons-casque dont on connaît l'atténuation globale. Par ailleurs, il a été montré que l'atténuation acoustique apportée par une telle combinaison de deux protections est très inférieure à la somme des atténuations acoustiques apportées par chacune des protections auditives utilisées seules.

En 1989, l'INRS avait publié [1] une formule permettant le calcul de l'indice global d'atténuation (SNR) apporté par une combinaison à partir de ceux apportés par chacune des protections auditives utilisées individuellement.

Cette note scientifique propose une réactualisation de cette formule de calcul de l'indice global d'atténuation à partir des données ayant permis de l'établir et de nouvelles données de mesure.

Elle présente en plus une série de formules complémentaires permettant le calcul des valeurs de protection estimées (APV) et des indices globaux d'atténuation acoustique H, M et L d'une combinaison à partir des valeurs de protection estimées (APV) de chacune des protections utilisées en combinaison. Les indices H, M et L permettent une évaluation plus précise de l'efficacité de la protection contre le bruit des utilisateurs des doubles protections que l'indice global d'atténuation SNR.

2. Revue de littérature

En 1990, Damongeot et al. avait proposé dans leur publication [1] une formule simple permettant d'estimer le SNR (« single number rating », indice global de l'atténuation apportée pour un bruit rose tel que décrit dans la norme ISO 4869-2 et utilisé en Europe) de la double protection :

$$SNR = 33 \log \frac{(SNR_B + 4 SNR_S)}{10} \quad (1)$$

où SNR_B est le SNR du bouchon et SNR_S est le SNR du casque antibruit

En Europe, depuis 2016, la norme EN 458 [2] propose une toute autre approche. Elle statue que l'amélioration apportée par une double protection au SNR de la meilleure des deux protections combinées est de seulement 6 dB à 10 dB. Outre-Atlantique, c'est la règle des 5 dB qui s'applique, que ce soit aux USA dans les règles de l'OSHA ou au Canada dans la norme CSA Z94.2-94 [3]. Il s'agit d'ajouter 5 dB à l'atténuation réelle apportée par le meilleur des deux protecteurs dont on abaisse au préalable l'indice global de réduction du bruit utilisé outre-Atlantique (NRR) de 7 dB. Les normes et les règles pour évaluer l'atténuation apportée par une double protection sont donc différentes selon les pays. Par ailleurs, elles proposent une évaluation très sommaire et qui ne prend pas en compte la protection la moins performante. Il y a donc un intérêt certain pour les préventeurs à disposer d'une formule aussi complète que (1) pour évaluer avec précision l'efficacité d'une double protection.

La publication de Damongeot et al. [1] reprenait cinq études réalisées entre 1981 et 1987 dont deux publiées [4] [5]. Ces études utilisaient 10 à 15 sujets et testaient chacune entre 3 et 11 combinaisons, avec un total de 32 combinaisons testées. Les données dans [1] sont basées sur une évaluation subjective de l'atténuation des protections auditives, testées individuellement ou en combinaison. Cette évaluation est réalisée au seuil de l'audition sur des sujets selon la méthode d'essai Real Ear at Threshold (REAT) décrite dans la norme ISO 4869 [6].

Il y a eu relativement peu de publications sur le sujet après 1987. En 1989, Chang-Chun Liu et al. [7] ont effectué des mesures à l'aide d'une sonde microphonique (méthode objective MIRE décrite dans la norme ISO 11904-1 [8]) sous trois casques anti-bruit et un bouchon d'oreille utilisés dans l'armée finlandaise, en simple puis en double protection (protections auditives seules puis en combinaison). Leurs résultats sont donnés uniquement en terme de perte par insertion (IL) globale. Ils trouvent une amélioration de 6 à 8 dB entre l'IL de la meilleure des deux protections (en l'occurrence le bouchon d'oreille) et celle de la combinaison. En 1992, Abel et Armstrong [9] ont publié des résultats de mesure obtenus avec la méthode subjective REAT. Leurs mesures portent sur 16 sujets et quatre combinaisons formées avec deux bouchons d'oreille et deux casques anti-bruit. Le travail réalisé est difficilement exploitable. Les mesures ne sont faites qu'à partir de 500 Hz. Or c'est aux octaves basses fréquences, 63 Hz à 250 Hz, que la double protection a le plus d'intérêt. Les atténuations individuelles des protections mesurées par les auteurs sont très élevées, ce qui rend la combinaison à peine plus performante car elle est limitée par la conduction osseuse. En 1999, Behar et Kunov publient une étude expérimentale [10] regroupant les résultats sur 16 combinaisons formées avec 4 bouchons et 4 casques anti-bruit. Les mesures sont faites avec un mannequin (méthode du mannequin décrite dans la norme 11904-2 [11]). Ils arrivent à la même conclusion que Chang-Chun Liu et al. [7]. La perte par insertion combinée est en moyenne 7 dB plus élevée que celle de la meilleure des deux protections mais cette amélioration varie entre 2 et 14 dB suivant la combinaison. Plus la perte par insertion du bouchon est élevée, moins le gain est important. Cette étude est à considérer avec prudence car le conduit auditif d'un mannequin est peu représentatif de celui de l'être humain, voir par exemple le travail de Trombetta-Zannin et Gerges [12] qui montre que la perte par insertion d'un bouchon mesurée avec un mannequin surestime largement la perte par insertion réelle. En 2015, Nakashima publie des résultats [13] également obtenus avec un mannequin et qui présentent donc les mêmes biais que l'étude de Behar et Kunov. Il teste une seule combinaison et trouve des améliorations en atténuation globale de 8 et 12 dB, suivant l'oreille considérée. Il ne donne pas les résultats en bande d'octave. Enfin, plus récemment (2017), Nélisse et al. [14] ont mesuré la perte par insertion de plusieurs types de bouchons et de casques antibruit portés seuls et en combinaison par des mesures objectives MIRE sur des sujets. Ils ont placé des microphones à la fois sous le casque anti-bruit et dans le conduit auditif derrière le bouchon d'oreille. Les auteurs ont constaté que la présence du bouchon ne modifie pas significativement la perte par insertion du casque mais ils ont remarqué que, à l'inverse, la perte par insertion des bouchons baissait fortement lorsqu'ils étaient portés en combinaison avec des casques antibruit, jusqu'à parfois devenir nulle dans les fréquences comprises entre 250 Hz et 4 kHz, essentiellement aux bandes d'octave 500 Hz, 1 kHz et 2 kHz. Des résultats similaires ont été obtenus par les auteurs en utilisant un mannequin. Ils ont ensuite utilisé un modèle vibro-acoustique du mannequin pour expliquer leurs résultats puis réitéré des essais sur mannequin (Luan et al. [15]). D'après eux, ce sont les vibrations de la coque du casque, transmises via les coussinets puis par conduction osseuse au bouchon et aux parois du conduit auditif, qui court-circuitent la transmission aérienne et limitent l'atténuation d'une double protection entre 500 Hz et 2 kHz. A noter que Nélisse et al. ne donnent pas les résultats obtenus sur les sujets

