

PARCOURS MASTER 2
ATiAM

Parcours multi-mentions du Master Sciences et Technologies
Université Pierre et Marie Curie - Paris 6
en collaboration avec TELECOM ParisTech et l'Ircam



MASTER **ATiAM**
PROMOTION 2013-2014
Rémi PONÇOT

RAPPORT DE STAGE

Mesures normées de l'atténuation de casques actifs

NON CONFIDENTIEL

Département UPMC	: Sciences De l'Ingénieur
Responsable du stage	: Benoit FABRE
Directeur de stage	: Pierre GUIU
Dates du stage	: 10 mars 2014 au 10 septembre 2014
Nom et adresse de l'organisme	: <i>Parrot</i> 174 quai de Jemmapes 75010 Paris FRANCE

Résumé

Les travaux de ce stage se sont déroulés du 10 mars 2014 au 10 août 2014, dans le cadre d'un projet de fin d'étude du master 2 ATIAM au sein de l'entreprise Parrot, visant à développer de nouvelles méthodes perceptives pour mesurer l'atténuation active de casques audio.

De plus en plus de casques audio aujourd'hui sont à réduction active de bruit. La méthode standardisée pour mesurer l'atténuation de casques audio passifs est une méthode perceptive, **REAT** qui compare les seuils d'auditions pour plusieurs fréquences avant et après mise en place du casque. Cette méthode ne peut pas s'appliquer à des casques à contrôle actif et c'est la méthode objective **MIRE**, comparant les champs acoustiques dans le canal auditif avant et après disposition du casque, qui lui substitue généralement. Cette dernière présente l'inconvénient de ne pas prendre en compte les aspects perceptifs.

Des méthodes perceptives pour mesurer l'atténuation active ont déjà été développées mais jamais standardisées. Dans ce rapport, nous introduisons une nouvelle méthode perceptive développée pendant le stage, pour mesurer l'atténuation active de casques audio. Celle-ci présente l'originalité de prendre en compte d'autres mécanismes perceptifs que les méthodes existantes, et nous montrons comment celle-ci a été développée et améliorée afin de créer une méthode robuste pouvant aujourd'hui être adoptée.

Nous présentons les résultats de différentes méthodes et montrons qu'il existe une différence entre l'atténuation active mesurée par la méthode **MIRE** et celle estimée par notre nouvelle méthode. Enfin, nous proposons un dernier test pour connaître la méthode parmi ces deux qui finalement représente le mieux l'atténuation perçue par l'utilisateur.

Abstract

Work of this internship proceeded from March 10th, 2014 to August 10th, 2014, as a second part of the master ATIAM. The research project took place at Parrot in France, and aimed at developing new perceptive methods to measure Active Insertion Loss of headsets.

More and more headsets sold in the market are nowadays active noise canceling devices. The standard method to measure the attenuation of passive hearing protectors is a perceptive method called **REAT**, which compares at various frequencies auditory thresholds before and after putting on the headset. The method cannot be applied to active noise canceling devices due to inherent electric noise. The objective method **MIRE** is therefore commonly used for such devices. It compares with a microphone the acoustic field into the ear canal before and after insertion of the device. This method has the disadvantage of not taking into account perceptive aspects.

Perceptive methods to measure active attenuation have already been developed but have never been standardized. In this report, we introduce a new method to measure active attenuation of headsets developed during the internship. This method has the originality of taking into account different perceptive mechanisms than other perceptive methods previously developed. We will show the different steps of the development and establishment of this perceptive method, which can now be used as an independent test.

We will present and compare the results of different methods, and will then concentrate on the differences between the active attenuation measured with **MIRE** technique and the one estimated with this new method. We will finally suggest a last test to determine which one of these two methods is closer to perceived attenuation by the user.

Table des matières

Présentation du sujet	4
1 Résumé des différentes mesures	6
1.1 Méthodes existantes	6
1.1.1 Méthodes physiques	6
1.1.1.1 Microphone In Real Ear (MIRE)	6
1.1.1.2 Acoustic Test Fixture (ATF)	8
1.1.2 Méthodes psycho-physiques	9
1.1.2.1 Real Ear Attenuation at Threshold (REAT)	9
1.1.2.2 Loudness Balance Method (LBM)	10
1.1.2.3 Masked-Threshold Method (MTM)	11
1.1.3 Bilan sur les méthodes existantes	11
1.2 Nouvelles méthodes	12
1.2.1 Timbre Adjustment Method (TAM)	12
1.2.2 Loudness Balance Method modifiée	14
1.2.3 Méthode hybride TAM et LBM	14
1.2.4 Autres idées (pas testées)	15
2 Expériences et Résultats	17
2.1 Setup expérimental	17
2.1.1 Norme ANSI	17
2.1.2 Caractérisation du champ acoustique dans la salle	18
2.1.2.1 Un champ acoustique homogène	18
2.1.2.2 Un champ acoustique diffus	18
2.2 Mesures ATF	19
2.2.1 Difficultés rencontrées	19
2.2.2 Résultats	21
2.3 Mesures MIRE	23
2.3.1 Choix du microphone	23
2.3.2 Importance du fitting et du choix des sujets	24
2.3.3 Résultats	25
2.4 Mesures TAM	28
2.4.1 Choix du timbre et des sujets	28
2.4.2 Résultats	29
2.4.3 Biais possible	30
3 Analyse des Résultats	32
3.1 Différences entre les méthodes	32

3.1.1	Différences entre MIRE et ATF	32
3.1.2	Différences entre TAM et MIRE	32
3.2	Test comparatif entre MIRE et TAM	35
3.2.1	Test comparatif entre 2 méthodes	35
3.2.2	résultats	37
3.3	Amélioration de la méthode TAM	37
3.3.1	Comparaison entre TAM et LBM modifiée	38
3.3.2	Méthode hybride	40
3.4	Test comparatif entre MIRE et la méthode hybride	42
3.5	Conclusion	44
	Pour aller plus loin	45
	Références	46
	Annexes	50
A	Mesure de l'atténuation totale par ajustement du timbre	50
B	Détails techniques sur la mise en place du test comparatif	51
C	Problème du microphone <i>ER-7C séries B</i> pour les mesures MIRE	52

Présentation du sujet

La plus-value de toute protection auditive est déterminée par sa capacité à atténuer le bruit extérieur. Les casques et écouteurs audios industriels, qu'ils soient supra, circum aural ou intra sont aussi évalués sur leur performance d'atténuation du bruit. Il est donc important de pouvoir mesurer précisément l'atténuation d'un casque pour pouvoir comparer les produits sur le marché et leur donner une note sur leur atténuation du bruit extérieur.