dans [14] et que de ce fait leurs mesures n'ont pu être ré-exploitées ici. Enfin, l'INRS a effectué en 2022 une revue bibliographique et réalisé de nouvelles mesures afin de réactualiser le travail de Damongeot (Trompette et al. [16]). Quatre nouvelles combinaisons ont été étudiées. La formule (1) s'est révélée valide sur ces nouvelles combinaisons. Les nouvelles formules présentées ici ont été établies lors de ce travail. Enfin, le plafonnement de l'atténuation aux bandes d'octaves moyennes fréquences a été à nouveau observé et des tests ont été menés pour essayer de valider les hypothèses explicatives de Nélisse et al. Ces hypothèses ont bien résisté aux tests.

Cette revue de la littérature montre finalement qu'il n'y a pas de nouveaux résultats exploitables en bandes d'octave publiés dans la littérature depuis les études utilisées par Damongeot et al. [1] excepté ceux tout récents issus de nos travaux [16]. En revanche toutes les publications s'accordent pour estimer que l'atténuation acoustique apportée par une combinaison est très inférieure à la somme des atténuations acoustiques apportées par chacune des protections auditives utilisée seule, les explications données par Nélisse et al. semblant pertinentes. Par ailleurs, cette revue de la littérature montre que seul Damongeot et al. ont proposé une formule de calcul, unique à ce jour et limitée au SNR. Ni les normes ni les réglementations n'ont d'équivalent notamment en termes de précision.

3. Description des données utilisées

Les données utilisées ici résultent d'une étude de Berger [4] datant de 1983, d'une étude de Rawlinson et al. [5], de rapports institutionnels du NAL (Australie), du BIA/PTB (Allemagne), de la publication de Damongeot et al. [1] et enfin de nouvelles mesures de l'INRS [16]. Les rapports institutionnels du NAL (Australie) comme ceux du BIA/PTB (Allemagne), assez anciens, n'ont pas pu être retrouvés et les données utilisées relatives à ces rapports sont celles rapportées dans la publication de Damongeot et al. [1].

Dans l'étude de Berger [4], les mesures ont été effectuées, selon la norme américaine ANSI S3.19 de 1974, qui est proche de la méthode de référence REAT, sur 10 sujets, à raison de trois essais par sujet. Les essais ont porté sur trois modèles de bouchons d'oreille : deux bouchons en mousse (BILSOM « Soft », EAR « classic » ou équivalent) et un bouchon prémoulé (V51R). Le bouchon de mousse EAR a fait l'objet de trois profondeurs d'insertion, « partielle », « standard » et « profonde ». Les combinaisons ont été réalisées avec trois modèles de serre-tête : l'un de « faible volume » de coquille (190 cm³), un autre de « grand volume » (309 cm³) et un troisième de « grand volume renforcé au plomb ». Huit combinaisons {bouchons + serre-tête} ont été testées. La combinaison faisant intervenir les bouchons, avec « insertion profonde » avec le serre-tête « grand volume renforcé au plomb » avait pour but d'estimer l'affaiblissement maximum que l'on peut obtenir avec une double protection.

Dans l'étude de Rawlinson et al. [5], les mesures ont été effectuées selon la méthode REAT sur 10 sujets avec deux essais par sujet. Quatre modèles de bouchons et quatre modèles de serre-tête ont été utilisés. 11 combinaisons {bouchons + serre-tête} ont été testées.

Les données du BIA/PTB (Allemagne) ont été aussi obtenues par la méthode REAT sur 15 sujets (sans répétition de l'essai). Elles ont porté sur 5 modèles de bouchons, 6 modèles de serre-tête et 6 combinaisons ont été mesurées.

Les données du NAL (Australie) ont été obtenues aussi suivant la norme australienne AS 12.70, proche, elle aussi, de la méthode REAT, sur 15 sujets (sans répétition). Elles ont porté sur un modèle de bouchons d'oreille, trois modèles de serre-tête et trois combinaisons ont été mesurées. Dans toutes les études sauf celle de Berger, tous les modèles sont désignés sous leur référence commerciale.

Les mesures complémentaires de Damongeot et al. [1] ont été effectuées selon la méthode REAT sur 10 sujets (sans répétition). Elles ont porté sur deux modèles de bouchons, deux

modèles de serre-tête et quatre combinaisons. Enfin les nouvelles mesures de l'INRS [16] ont été effectuées selon la méthode REAT sur 12 sujets (sans répétition). Elles ont porté sur deux modèles de bouchons, deux modèles de serre-tête et quatre combinaisons. A noter que, pour ces quatre combinaisons, les mesures suivant la méthode REAT ont été consolidées au moyen de mesures objectives MIRE suivant l'ISO 11904-1¹.

Au total, les données utilisées comprennent donc 36 combinaisons. Sur ces 36 combinaisons, seulement 35 ont été utilisées pour valider la formule [1]. En effet, une des mesures de Rawlinson et al. affiche un SNR de la combinaison 9 dB inférieur au SNR du casque anti-bruit seul. Or, que ce soit dans la littérature ou dans les 35 autres données, l'indice global d'atténuation de la combinaison n'est jamais inférieur à celui de la meilleure des deux protections. Par ailleurs, cette combinaison présente une atténuation aberrante à l'octave 500 Hz, 6 dB inférieure à la valeur à 250 Hz et 10 dB inférieure à celle à 1 kHz. Il est donc probable que cette mesure soit erronée.

Par ailleurs, seulement 19 jeux de données ont été utilisés pour établir les formules complémentaires permettant le calcul de la valeur de protection assumée (APV) et des indices H, M et L de la combinaison pour les raisons suivantes :

- Les APV des protections auditives étudiées dans les études du BIA/PTB et du NAL ne sont pas connues car les rapports n'ont pas pu être retrouvés, ce qui élimine 9 combinaisons, et Damongeot et al. ne mentionnent pas non plus les APV de leurs quatre combinaisons,
- Les données de Berger pour le bouchon en mousse inséré profondément (trois combinaisons) ont été exclues car les atténuations du bouchon ont été jugées trop élevées pour être réalistes en situation de travail. Notamment, en se reportant à la référence [17], le constat est que les bouchons en mousse présentent in-situ des atténuations réelles en moyenne 10 dB à celle affichée par le fabricant (soit celles obtenues pour l'EAR « classic » dans les données de Berger).

4. Calcul du SNR

La formule (1) proposée par Damongeot et al. a donc été évaluée sur 35 combinaisons (Tableau 1:).

Réf. De l'étude	Désignation des protections auditives {bouchon + serre-tête}	SNR du bouchon (P) dB	SNR du serre-tête (M) dB	SNR combinaison (PM) dB	SNR calculé dB	Ecart calcul/mesure dB
Berger	Bilsom Soft + Serre-tête "faible V"	17	27	34	32	2
Berger	Prémoulé V51R + Serre-tête "faible V"	24	27	38	36	2
Berger	EAR Classic "partielle" + Serre-tête "faible V"	25	27	38	36	2
Berger	EAR Classic "standard" + Serre-tête "faible V"	33	27	40	40	0
Berger	EAR Classic "profond" + Serre-tête "faible V"	38	27	42	41	1
Berger	Prémoulé V51R + Serre-tête "large V"	24	32	37	37	0

¹ La méthode REAT, bien qu'utilisée pour la certification et donc de référence, est subjective et comporte des biais. La méthode MIRE s'appuie sur une mesure objective de la pression acoustique de part et d'autre de la protection individuelle sur des sujets d'essai et est donc plus précise et sans biais.

Berger	EAR Classic "profond"+ Serre-tête "faible v"	38	32	42	42	0
Berger	EAR Classic "profond"+ Serre-tête "plomb"	38	40	42	42	0
BIA/PTB	Bilsom Soft 5035 + Viking 2318 A	27	31	36	38	-2
BIA/PTB	Cabot EAR + EAR Model 1000	34	26	38	40	-2
BIA/PTB	Moldex Pura 6600 + Peltor H7A	32	30	39	40	-1
BIA/PTB	Cabot EAR + PELTOR H6FA/85-10F	34	22	40	40	0
BIA/PTB	Blautex 3M 6300 + Optac VARIO VOL	34	31	40	40	0
BIA/PTB	Racal DBA + ISP SILENTA Custom	23	25	33	35	-2
Rawlingson	EAR study 2 + Safir Junior	27	18	38	36	2
Rawlingson	V51R + Safir Junior	27	27	37	37	0
Rawlingson	Bilsom Soft + Safir Junior	27	32	35	38	-3
Rawlingson	EAR study 2 + Racal Auralgard	26	32	36	37	-1
Rawlingson	Custom-molded + + Racal Auralgard	27	28	39	37	2
Rawlingson	EAR study 1 + Racal Sonomuff	12	27	28	29	-1
Rawlingson	EAR study 2 + Racal Sonomuff	11	18	28	26	2
Rawlingson	V51R + Racal Sonomuff	11	32	33	29	4
Rawlingson	Bilsom Soft + Racla Sonomuff	19	18	29	32	-3
Rawlingson	EAR study 2 + Bilsom Viking	19	32	33	34	-1
NAL	EAR + Safety products EML 44	23	18	33	34	-1
NAL	EAR + Safety products EML 46	23	24	36	35	1
NAL	EAR + Racal Sonomuff	23	31	36	36	0
INRS [1]	EAR + Bilsom 2450	26	23	38	36	2
INRS [1]	Accu-Fit + Bilsom 2450	21	23	34	34	0
INRS [1]	EAR + Willson 358	27	26	37	37	0
INRS [1]	Accu-Fit + Willson 358	18	26	33	33	0
INRS [16]	E.A.R. Ultrafit + Honeywell Clarity C2	22	23	34	34	0
INRS [16]	E.A.R. Ultrafit + 3M Optime III	25	23	36	36	0
INRS [16]	E.A.R. Neons + Honeywell Clarity C2	22	28	36	35	1
INRS [16]	E.A.R. Neons + 3M Optime III	25	28	38	37	1

Tableau 1: Comparaison entre le SNR mesuré de la combinaison (méthode REAT) et calculé (suivant (1)) pour les 35 combinaisons

L'écart entre le SNR mesuré et celui évalué avec (1) ne dépasse pas 4 dB. Pour les quatre combinaisons les plus récemment testées et qui bénéficient d'une validation objective des mesures, l'écart varie entre 0 et 1 dB. Enfin l'écart n'est supérieur à 2 dB en valeur absolue que pour trois combinaisons. Damongeot et al. [1] affichaient des écarts calcul/mesure allant jusqu'à 7 dB. En réalité seules quatre combinaisons, toutes issues de l'étude de Rawlinson et al., sur les 32 qu'ils avaient utilisées montraient un écart significatif (> à 2 dB en valeur absolue) entre la mesure et le calcul. Celle pour laquelle l'écart est le plus grand (7 dB) est celle jugée erronée. Les autres écarts significatifs sont de 3 à 4 dB, ce qui reste acceptable. La formule $SNR = 33 \log \frac{(SNR_B + 4 SNR_S)}{10}$ (1) peut donc toujours être considérée comme applicable. Elle est désormais validée pour le SNR sur 35 combinaisons – en excluant la combinaison de l'étude de Rawlinson discutée au-dessus.

5. Calcul de l'APV et des indices H, M et L

Damongeot et al. avaient choisi d'approximer directement l'indice global d'atténuation SNR toujours en usage aujourd'hui pour le marquage par les fabricants. Cependant il est désormais recommandé en Europe (depuis la parution de la révision de la norme EN 458 en 2016) de préférer les indices H, M ou L au SNR pour la vérification du choix de la protection auditive en fonction de l'exposition sonore voire, si cette exposition sonore est fortement dominée par les basses fréquences, d'utiliser les valeurs par bande d'octave. C'est pourquoi cette note propose aussi des formules pour le calcul de ces indices.

5.1. Etablissement des formules de calcul

Des régressions ont été menées par bande d'octave en utilisant tous les résultats disponibles en bande d'octave et jugés fiables, issus de la bibliographie présentée § 2, soit 19 combinaisons (5 issus des travaux de Berger [4], 10 issus des travaux de Rawlinson et al. [5] et 4 nouvelles combinaisons issues des travaux récents de l'INRS [16]).