Que mesure-t-on donc ? E.H. Berger définit en présentant la figure (1) [1], la différence entre mesure de "Insertion Loss" et mesure de "Noise reduction", que nous appellerons respectivement mesure de perte après insertion et mesure de réduction de bruit. Une mesure de réduction de bruit compare les niveaux acoustiques entre l'intérieur du canal auditif et l'extérieur de l'oreille, après la protection auditive. Elle prend donc en compte la fonction de transfert de l'oreille, en plus de la capacité réelle d'atténuation de la protection auditive. En pratique, il est préférable de mesurer la différence entre les niveaux acoustiques à l'intérieur du canal auditif avant et après mise en place de la protection auditive ou du casque audio.

Les organismes **ANSI** (American National Standards Institute) et **ISO** (International Organization for Standardization) ont défini des mesures standards pour évaluer la qualité d'atténuation de ces produits. La plus répandue est la méthode **REAT** (Real Attenuation At Threshold), mesure perceptive qui consiste à déterminer pour plusieurs fréquences les seuils de détection sans port et avec port du casque audio ou de la protection auditive. Elle présente l'avantage de rendre compte d'effets comme l'ostéophonie[2], [3], [4], [5] ce qui permet une mesure de l'atténuation réellement perçue. Elle nécessite en revanche des conditions propices à des mesures de seuils d'audition, c'est à dire un environnement très peu bruyant. Une autre méthode consiste à mesurer directement avec un microphone les niveaux acoustiques au point A sur la figure 1, avant et après mise en place du casque audio ou protection auditive. Cette méthode **MIRE** (Microphone In Real Ear) présente l'avantage de ne pas nécessiter de chambre parfaitement sourde comme **REAT**, mais ne prend aucun aspect perceptif en compte. Elle présente aussi l'inconvénient de ne pas pouvoir être utilisée pour des écouteurs intra, la mise du microphone empêchant d'introduire complètement l'écouteur intra dans l'oreille.

Depuis à peu près une décennie, les protections auditives ainsi que les casques audios à contrôle actif du bruit se sont considérablement développés. Ces produits présentent l'avantage de garantir une atténuation basses fréquences ($f < 600$ Hz) de qualité par rapport aux systèmes passifs qui n'atténuent presque rien à ces fréquences.

Pour ces produits, nous pouvons ainsi distinguer 3 types d'atténuation :

1. L'atténuation passive, lorsque le système actif n'est pas mis en fonction
2. L'atténuation totale, lorsque le système actif est mis en fonction
3. L'atténuation active, différence entre les deux atténuations précédentes

Les systèmes actifs comportent naturellement un bruit électrique caractéristique introduit par la chaîne de traitement du signal en amont des haut-parleurs qui rend impossible la méthode de mesure **REAT**. Les seuils mesurés lorsque le système est mis en fonction surestiment le niveau réel d'atténuation du casque ou de la protection. C'est pour cette raison qu'aujourd'hui, alors que les mesures normalisées de l'atténuation passive de casques audios et de protections auditives doivent être faites avec la méthode **REAT**, les mesures de l'atténuation active doivent elles être faites avec la méthode **MIRE**.

D'autres méthodes pour mesurer l'atténuation active en particulier existent et seront présentées dans les sections (1.1.1) et (1.1.2).

Devant ces nouvelles technologies, le but du stage est donc à la fois de comprendre et d'analyser les différences entre les méthodes existantes, ainsi que de développer une nouvelle méthode

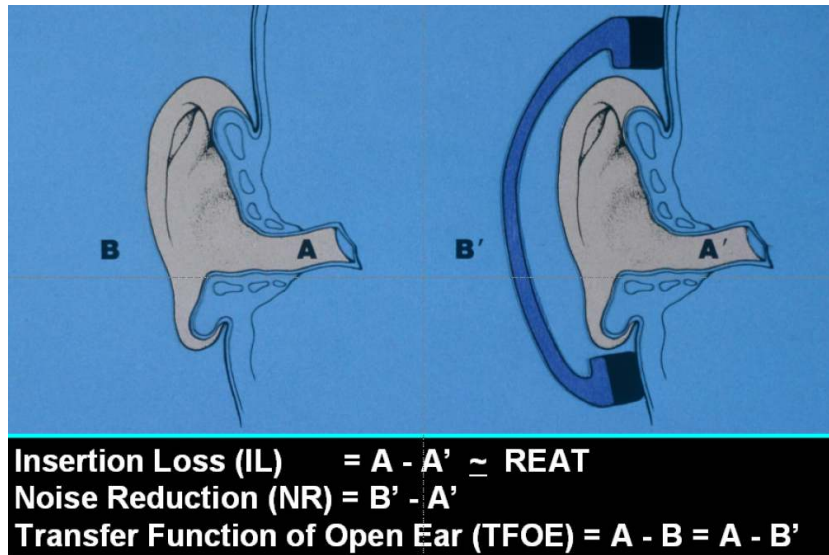


FIGURE 1 – Comparaison entre mesure de perte après insertion et mesure de réduction de bruit

psycho-physique qui permettrait contrairement à **REAT**, de mesurer l'atténuation active de casques et protections auditives à contrôle actif du bruit.

Le stage est divisé en trois parties. La première partie consiste à présenter toutes les méthodes qui existent aujourd'hui pour mesurer l'atténuation de casques audio ou de protections auditives, ainsi que les nouvelles méthodes développées pendant le stage. Dans la deuxième partie, nous présentons les différents protocoles expérimentaux établis pour les mesures testées, et exposons les résultats obtenus. Enfin, nous donnons une analyse de ces résultats dans la troisième et dernière partie.

1 Résumé des différentes mesures

1.1 Méthodes existantes

Comme il a été introduit dans la présentation du stage, il existe de nombreuses méthodes pour mesurer l'atténuation de casques audios. Nous distinguons donc les mesures physiques, qui déterminent une perte après insertion grâce à la captation de son par des microphones, des mesures psycho-physiques qui mettent des aspects perceptifs en jeu.

1.1.1 Méthodes physiques

1.1.1.1 Microphone In Real Ear (**MIRE**)

Cette méthode consiste à mesurer le champ acoustique en réponse à un bruit (rose en général) dans le canal auditif de plusieurs sujets avant et après mise en place du casque.