La démarche ayant conduit aux formules est explicitée dans ces travaux récents [16]. L'APV de la combinaison se calcule aux octaves de 63 Hz à 250 Hz par la formule (2) :

$$APV_{CO,i} = c_{1,i} APV_{BO,i} + c_{2,i} APV_{ST,i} + c_{3,i} \frac{(L_{BO} + L_{ST})}{2} + c_{4,i} \frac{(M_{BO} + M_{ST})}{2} + c_{0,i} \quad (2)$$

Et aux octaves allant de 2 kHz à 8 kHz, elle se calcule par la formule (3) :

$$APV_{CO,i} = c_{1,i} APV_{BO,i} + c_{2,i} APV_{ST,i} + c_{5,i} \frac{(H_{BO} + H_{ST})}{2} + c_{0,i} \quad (3)$$

Où : c_i sont les coefficients de la régression, donnés Tableau 2

$APV_{CO,i}$ est l'APV à l'octave i de la combinaison

$APV_{BO,i}$ est l'APV à l'octave i du bouchon

$APV_{ST,i}$ est l'APV à l'octave i du serre – tête

$L/M/H_{BO}$ est l'indice L, M ou H (suivant le cas) du bouchon

$L/M/H_{ST}$ est l'indice L, M ou H (suivant le cas) du serre – tête

Octave i	$c_{1,i}$	$c_{2,i}$	$c_{3,i}$	$c_{4,i}$	$c_{5,i}$	$c_{0,i}$
63 Hz	0.5	0.2	0.45	0	-	4
125 Hz	0.5	0.2	0.35	0	-	7
250 Hz	0.5	0.2	0.2	0.1	-	10
2 kHz	0.25	0.25	-	-	-0.15	25
4 kHz	0.4	0.2	-	-	-0.5	40
8 kHz	0.05	0.05	-	-	0.3	30

Tableau 2 : Coefficients c_i des formules (2) et (3) obtenus par régression

Aux deux bandes d'octave moyennes fréquences, 500 Hz et 1 kHz, les APV de chacune des deux protections sont pondérées par une fonction sigmoïde (Figure 1) puis cumulées pour obtenir l'APV de la combinaison suivant la formule (4) suivante :

$$APV_{CO,i} = APV_{BO,i} / \left(1 + \frac{0.5}{1 + e^{-0.9(APV_{BO,i} - 14)}}\right) + APV_{ST,i} / \left(0.5 + \frac{1.1}{1 + e^{-0.3(APV_{ST,i} - 20)}}\right) \quad (4)$$

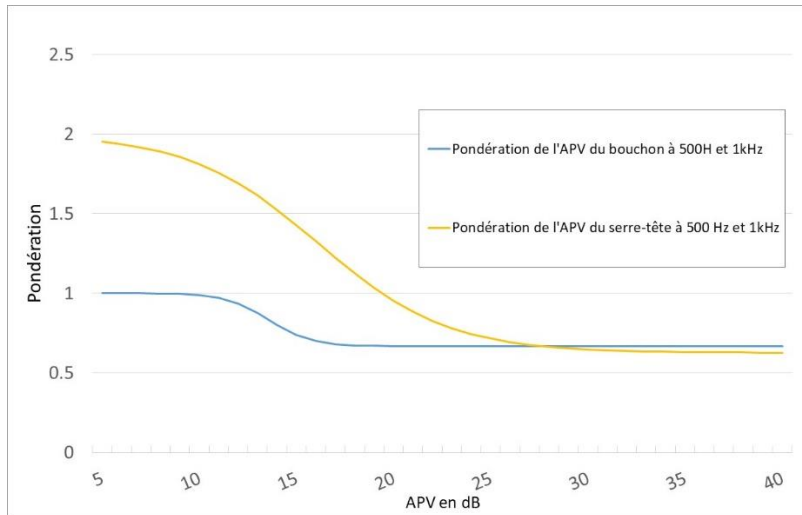


Figure 1 : Pondérations des APV du casque anti-bruit et du bouchon en fonction de la valeur de l'APV

Aux deux bandes d'octave les plus basses fréquences, 63 Hz et 125 Hz et aux octaves hautes fréquences, 2 kHz à 4 kHz, l'erreur maximum sur l'APV est inférieure à 4 dB quelle que soit la combinaison. A l'octave 250 Hz, le résultat donné par la régression reste médiocre. L'écart entre les APV mesurées et calculées atteint 7 dB sur certaines combinaisons. Enfin, l'écart maximum entre les APV mesurées des combinaisons et calculées est de 7 dB à 500 Hz et 5 dB à 1 kHz.

Aux basses-fréquences, la contribution du bouchon est plus importante que celle du casque anti-bruit. C'est bien ce qui a été observé avec les mesures. Aux hautes fréquences (≥ 2 kHz), le calcul dépend d'abord des contributions individuelles (à 2 kHz) puis presque uniquement de l'indice H moyen. Cela s'explique par le fait qu'à 4 et 8 kHz, l'APV est systématiquement proche des limites imposées par la conduction osseuse. Les constantes progressent régulièrement, tout comme l'atténuation. Il y a donc bien comme attendu une bonne cohérence entre ces constatations et les observations issues de la littérature. A 500 Hz et 1 kHz, les coefficients des sigmoïdes ont été obtenus par approximations successives tout en respectant les critères énoncés précédemment, notamment la prépondérance du casque anti-bruit sur le bouchon. Les sigmoïdes obtenues sont identiques entre les octaves 500 Hz et 1 kHz ce qui tend à valider l'approximation.

5.2. Prise en compte de la conduction osseuse

La littérature [1] [4] [5] [9] [13] [15] [18] s'accorde sur le fait qu'un des facteurs limitant l'atténuation de la double protection est la conduction osseuse, qui permet au son de parvenir à la cochlée par un autre chemin que par la conduction aérienne via le canal auditif (AC). La limite d'atténuation due à la conduction osseuse a été quantifiée par Berger en 1983 dans [4] et reprécisée dans une seconde publication en 2003 [18]. Le concept des limites de la

conduction osseuse (notée BC pour Bone Conduction) implique que le son est transmis par des parties osseuses dans la tête qui court-circuitent le mécanisme normal de transmission par conduction aérienne par le canal auditif quand ce dernier est obstrué de manière efficace. Les voies primaires de la BC, telles que décrites dans la littérature sont a) les vibrations des parois du conduit auditif, b) l'énergie transmise par l'excitation vibratoire de la chaîne des osselets, et c) l'excitation vibratoire directe de la cochlée. Les limites de l'atténuation d'un bruit jusqu'à la cochlée admises actuellement et dues à la conduction osseuse sont celles posées par Berger en 2003 [18] (tableau 3).

Octave	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
Limite d'atténuation (dB)	50	57	61	49	41	50	50

Tableau 3 : Limites d'atténuation imposées par la conduction osseuse (BC)

Ces limites sont très élevées pour une simple protection. A contrario, dans le cas d'une double protection, elles peuvent être atteintes, notamment à 2 kHz. Il convient donc de le prendre en compte en corrigeant l'atténuation calculée de façon à ce qu'elle ne dépasse pas les limites spécifiées. La formule (5) suivante proposée par Berger, qui permet de ne pas dépasser les limites de la BC, doit donc être appliquée au résultat final issu des formules (2) à (4) :

$$APV_{CO,BC \text{ corrected},i} = -10 \log_{10} (10^{-APV_{CO,i}/10} + 10^{-(BC_i+3)/10}) \quad (5)$$

Où :

APV est la valeur de protection assumée

APV_{CO,i} est l'APV à l'octave *i* de la combinaison.

APV_{CO,BC corrected,i} est l'APV_{CO,i} corrigée de la limite imposée par la BC

BC_i est la limite imposée par la conduction osseuse à l'octave *i*

5.3. Validation des formules

Les résultats sont présentés en Annexe I. Ils regroupent :

- L'ensemble des données de l'atténuation acoustique mesurée pour les protections auditives utilisées seules,
- L'ensemble des données de l'atténuation acoustique mesurée pour les combinaisons,
- Le calcul des APV et des indices SNR, H, M et L des combinaisons, obtenus à partir des équations (2) à (5),
- Les écarts entre les calculs et les mesures pour l'ensemble des combinaisons.

L'écart entre mesure et calcul pour les indices globaux SNR, H, M et L des combinaisons est d'au maximum 2 dB pour l'indice H, 3 dB pour le SNR et de 4 dB pour les indices M et L, ce uniquement pour une combinaison, et l'écart moyen est nul quel que soit l'indice. Ces écarts sont faibles compte-tenu de l'incertitude acceptée pour les mesures, prise en général égale à l'écart-type de la série par les laboratoires de certification.

Pour les APV par bande d'octave, l'incertitude est acceptable : ≤ 7 dB à 250 Hz et 500 Hz, ≤ 4 dB sinon.

Avec des formules relativement simples, il est par conséquent possible de recalculer les APV par bande d'octave avec une précision acceptable puis de recalculer les indices SNR, H, M et L à partir de ces valeurs avec une bonne précision.

Il convient de noter pour le SNR que cette méthode par bande d'octave présente une précision légèrement plus grande que la formule de Damongeot et al. (1). Surtout, elle permet de

calculer les indices H, M et L et les APV, qui permettent une meilleure évaluation de la protection apportée. Elle peut être mise en œuvre de la même façon que la formule (1), en s'appuyant sur des données disponibles auprès des fabricants, et peut donc lui être préférée.

6. Conclusion

Les travaux menés montrent que la formule de calcul du SNR d'une double protection à partir des SNR de chacune des deux protections utilisées en combinaison proposée en 1990 par Damongeot et al. est toujours applicable et qu'elle présente une incertitude d'au plus 4 dB. La revue de la littérature et des normes montre, qu'à ce jour, cette formule constitue la méthode la plus précise et la mieux validée pour ce calcul.

Une nouvelle méthode est proposée pour calculer l'ensemble des indices d'atténuation d'une double protection à partir des valeurs de protection estimées (APV) de chacune des protections utilisées en combinaison. Elle présente une précision meilleure que 3 dB sur le SNR, 2 dB sur l'indice H et 4 dB sur les indices M et L. Cette méthode, la seule existante, est plus complexe que la combinaison proposée en 1990 par Damongeot et al. mais l'utilisation des indices d'atténuation H, M ou L permet d'évaluer avec une meilleure précision l'efficacité de la protection.

7. Références bibliographiques

- [1] A. Damongeot, R. Lataye, et A. Kusy, « An empirical formula for predicting the attenuation given by double hearing protection (earplugs and earmuffs) », *Applied Acoustics*, vol. 28, n° 3, p. 169- 175, 1989, doi: 10.1016/0003-682X(89)90091-1.
- [2] EN 458, « Hearing protectors - Recommendations for selection, use, care and maintenance - Guidance document ». Avril 2016.
- [3] CSA Z94.2-94, « Protecteurs auditifs — Performances, sélection, entretien et utilisation ». 1994.
- [4] E. H. Berger, « Laboratory Attenuation of Earmuffs and Earplugs Both Singly and in Combination », *American Industrial Hygiene Association Journal*, vol. 44, n° 5, p. 321- 329, mai 1983, doi: 10.1080/15298668391404905.
- [5] R. D. Rawlinson, P. D. Wheeler, G. Custard, « The acoustical attenuation of some combinations of earplugs and earmuffs », *The Annals of Occupational Hygiene*, août 1987, doi: 10.1093/annhyg/31.3.299.
- [6] ISO 4869-1, « Acoustics — Hearing protectors — Part 1: Subjective method for the measurement of sound attenuation ». 2018.
- [7] C.-C. Liu, J. Pekkarinen, et J. Starck, « Application of the probe microphone method to measure attenuation of hearing protectors against high impulse sound levels », *Applied Acoustics*, vol. 27, n° 1, p. 13- 25, 1989, doi: 10.1016/0003-682X(89)90042-X.
- [8] ISO 11904-1, « Acoustics — Determination of sound immission from sound sources placed close to the ear — Part 1: Technique using a microphone in a real ear (MIRE technique) ». ISO, 2003.
- [9] S. M. Abel et N. M. Armstrong, « The combined sound attenuation of earplugs and earmuffs », *Applied Acoustics*, vol. 36, n° 1, p. 19- 30, 1992, doi: 10.1016/0003-682X(92)90071-Y.
- [10] A. Behar et H. Kunov, « Insertion loss from using double protection », *Applied Acoustics*, vol. 57, n° 4, p. 375- 385, août 1999, doi: 10.1016/S0003-682X(98)00053-X.
- [11] ISO 11904-2, « Acoustics — Determination of sound immission from sound sources placed close to the ear — Part 2: Technique using a manikin ». ISO, 2021.
- [12] P. Henrique Trombetta Zannin et S. N. Y. Gerges, « Effects of cup, cushion, headband force, and foam lining on the attenuation of an earmuff », *International Journal of*

Industrial Ergonomics, vol. 36, n° 2, p. 165-170, févr. 2006, doi: 10.1016/j.ergon.2005.09.004.