Plus précisément, le bruit rose est envoyé sur un système 5.1 dont on peut voir les 4 HPs sur la figure (2), montrant le setup commun à toutes les mesures. Les hauts-parleurs doivent être positionnés de façon à obtenir au point de mesure un champ acoustique homogène et diffus comme c'est défini dans la norme **ANSI**[6], [7].

Quand la bonne configuration est trouvée, le sujet se place au point de mesure (sur la chaise sur la figure (2(b))) et un microphone omnidirectionnel représenté sur la figure (3) est inséré dans son oreille. 3 mesures sont ensuite réalisées.

- Une première mesure du champ acoustique L_0 ¹ sans le casque, représentant la fonction de transfert de l'oreille
- Une deuxième mesure avec le casque en ANC off (Active Noise Cancellation off : sans contrôle actif) du champ acoustique L_1
- Une dernière mesure avec le casque en ANC on du champ acoustique L_2

Les atténuations passive (PIL : Passive Insertion Loss), active (AIL : Active Insertion Loss) et totale (TA : Total Attenuation) sont ensuite calculées comme suit :

- $PIL = L_1 - L_0$ (note²)
- $AIL = L_2 - L_1$
- $TA = L_2 - L_0$

Les mesures doivent être réalisées sur 10 sujets puis moyennées pour obtenir une mesure **MIRE** selon la norme **ANSI**[6].

La méthode MIRE présente l'avantage contrairement à **REAT** de ne pas nécessiter d'environnement très peu bruyant d'une part, mais aussi d'être relativement rapide à mettre en place. En revanche, elle ne rend pas compte de l'ostéophonie, ou Bone Conduction en anglais, qui manifeste la conduction du son par les tissus et les os. L'oreille interne n'est en effet pas stimulée uniquement par le son se propageant à l'intérieur du canal auditif mais aussi par les vibrations des tissus et os du corps. S. Stenfelt précise en effet dans les articles [4] et [3] qu'en pratique les protections auditives type casques ou intra ne peuvent pas atténuer plus de 50 à 60 dB en hautes fréquences à cause de cet effet. Or, pour des casques anti-bruit avec une bonne atténuation passive, les 60 dB d'atténuation à l'intérieur du canal auditif peuvent être dépassés pour des fréquences d'environ 10 kHz, ce qui ne représente par contre pas l'atténuation perçue.

Cette différence entre mesure d'atténuation **MIRE** et atténuation perçue (voir méthode

1. périodogramme en dB de la réponse obtenu estimé par la fonction pwelch de matlab.

2. ou $PIL = -(L_1 - L_0)$ selon les sources. Pour éviter les problèmes de signe, nous parlerons d'atténuation ou d'amplification en donnant des valeurs absolues.

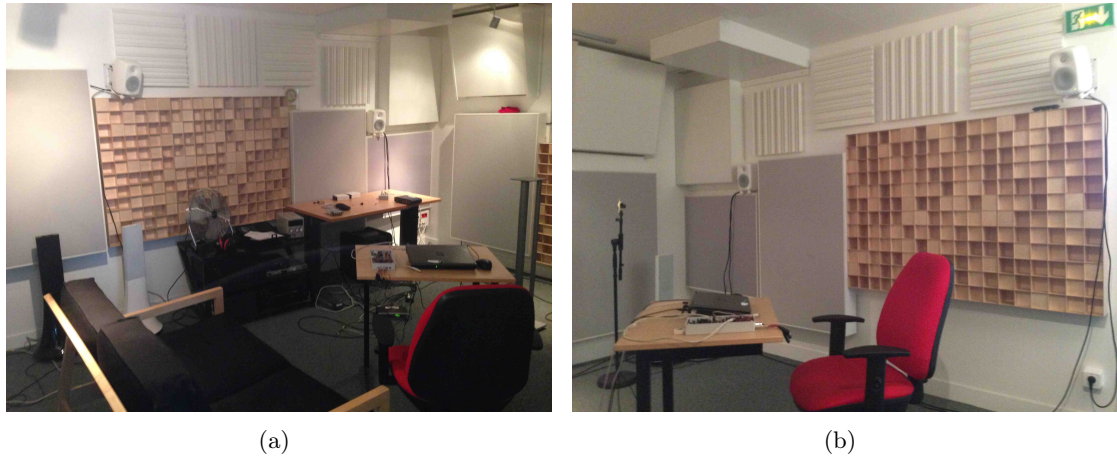


FIGURE 2 – Setup mesures atténuation : (a) Vue n ° 1 ; (b) Vue n ° 2.