- [13] A. Nakashima, « Comparison of different types of hearing protection devices for use during weapons firing », *Journal of Military, Veteran and Family Health*, vol. 1, n° 2, p. 43- 51, nov. 2015, doi: 10.3138/jmvfh.3076.
- [14] H. Nélisse, F. C. Sgard, M.-A. Gaudreau, et T. Padois, « Attenuation of dual hearing protection: Measurements and finite-element modeling », *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 141, n° 5, p. 3633-3633, mai 2017, doi: 10.1121/1.4987819.
- [15] Y. Luan, O. Doutres, H. Nélisse, et F. Sgard, « Experimental study of earplug noise reduction of a double hearing protector on an acoustic test fixture », *Applied Acoustics*, vol. 176, p. 107856, mai 2021, doi: 10.1016/j.apacoust.2020.107856.
- [16] N. Trompette, T. Bonzom, J. Marchand, et P. Chevret, « Noise attenuation provided by a combination of earplugs and earmuffs: Revised assessment », *Applied Acoustics*, vol. 202, p. 109167, janv. 2023, doi: 10.1016/j.apacoust.2022.109167.
- [17] A. Kusy, « Note Documentaire 2295 - Evaluation de l'affaiblissement acoustique réel in situ des protecteurs individuels contre le bruit : Etude bibliographique. » INRS, septembre 2010.
- [18] E. H. Berger, R. W. Kieper, et D. Gauger, « Hearing protection: Surpassing the limits to attenuation imposed by the bone-conduction pathways », *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 114, n° 4, p. 1955-1967, oct. 2003, doi: 10.1121/1.1605415.

Annexe 1 : tableaux des données d'atténuation en bandes d'octaves issues des publications et des APV₈₄ en bandes d'octaves recalculées

Protections auditives seules, mesures :

Désignation de la protection auditive	Octave	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz	SNR ₈₄	H ₈₄	M ₈₄	L ₈₄
Berger [4] Bilsom Soft	Attén. moyenne Mf	12.6	12.6	13.7	16.2	18.8	24.6	32.2	34	17	20	13	10
	Ecart-type Sf	5.3	5.3	5.8	6.3	6	4	4.4	4.5				
Berger [4] Prémoulé V51R	Attén. moyenne Mf	22.9	22.9	22	23.7	25.7	29.9	31.8	31.6	24	24	21	19
	Ecart-type Sf	4.3	4.3	5	5.7	5.3	3.8	6.3	9.2				
Berger [4] EAR Classic "partielle"	Attén. moyenne Mf	21.8	21.8	22.4	24.1	26	30.6	40.9	39	25	28	21	20
	Ecart-type Sf	3	3	4.3	5.2	5.8	2.2	2.5	5.4				
Berger [4] EAR Classic "standard"	Attén. moyenne Mf	31.4	31.4	33.3	36.8	36.6	32.5	43.4	44.8	33	32	31	30
	Ecart-type Sf	3.6	3.6	4.4	5.9	6.1	3.3	2.8	3.7				
Berger [4] Serre-tête "faible V"	Attén. moyenne Mf	12.9	12.9	18.2	24.3	33.5	35.9	38.1	35.3	27	33	24	17
	Ecart-type Sf	2.2	2.2	2.9	3.4	2.7	3.4	2.6	3.9				
Berger [4] Serre-tête "large V"	Attén. moyenne Mf	19.8	19.8	29.2	39.4	43.2	35.5	30.7	32.9	32	30	32	26
	Ecart-type Sf	2.7	2.7	2.8	3.1	3.3	2.3	3	3.4				
Berger [4] Serre-tête "Plomb"	Attén. moyenne Mf	32.2	38	48.3	46.7	38.4	48.1	44.6	32.9	37	36	37	38
	Ecart-type Sf	4.5	2.8	4.3	4.3	3.8	2.3	4.8	3.4				
Rawlinson [5] Bouchon EAR 1er test	Attén. moyenne Mf	27.5	27.8	28	29.3	29.6	32.1	41.4	44.7	27	28	23	22
	Ecart-type Sf	6.9	6.4	6.6	8	7.2	5.2	3.4	6				
Rawlinson [5] Bouchon EAR 2nd test	Attén. moyenne Mf	23.1	25.3	27	29.6	30.5	31.6	39	38.8	26	28	23	19

	Ecart-type Sf	11	11.4	10.1	9.7	7.6	4.5	4.3	7				
Rawlinson [5] Bouchon moulé individuel	Attén. moyenne Mf	19	14.4	13.6	11	11.8	21.7	27.9	27.5	12	14	8	7
	Ecart-type Sf	9.1	6.6	5.9	5.1	5.5	6.1	7.5	10				
Rawlinson [5] Bouchon V5IR	Attén. moyenne Mf	17.4	16.8	16.1	15.1	17.3	24.3	22.5	23.9	11	13	7	6
	Ecart-type Sf	11	11.6	10.9	11	10.6	8.6	7.5	9.6				
Rawlinson [5] Bouchon Bilsom Soft	Attén. moyenne Mf	17.5	17.8	19.2	19.8	21.1	27.2	33.8	32.3	19	21	15	12
	Ecart-type Sf	8.8	8.8	8.5	7.2	6.7	4.3	7.1	9.3				
Rawlinson [5] Serre-tête Racal Sonomuff	Attén. moyenne Mf	19.2	21	27	30.1	37.9	37.3	39.7	38.3	32	35	30	24
	Ecart-type Sf	3.4	3.4	3.6	4.6	3.2	3.2	4.1	5				
Rawlinson [5] Serre-tête Bilsom Viking	Attén. moyenne Mf	14.5	13.5	20.5	33	34.1	35.9	36.7	33	28	31	26	17
	Ecart-type Sf	4.8	3.9	4.2	5.4	5.1	4.4	5.3	6.4				
Rawlinson [5] Serre-tête Safir Junior	Attén. moyenne Mf	9.3	8.3	9	15.7	25.4	29.9	36.8	30.2	18	25	15	8
	Ecart-type Sf	5.2	5.4	4.2	4.7	4.7	5	6.1	5				
Rawlinson [5] Serre-tête Racal Auralguard	Attén. moyenne Mf	18.3	16.9	15.6	23.6	34.4	33.5	40.3	34.7	27	32	24	17
	Ecart-type Sf	4.1	2.9	2	2.5	2.9	3.4	4.5	3.2				
Trompette [16] Bouchons 3M E.A.R. ULTRAFIT	Attén. moyenne Mf	22.1	21.8	21.6	20.9	24.4	28.8	32.7	38.3	22	24	19	17
	Ecart-type Sf	9.3	7.4	5.6	5.6	5.9	6.3	5	6.4				
Trompette [16] Bouchons 3M E.A.R. NEONS	Attén. moyenne Mf	22.7	24.2	24.1	24.8	26.3	31.4	39.6	43.9	25	27	21	20
	Ecart-type Sf	5.9	5.2	5.2	6.2	5.8	4.2	4.1	4.5				
Trompette [16] Serre-tête OPTIME III	Attén. moyenne Mf	13	16.6	23.9	33.4	34.7	34.2	31.8	32.7	28	29	27	18
	Ecart-type Sf	10	5.6	4.7	4	4.7	3.3	4.7	5.7				
Trompette [16] Serre-tête Clarity C1	Attén. moyenne Mf	13.4	12.3	17.3	24.1	27.5	30.4	27.7	29.9	23	26	21	14
	Ecart-type Sf	7.6	5.1	5.2	4.2	2.9	3.2	3.8	4.6				