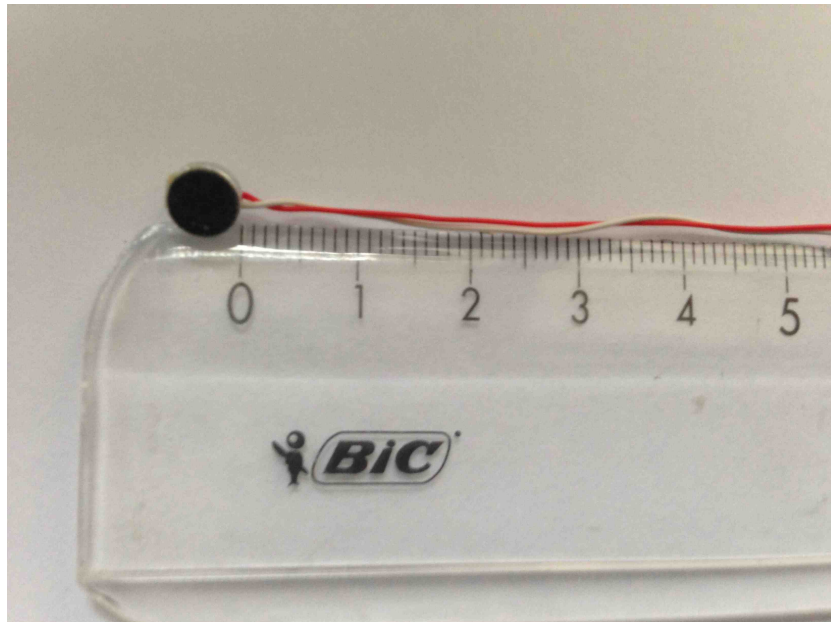


FIGURE 3 – Microphone **MIRE** MEO 5P215

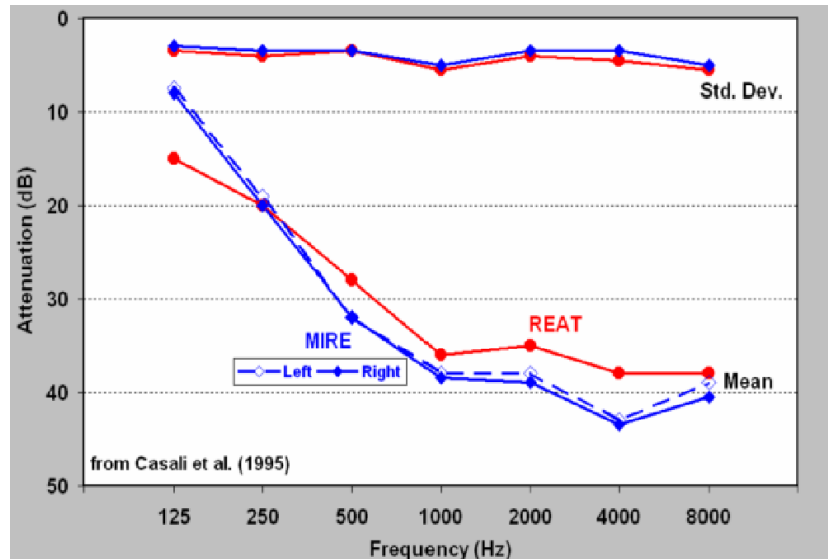


FIGURE 4 – Différence entre une mesure **MIRE** et une mesure **REAT**

REAT dans la section (1.1.2.1)) peut être examinée sur la figure (4). La mesure **MIRE** est plus élevée que **REAT** entre 1 kHz et 8 kHz et surestime donc l'atténuation réelle (perçue) pour ces fréquences.

1.1.1.2 Acoustic Test Fixture (**ATF**)

La deuxième mesure physique est la méthode **ATF**, qui signifie Acoustic Test Fixture et fait référence aux têtes et oreilles artificielles. La méthode est spécifiée par la même norme **ANSI**[6] qui spécifie notamment toutes les propriétés que doit satisfaire l'oreille utilisée (dimensions, matériau utilisé pour la texture, canal auditif simulé...)

Les mêmes conditions sur le champ acoustique que la méthode **MIRE** sont à respecter. L'oreille utilisée pour les mesures lors du stage est une oreille GRAS représentée sur la figure (5(a)). Un microphone omnidirectionnel GRAS type 43AG est positionné à l'intérieur au fond d'un tuyau servant de canal auditif, derrière un coupler type **IEC 711** modélisant la réponse de l'oreille.

Le casque mesuré est ensuite posé autour de l'oreille et serré sur la plaque³ comme sur la figure (5(b)), et les mêmes mesures que dans la section (1.1.1.1) pour déterminer l'atténuation du casque sont réalisées. Le texte **ANSI**[6] spécifie que le test doit être réalisé sur chaque oreille, pour 5 exemplaires⁴ d'un même casque puis moyenné pour obtenir une valeur normée de l'atténuation du casque.

Cette méthode présente l'avantage de ne nécessiter d'aucun sujet pour être réalisée, donc l'intérêt d'être plus rapide que les autres. De plus, elle rend compte, si les dimensions de l'oreille et du canal auditif sont respectées, de l'atténuation de bruit d'un "individu moyen".

En revanche, elle ne permet pas de mesurer l'écart-type de l'atténuation entre individus, utilisé pour calculer le **SNR** (Single Number Rating)[8], qui donne une valeur unique de l'atténuation du bruit d'une protection auditive. Cette variabilité inter-individu est en effet importante à prendre en compte pour déterminer l'atténuation effective que peuvent s'attendre à être soumis les utilisateurs lors du port de la protection auditive. De plus, l'atténuation passive (et même

3. Selon la norme **ANSI**[6], le serrage du casque doit au préalable être mesuré sur une tête, pour reproduire un serrage réel (≈ 6 N en moyenne).

4. Dans les mesures faites, nous avons seulement testé un exemplaire de chaque casque audio.



FIGURE 5 – Oreille artificielle : (a) Oreille ; (b) Serrage du casque *Zik* de *Parrot* sur l'oreille.

active) de casques audio est nettement affectée par la présence de fuites acoustique comme cela sera brièvement expliqué à la fin du rapport, ce qui accorde une grande importance au serrage du casque audio autour de l'oreille sur la figure (5). Appliquer un serrage qui corresponde parfaitement au serrage du casque sur une vraie tête est en pratique difficile à réaliser ce qui fausse significativement les mesures **ATF**. C'est pourquoi la méthode **MIRE**, lorsqu'elle est réalisable, est toujours préférable à la méthode **ATF** pour mesurer l'atténuation de casques et protections auditives[6]. Notons à ce propos, l'importance du choix dans les mesures **MIRE** ou **REAT** de la pose du casque : est-ce que l'expérimentateur met le casque (experimenter fit), le sujet met le casque (subject fit), ou est-ce que le sujet met le casque avec les conseils de l'expérimentateur pour une pose optimale(subject-oriented fit)⁵ ; traitée dans les documents[9] et [10].

1.1.2 Méthodes psycho-physiques

Les mesures psycho-physiques permettent de mettre en jeu des aspects perceptifs lors de la mesure de l'atténuation d'un casque audio ou d'une protection auditive et mesurent donc une atténuation perçue par l'utilisateur.

1.1.2.1 Real Ear Attenuation at Threshold (**REAT**)

La méthode qui est actuellement le standard pour toute mesure d'atténuation passive de protection auditive est la méthode Real-Ear Attenuation at Threshold (**REAT**), dont les spécifications sont définies dans la norme **ANSI/ASA S12.6-2008**[11] .

Elle consiste à mesurer un premier seuil d'audition pour 8 bruits centrés pour des chaque

5. Pour nos mesures, nous avons choisi la méthode qui consiste à indiquer au sujet comment mettre le casque (subject-oriented fit)

octave de 62.5 Hz à 8 kHz sans casque puis à mesurer les seuils d'audition aux mêmes fréquences avec le casque porté. L'atténuation passive est ensuite défini comme la différence (en dB) entre les deux seuils mesurés. Tout comme la méthode **MIRE** (voir section (1.1.1.1)), la mesure doit être faite sur 10 à 20 sujets qui doivent ne présenter aucun dysfonctionnement auditif puis moyennée pour obtenir une atténuation aux normes[11].