Combinaisons, mesures :

Désignation de la combinaison	Octave	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz	SNR ₈₄	H ₈₄	M ₈₄	L ₈₄
Berger [4] Bilsom Soft + Serre-tête "faible V"	Attén. moyenne Mf	21.6	21.6	29.8	38.1	38	38	48.6	46.5	34	38	32	23
	Ecart-type Sf	7	7	6.2	5.2	4.4	3	4.5	3.4				
Berger [4] Prémoulé V51R + Serre-tête "faible V"	Attén. moyenne Mf	33.1	33.1	37.6	42	40.6	38.9	49.4	45.6	38	37	35	32
	Ecart-type Sf	6.6	6.6	6.2	7.4	5.8	3.6	3.6	4.4				
Berger [4] EAR Classic "partielle" + Serre-tête "faible V"	Attén. moyenne Mf	30.9	30.9	34.1	40.8	40.3	38	49.7	46.6	38	37	35	32
	Ecart-type Sf	3.8	3.8	4.3	5.1	5	3.6	4.8	2.9				
Berger [4] EAR Classic "standard" + Serre-tête "faible V"	Attén. moyenne Mf	37.5	37.5	41.8	51.3	47.8	37.3	49.1	47.7	40	36	39	38
	Ecart-type Sf	4.6	4.6	5.1	6.7	4.2	3.5	5.5	3.2				
Berger [4] Prémoulé V51R + Serre-tête "large V"	Attén. moyenne Mf	33.6	33.6	35.4	42.9	39.6	37.6	49.6	46	37	37	34	32
	Ecart-type Sf	5.9	5.9	6.2	8	5.9	3.1	3.6	4.1				
Rawlingson [5] Bouchon EAR 1er test + Serre-tête Safir Junior	Attén. moyenne Mf	28.8	33.5	38.3	46	41.9	38.2	46.5	46.1	38	37	36	31
	Ecart-type Sf	8.9	10	8.3	7.6	4.9	3.8	4.3	4.1				
Rawlingson [5] Bouchon EAR 1er test + Serre-tête Racal Auralguard	Attén. moyenne Mf	30.5	33.3	36.1	43	41.7	39.9	48.6	44	37	38	35	30
	Ecart-type Sf	6.2	8.2	8.4	9	6.4	4	3.8	5.7				
Rawlingson [5] Bouchon EAR 1er test + Serre-tête Racal Sonomuff	Attén. moyenne Mf	32.9	35	36.2	35.9	40.7	39.9	49	48.4	35	37	31	29
	Ecart-type Sf	7.4	5.8	7.2	10.1	6.7	4.3	2.8	5.5				
Rawlingson [5] Bouchon EAR 2nd test + Serre-tête Racal Sonomuff	Attén. moyenne Mf	29.2	36.3	38.3	38.1	42.1	37.2	46	46.5	36	37	33	31
	Ecart-type Sf	8.3	7.6	7.4	10.1	4.5	3	3.6	4.5				

Rawlingson [5] Bouchon EAR 1er test + Serre-tête Bilsom Viking	Attén. moyenne Mf	27.3	30.6	41	47.9	43	38.7	47.6	47.8	39	38	37	33
	Ecart-type Sf	4.9	6.6	5.9	7	6	3.5	3.5	4				
Rawlingson [5] Moulé individuel + Serre-tête Racal Auralguard	Attén. moyenne Mf	26.1	22.9	21.7	25.6	30.7	36	47.6	45.9	28	32	24	20
	Ecart-type Sf	8.6	5	4.5	6	4.1	4.3	3.3	5.5				
Rawlingson [5] Bouchon V5IR + Serre-tête Safir Junior	Attén. moyenne Mf	22	25.1	25.7	30.6	35.4	37.3	46.9	43.8	28	34	25	19
	Ecart-type Sf	6.7	10	10.3	9	7.3	4.3	3.5	5.9				
Rawlingson [5] Bouchon V5IR + Serre-tête Racal Sonomuff	Attén. moyenne Mf	24.6	29.4	31.1	29	36.8	37.4	47.5	45.3	33	36	29	26
	Ecart-type Sf	5	6.8	4.2	4.6	5.8	3	3.3	3.9				
Rawlingson [5] Bouchon Bilsom Soft + Serre-tête Safir Junior	Attén. moyenne Mf	18.2	21.1	26.1	34.3	38.3	38.1	47.6	45.5	29	36	26	18
	Ecart-type Sf	7.6	8.6	11.3	8	5.6	3.9	4.2	3				
Rawlingson [5] Bouchon Bilsom Soft + Serre-tête Racal Sonomuff	Attén. moyenne Mf	24.2	28	32.5	29.5	36.5	38.5	49.1	46.6	33	36	30	27
	Ecart-type Sf	7	6.6	3.6	4.2	5.5	4.3	4.1	4.4				
Trompette [16] Bouchons ULTRAFIT + Serre-tête Clarity C1	Attén. moyenne Mf	27.8	27.6	33.6	33.1	34.1	37.5	47.8	49.6	34	35	30	26
	Ecart-type Sf	7.7	8.5	6.6	4.9	4.8	3.4	2.4	5.2				
Trompette [16] Bouchons ULTRAFIT + Serre-tête OPTIME III	Attén. moyenne Mf	26.5	29.8	31.8	36.9	34.9	37.5	48.9	47.5	36	36	33	29
	Ecart-type Sf	5.9	5	4.4	4.6	3.1	3.8	2.8	4.8				
Trompette [16] Bouchons NEONS + Serre-tête Clarity C1	Attén. moyenne Mf	27.1	27.1	34.9	38.9	36.2	37.6	48.4	49.1	36	35	33	28
	Ecart-type Sf	7.8	7.2	3.2	6.7	3.8	4.8	2.8	4.8				
Trompette [16] Bouchons NEONS + Serre-tête OPTIME III	Attén. moyenne Mf	27.5	31	33.3	38.8	38.1	39.1	49.1	47.7	38	38	35	32
	Ecart-type Sf	5.1	4.3	3.4	3.6	3.8	3.3	2.6	4				

Combinaisons, calculs pour les APV :

Désignation de la combinaison	Octave	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz	SNR ₈₄	H ₈₄	M ₈₄	L ₈₄
Bilsom Soft + Serre-tête "faible V"	APV ₈₄ Recalculée	15.9	17.5	21.6	28.4	31.1	33.9	40.8	40.7	33	36	30	24
Prémoulé V51R + Serre-tête "faible V"	APV84 Recalculée	23.5	24.7	27.4	30.7	33.3	34.8	41.3	41	36	37	33	29
EAR Classic "partielle" + Serre-tête "faible V"	APV84 Recalculée	23.9	25	28.1	31.2	33.2	35.1	42.4	42	36	37	33	30
EAR Classic "standard" + Serre-tête "faible V"	APV84 Recalculée	30.6	31.2	34.9	39.2	39.8	35	43.1	42.9	40	37	38	36
Prémoulé V51R + Serre-tête "large V"	APV84 Recalculée	26.8	27.6	30.9	34.9	38.4	35.2	40.5	40.4	38	37	36	33
Bouchon EAR 1er test + Serre-tête Safir Junior	APV 84% Recalculée	21.9	23.5	26.6	33.5	33.6	33.6	41.1	40.9	36	36	33	29
Bouchon EAR 1er test + Serre-tête Racal Auralguard	APV 84% Recalculée	25.9	27.3	29.7	32.7	35	34.3	42.3	42.1	37	37	34	32
Bouchon EAR 1er test + Serre-tête Racal Sonomuff	APV 84% Recalculée	27.8	29.3	32.6	32.1	36.7	34.9	42.7	42.6	38	37	35	33
Bouchon EAR 2nd test + Serre-tête Racal Sonomuff	APV 84% Recalculée	22.9	25	30.1	31.2	37	35	42.6	42.3	37	37	35	31
Bouchon EAR 1er test + Serre-tête Bilsom Viking	APV 84% Recalculée	25	26.4	30.3	32.6	33.8	34.6	42	41.8	37	37	34	31
Bouchon moulé individuel + Serre-tête Racal Auralguard	APV 84% Recalculée	17.2	17.9	20.6	24.4	26.4	32.6	39.5	39.2	30	33	27	23
Bouchon V51R + Serre-tête Safir Junior	APV 84% Recalculée	11.2	12.6	16.1	23.4	25.4	32	37.9	37.5	28	32	25	18

Bouchon V5IR + Serre-tête Racal Sonomuff	APV 84% Recalculée	17.1	18.4	22.1	22	28.5	33.4	39.5	39.4	30	34	27	23
Bouchon Bilsom Soft + Serre-tête Safir Junior	APV 84% Recalculée	13.7	15.6	19.8	30.7	29.8	33.1	39.6	39.1	32	35	29	22
Bouchon Bilsom Soft + Serre-tête Racal Sonomuff	APV 84% Recalculée	19.6	21.3	25.9	29.3	32.9	34.5	41.2	40.9	35	36	32	27
Bouchons 3M E.A.R. ULTRAFIT + Serre-tête Clarity C1	APV 84% Recalculée	18.5	21.1	25.5	30.2	30.2	33.3	39.9	40.1	34	35	31	27
Bouchons 3M E.A.R. ULTRAFIT + Serre-tête OPTIME III	APV 84% Recalculée	18.9	22.5	27.6	30.2	31.7	33.9	40.4	40.6	35	36	32	28
+ Serre-tête Clarity C1 Bouchons 3M E.A.R. NEONS	APV 84% Recalculée	21.2	23.9	27.4	31.6	31.5	34.2	40.7	40.9	35	36	32	29
Bouchons 3M E.A.R. NEONS + Serre-tête OPTIME III	APV 84% Recalculée	21.5	25.3	29.5	31.6	33	34.8	41.2	41.4	36	36	33	30

Tableau des écarts calcul – mesure pour les indices globaux :

Désignation de la combinaison	Indices mesurés de la combinaison				Indices de la combinaison calculés à partir des formules (2) à (5)				Ecart mesure / calcul			
	SNR	H	M	L	SNR	H	M	L	SNR	H	M	L
Bilsom Soft + Serre-tête "faible V"												
Prémoulé V51R + Serre-tête "faible V"	34	38	32	23	33	36	30	24	1	2	2	-1
EAR Classic "partielle" + Serre-tête "faible V"	38	37	35	32	36	37	33	29	2	0	2	3
EAR Classic "standard" + Serre-tête "faible V"	38	37	35	32	36	37	33	30	2	0	2	2
Prémoulé V51R + Serre-tête "large V"	40	36	39	38	40	38	38	36	0	-2	1	2
Bouchon EAR 1er test + Serre-tête Safir Junior	37	37	34	32	38	37	36	33	-1	0	-2	-1
Bouchon EAR 1er test + Serre-tête Racal Auralguard	38	37	36	31	36	36	33	29	2	1	3	2
Bouchon EAR 1er test + Serre-tête Racal Sonomuff	37	38	35	30	37	37	34	32	0	1	1	-2
Bouchon EAR 2nd test + Serre-tête Racal Sonomuff	35	37	31	29	38	37	35	33	-3	0	-4	-4
Bouchon EAR 1er test + Serre-tête Bilsom Viking	36	37	33	31	37	38	35	31	-1	-1	-2	0
Bouchon moulé individuel + Serre-tête Racal Auralguard	39	38	37	33	37	37	34	31	2	1	3	2
Bouchon V51R + Serre-tête Safir Junior	28	32	24	20	30	33	27	23	-2	-1	-3	-3
Bouchon V51R + Serre-tête Racal Sonomuff	28	34	25	19	28	32	25	18	0	2	0	1

Bouchon Bilsom Soft + Serre-tête Safir Junior	33	36	29	26	30	34	27	23	3	2	2	3
Bouchon Bilsom Soft + Serre-tête Racal Sonomuff	29	36	26	18	32	35	29	22	-3	1	-3	-4
Bouchons 3M E.A.R. ULTRAFIT + Serre-tête Clarity C1	33	36	30	27	35	36	32	27	-2	0	-2	0
Bouchons 3M E.A.R. ULTRAFIT + Serre-tête OPTIME III	34	35	30	26	34	35	31	27	0	0	-1	-1
+ Serre-tête Clarity C1 Bouchons 3M E.A.R. NEONS	36	36	33	29	35	36	32	28	1	0	1	1
Bouchons 3M E.A.R. NEONS + Serre-tête OPTIME III	36	35	33	28	35	36	32	29	1	-1	1	-1
Bilsom Soft + Serre-tête "faible V"	38	38	35	32	36	37	33	30	2	1	2	2
Ecart moyen									0.2	0.3	0.2	0.1
Ecart maximum									3	2	4	4