Du fait de la grande sensibilité de l'oreille (seuil d'audition à 1 kHz de seulement 0 dB), cette mesure nécessite pour être réalisée dans de bonnes conditions une chambre parfaitement sourde. Elle est donc difficilement réalisable en pratique, même si elle reste aujourd'hui la norme pour mesurer l'atténuation passive des casques audio et protections auditives. Nous n'avons pas pu réaliser au sein des locaux de *Parrot* une mesure **REAT**, ne pouvant retrouver de telles conditions.

Cette méthode présente l'avantage par rapport aux mesures physiques de prendre en compte l'ostéophonie[3], [4], et donc de mieux estimer l'atténuation perçue par un utilisateur. Ceci peut être observé sur la figure (4), où les valeurs **REAT** sont inférieures aux valeurs **MIRE** pour des fréquences supérieures à 1 kHz. En revanche, l'effet d'occlusion[12], qui se manifeste par une meilleure perception des basses fréquences lors du port d'un casque conduit à une surestimation du niveau d'atténuation pour ces fréquences. Ceci est visible sur la figure (4), où les valeurs **REAT** sont supérieures aux valeurs **MIRE** pour $f = 62.5$ Hz et $f = 125$ Hz.

De plus, la méthode **REAT** présente l'inconvénient de n'être applicable qu'aux casques audio et protections auditives qui ne comportent aucun contrôle actif du bruit. Ces derniers ont en effet un bruit électrique non négligeable (qui varie entre les produits) qui est émis par les haut-parleurs du système et qui sont donc audibles par le sujet. Ils viennent s'ajouter aux bruits centrés tests, et, pour certaines fréquences, les propriétés de masquage des premiers sur les seconds conduisent à une surestimation de l'atténuation mesurée par la méthode **REAT**.

1.1.2.2 Loudness Balance Method (**LBM**)

Loudness Balance Method est une méthode développée par J. Zera, A.Brammer et G.J. Pan[13], puis reprise par P.Guiu et P.Darlington[14], qui repose sur des mécanismes perceptifs d'intensité sonore, et qui permet de mesurer l'atténuation active de casques audio à contrôle actif, contrairement à **REAT**.

La mesure se présente de la façon suivante. Elle se fait avec le casque porté par le sujet. Deux stimuli sonores (bruits centrés tous les octaves ou tiers d'octave[7]) sont alors émis, l'un en **ANC** on, l'autre en **ANC** off. Le sujet peut via une interface utilisateur écouter les 2 stimuli autant de fois qu'il le désire, avant de choisir celui qui lui paraît le plus fort. Les niveaux des stimuli sont ensuite ajustés selon un procédé détaillé dans [14], et le test reprend jusqu'à convergence vers un gain qui sera l'atténuation active du casque audio. L'estimation de ce paramètre est faite selon une méthode **PEST**[15] (Parametric Estimation by Sequential Testing).

Cette méthode a pour avantage contrairement à **REAT** de ne pas nécessiter de chambre parfaitement sourde, puisque les signaux sont émis à fort niveau. En revanche, elle permet d'estimer seulement l'atténuation active⁶, ce qui empêche de la comparer à d'autres méthodes comme **REAT**.

Les résultats de J. Zera dans [13] et de P. Guiu dans [14] montrent que la méthode Balance Loudness sous-estime l'atténuation active en basse fréquence par rapport à **MIRE**. Nous discuterons de cette différence plus en profondeur dans les parties (2) et (3).

6. Une variante existe pour mesurer l'atténuation passive[13]

1.1.2.3 Masked-Threshold Method (MTM)

La méthode du Masked-Threshold peut être considérée comme une adaptation de **REAT** aux appareils à contrôle actif du bruit. Le but est tout comme cette dernière de comparer les seuils d'audition de composantes sinusoïdales avec et sans casque (en **ANC** on), cette fois-ci plus dans le silence, mais dans un bruit de fond masquant le bruit électrique du casque ou de la protection auditive. Cette méthode a également été mise en place par J. Zera, et est présentée en détails dans [13]

Plus précisément, le sujet est placé dans une chambre anéchoïque au centre d'un système de haut-parleurs comme sur la figure (6)⁷ chargés de transmettre le bruit test environnant, en face d'un dernier haut-parleur qui joue le signal test.

Le test se déroule en trois étapes pour chaque stimulus à une fréquence donnée f_0 . Lors de la première étape, le sujet porte le casque ou la protection auditive avec l'**ANC** activé, et un bruit rose est envoyé sur le système des 4 HP sur la figure (6) à un niveau sonore L_1 . le signal test pour cette étape est une sinusoïde pure à f_0 envoyée sur les HP du casques ou de la protection. Le seuil d'audition dans le bruit de ce signal test est ajusté par le sujet jusqu'à un niveau l_0 . Dans la deuxième étape, l'**ANC** est désactivé et le signal test est gardé constant au niveau l_0 sur les HP du casque. Le sujet ajuste alors le niveau du bruit rose envoyé aux 4 HP jusqu'à ce qu'il entende à nouveau le signal test. À partir du niveau obtenu L_2 , on peut calculer l'atténuation active perçue en faisant simplement la différence des 2 niveaux de bruit : $A_{IL} = L_1 - L_2$. La dernière étape consiste à retirer le casque dans un premier temps, puis à envoyer le signal test sur le haut-parleur excentré sur la figure (6) à un niveau sonore l_1 ⁸. Le sujet ajuste ensuite l'intensité du bruit rose jusqu'à un niveau L_3 . L'atténuation totale est ensuite obtenue en faisant $T_A = L_3 - L_1$.

Cette méthode permet de mesurer une atténuation active ainsi qu'une atténuation totale perçue. Elle n'a par contre pas été standardisée à cause de la nécessité de calibrer une source extérieure. De plus, la procédure décrite dans l'article de J. Zera[13] impose de refaire la mesure 7 fois pour chaque sujet et pour chacune des 8 fréquences 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 et 8000 Hz ce qui la rend longue et difficilement réalisable lorsque beaucoup de casques sont à tester.

J. Zera montre par ailleurs dans l'article [13] que la mesure de l'atténuation totale par **MTM** donne des résultats supérieurs à **MIRE**, ce qu'il explique par la différence d'efficacité du contrôle actif entre les deux oreilles droite et gauche⁹. Nous reviendrons aussi sur ces différences dans les parties (2) et (3)

1.1.3 Bilan sur les méthodes existantes

La liste des méthodes présentées n'est pas exhaustive. On notera par exemple la méthode par conduction osseuse[17]. Si la méthode **REAT** est celle qui normalise les mesures de l'atténuation de protections auditives et de casques audio sans contrôle actif, c'est d'une part parce qu'elle rend compte de l'atténuation perçue par l'utilisateur, mais aussi parce qu'elle présente un écart-type (inter-individu) faible (moins de 5 dB), comparable à celui de la méthode **MIRE** comme cela est visible sur la figure (4)¹⁰.

Le but du stage était donc de développer une méthode psycho-physique qui permette de

7. Ici un système de 4 HP

8. Cette étape nécessite une calibration au préalable afin de faire correspondre les niveaux l_0 sur les HP du casque et le niveau l_1 sur le HP excentré. Pour plus détails, consultez[13].

9. À cause des mécanismes de perception d'intensité binaurale[16]

10. Pour plus de détails concernant la comparaison entre les méthodes **MIRE** et **REAT**, consultez [1], [18], [19] et [20]

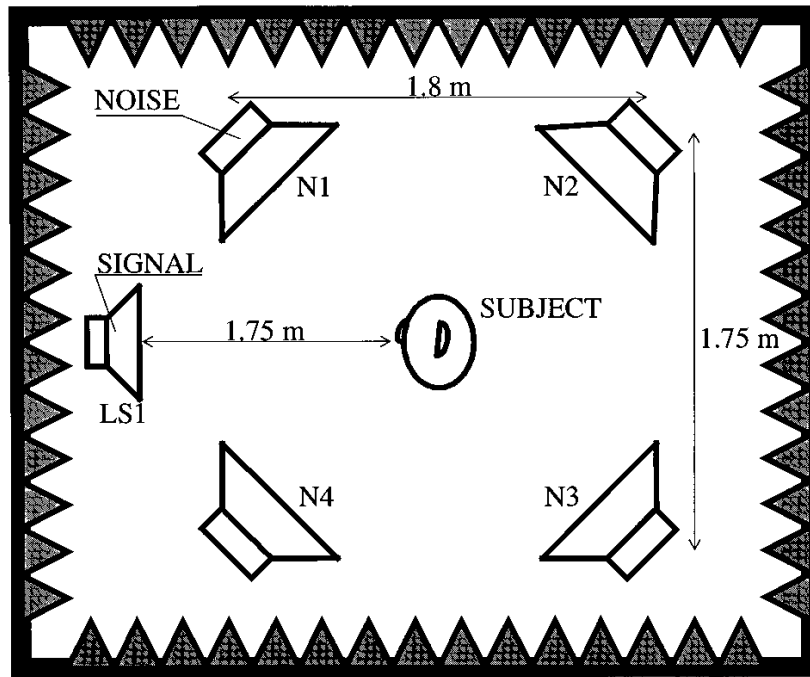


FIGURE 6 – Setup de la mesure MTM (Masked Threshold Method)

mesurer l'atténuation active de casques audio (comme les méthodes Loudness Balance ou Masked Threshold), et qui présente un écart-type proche de **REAT** ou **MIRE**, ce qui permettra de comparer les résultats.

Dans la section suivante, nous présentons la méthode qui a été développée pendant ce stage, ainsi que les idées qui sont en cours de développement ou qui n'ont pas encore été exploitées.

1.2 Nouvelles méthodes

Dans cette section, nous proposons donc une méthode psycho-physique développée dans le cadre du stage pour mesurer l'atténuation active de casques audio, ainsi que d'autres idées partiellement exploitées ou pas encore traitées.

1.2.1 Timbre Adjustment Method (**TAM**)

Les méthodes psycho-physique présentées précédemment reposent sur des mécanismes perceptifs d'intensité, ou sur les seuils de perception. Pour développer une nouvelle méthode, nous avons souhaité essayer de voir s'il était possible de mettre en place une mesure qui mette en jeu d'autres mécanismes perceptifs.

Nous avons ainsi voulu créer une mesure perceptive de l'atténuation de casques basée sur la perception du timbre. Une première bibliographie a alors été effectuée pour comprendre les mécanismes perceptifs en jeu. Nous avons retenu principalement les livres de W.M. Hartmann[21], de B.C. Moore[22] et de E. Zwicker[16] pour une première étude du sujet.

Le méthode par ajustement du timbre repose sur le principe suivant. Le sujet écoute avec le casque en **ANC** on mis en place un timbre composé d'harmoniques naturelles joué à fort niveau sur un système son comme celui présenté dans la figure (2). Il enlève le casque et adapte le gain de chaque harmonique jusqu'à avoir la perception du même timbre que le précédent. Les gains récupérés sur chaque harmonique correspondent alors à l'atténuation totale du casque.

Le but du test est donc de créer un signal composé de plusieurs harmoniques tel que le sujet puisse d'une part le reconnaître comme provenant d'une unique source, donc avoir la perception d'un timbre ; et d'autre part qu'il puisse se concentrer indépendamment sur chaque harmonique, pour pouvoir les ajuster après avoir retiré le casque. On comprend donc la difficulté de créer un signal avec assez d'harmoniques pour qu'il soit perçu comme provenant d'une unique source, mais avec assez peu d'harmoniques pour que le sujet puisse se concentrer indépendamment sur chacune. En se basant sur [21] et [22], nous avons décidé de prendre dans un premier temps des timbres à 8 harmoniques.

La deuxième difficulté était de trouver un timbre composé de 8 harmoniques qui puissent recouvrir tout le spectre audible (ou au moins de 100 Hz à 10 kHz). Le premier choix a été de prendre un timbre à une fréquence fondamentale de $f_1 = 62.5$ Hz composé de 8 harmoniques en puissance de 2 : $f_{2^k}, k \in \llbracket 1, 7 \rrbracket$. Le signal alors créé sonne très électronique, mais il satisfait les contraintes définies dans le paragraphe précédent.

Les premiers tests sur 2 sujets ont montré que la méthode était biaisée et rendue difficile par les poses et retirements successifs du casque avant l'ajustement du timbre. Comme ce qui nous intéresse est d'abord de mesurer l'atténuation active des casques audio, nous avons développé une variante de la méthode ci-dessus qui permet de mesurer l'atténuation active sans enlever le casque¹¹.

La méthode actuelle procède de la façon suivante. Le sujet est placé au même endroit que pour la méthode **MIRE** (voir figure (2(b))) et met le casque. Une interface visible sur la figure (7) lui est alors présentée. Lorsqu'il clique sur *Signal Initial*, la fonction du casque passe en **ANC** on et le timbre est joué sur le système 5.1 (voir figure (2)). Lorsqu'il clique sur *Signal Modifié*, la fonction du casque passe en **ANC** off et le timbre modifié, dont le gain de chaque harmonique est récupéré sur les sliders f_0, f_1, \dots, f_7 , est joué sur le même système son. Les sliders vont de -50 dB à $+10$ dB avec des pas de 1 ou 5 dB, mais le sujet ne sait intentionnellement pas la valeur des atténuations de chaque harmonique. De plus, une atténuation aléatoire entre -7 dB et $+5$ dB sur chaque harmonique est initialement imposée pour forcer le sujet à régler toutes les harmoniques même les hautes fréquences^{12 13}. Il peut à tout moment remettre les gains à 0 en cliquant sur le *Mise à 0*. Par ailleurs, pour aider le sujet à se concentrer sur chaque harmonique, ce dernier peut faire un clic droit sur les textes statiques f_0, f_1, \dots, f_7 , pour écouter l'harmonique en question. Lorsqu'il est arrivé à avoir la même perception entre le signal initial et le signal modifié, il clique sur sauvegarder et l'atténuation active du casque, composé des valeurs sur les 8 sliders (voir figure (7)) est enregistrée.

Contrairement à **REAT**, la méthode par ajustement du timbre présentée ci-dessus ne nécessite pas de chambre sourde, puisque les signaux sont joués à fort niveau. De plus, le bruit électrique propre au casque ne fausse a priori pas la mesure contrairement à **REAT** puisque les niveaux du signal test perçus sont bien plus forts que le bruit électrique¹⁴. En revanche, la méthode nécessite des sujets "experts", qui soient capables de se concentrer sur 8 harmoniques indépendamment d'un même timbre, et qui parviennent à percevoir un même timbre entre le signal initial et le signal modifié. Nous verrons dans la section (1.2.4) comment rendre le test plus facile et accessible à des sujets novices.

La méthode par ajustement du timbre présente aussi un avantage par rapport à la méthode Loudness Balance présentée dans la section (1.2.2). En effet cette dernière mesure des intensités perçues de bruits centrés tous les octaves ou tiers d'octave et est biaisée par le fait que

11. Une variante a aussi été développée pour mesurer l'atténuation passive ou totale sans enlever le casque, et est présentée dans l'annexe (A)

12. Qui sont peu affectées par le contrôle actif

13. Nous verrons dans les parties (2) et (3) que cette initiative permet de "débiaiser" la mesure

14. Le bruit électrique peut lorsqu'il est assez fort proportionnellement au signal test avoir une influence sur l'intensité perçue de ce dernier ([16], p214-216).

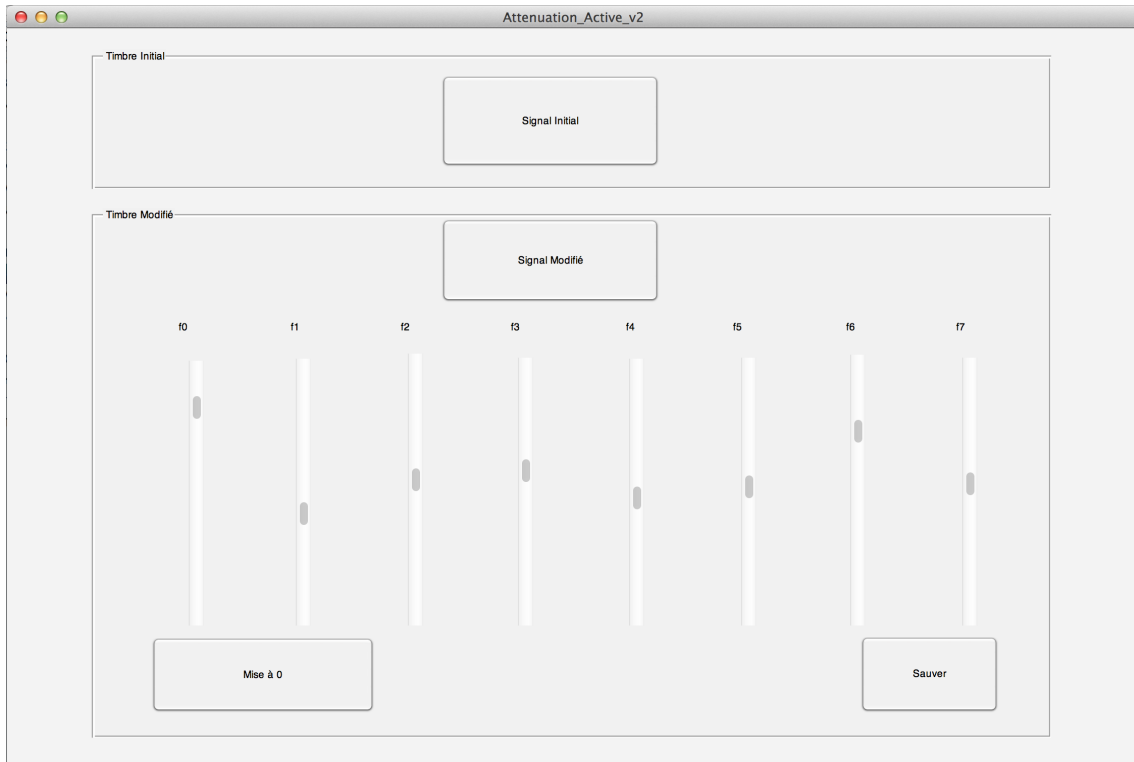


FIGURE 7 – Interface graphique de la méthode par ajustement du timbre

l'atténuation colore ces bruits, ce qui rend la perception de l'intensité difficile. La méthode par ajustement du timbre utilise des sinusoïdes pures, qui sont indépendamment colorées par l'atténuation active. C'est au contraire cette coloration que l'on mesure par la variation du timbre, et les atténuations estimées reposent donc sur d'autres mécanismes perceptifs que les méthodes **REAT** ou Loudness Balance

1.2.2 Loudness Balance Method modifiée

Cette méthode n'est pas en soi une nouvelle méthode élaborée complètement mais plutôt une adaptations de la méthode Loudness Balance pour pouvoir être comparée à la méthode par ajustement du timbre. Le but était d'utiliser une interface similaire à celle présentée sur la figure (7). Contrairement à **LBM**, cette méthode n'utilise pas de bruits centrés tous les tiers d'octave mais des sinusoïdes pures aux mêmes fréquences que **TAM**. De plus, l'atténuation active n'est plus déterminée par un choix forcé entre 2 signaux d'intensité différente, mais déterminée par l'ajustement des mêmes sliders que **TAM** par l'utilisateur. La différence entre les méthodes repose sur le fait que l'ajustement est fait fréquence par fréquence, sur des sinusoïdes pures et non des sons complexes. C'est donc une méthode basée sur des mécanismes de perception d'intensité. Elle a été testée principalement sur 1 sujet et comparée à **TAM** pour voir si cette dernière était biaisée ou trop difficile. Nous reviendrons dessus dans la partie (3).

1.2.3 Méthode hybride **TAM** et **LBM**

Dans la dernière partie de notre stage, nous avons mis en place une méthode hybride **TAM LBM**, dans le but de rendre la méthode par ajustement du timbre plus simple et accessible pour des sujets novices.

Le but était de diminuer le nombre de paramètres (donc d'harmoniques) à régler simulta-

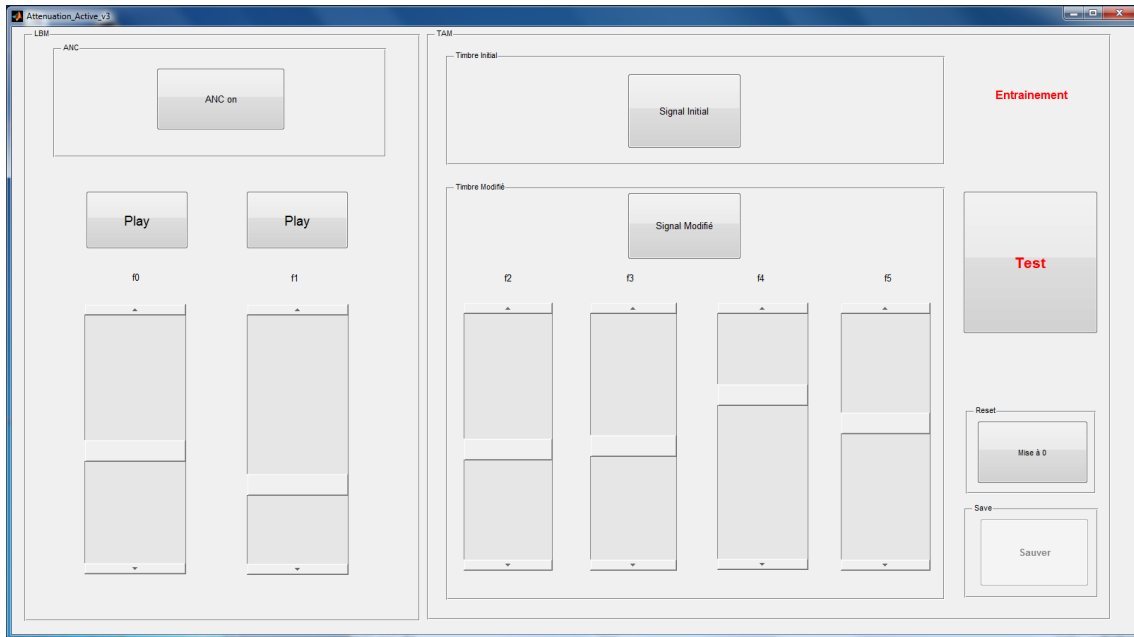


FIGURE 8 – Interface graphique de la méthode hybride

nément par l'utilisateur pour lui faciliter la procédure. Pour ceci, l'atténuation active des deux harmoniques les plus hautes $f_6 = 4$ kHz et $f_7 = 8$ kHz sont fixées avant la mesure par une moyenne **MIRE** sur plusieurs sujets.

Les 2 harmoniques basses $f_0 = 62.5$ Hz et $f_1 = 125$ Hz sont ajustées indépendamment selon la méthode décrite dans la section (1.2.2) précédente. Il reste alors les 4 dernières composantes du signal test à régler simultanément par l'utilisateur, comme pour la méthode **TAM**.

L'interface utilisateur a donc été légèrement modifiée pour ce test. Elle est présentée sur la figure (8). La partie gauche de l'interface avec les deux sliders correspond à la mesure **LBM** des deux harmoniques basses. L'utilisateur peut activer ou désactiver le contrôle actif grâce au bouton *ANC on/ANC off*. Il peut ensuite jouer séparément les 2 harmoniques basses avec les deux boutons *Play*. La deuxième partie de l'interface est semblable à la mesure **TAM** décrite dans la section (1.2.1) pour seulement 4 composantes. Une fois le réglages des 6 sliders terminé, l'utilisateur sauve ses réglages avec le bouton *Sauver*. Le bouton *Mise à 0* permet quant à lui de refaire un tirage aléatoire d'une atténuation active entre -7 dB et $+5$ dB sur les 6 composantes du signal que l'utilisateur règle, et remet les sliders dans leur position initiale.

Notons que pour ce test, nous avons mis en place une phase d'entraînement pour que l'utilisateur puisse se familiariser avec l'interface.

1.2.4 Autres idées (pas testées)

Notons que d'autres pistes pour établir de nouvelles mesures psycho-physiques de l'atténuation de casques actifs n'ont pas pu être développées lors du stage. Nous en exposons donc ici seulement les principes.

Nous pourrions imaginer par exemple, une méthode qui repose sur la localisation de source dans un plan. Le sujet porterait un casque avec une oreille en **ANC on**, l'autre en **ANC off** et tenterait de localiser un bruit joué par un système comme celui de la figure (2), en un point où le champ acoustique est diffus. Les 2 oreilles passeraient par la suite en **ANC off** et le même bruit serait joué au casque, puis le sujet ajusterait l'**ILD** (Interaural Level Difference[23]) jusqu'à avoir la sensation que le bruit provienne de la même position dans le plan.

Nous pourrions aussi adapter la méthode **REAT**, pour qu'elle soit adaptée aux mesures de l'atténuation active. Par exemple, une étude spécifique du bruit électrique et des propriétés de masquage pourrait être envisagée pour déterminer quelles fréquences sont susceptibles d'être masquées ou pas afin de déterminer pour quelles fréquences la méthode peut encore être utilisée. Il serait aussi envisageable de reproduire au casque le même bruit électrique lorsque la fonction du casque ou de la protection auditive est en **ANC off**, afin de se retrouver dans les mêmes conditions quelque soit la fonction du casque (**ANC on** ou **ANC off**).

2 Expériences et Résultats

Une partie importante du stage a été consacrée à développer un setup de mesures qui se rapproche des contraintes imposées par la norme **ANSI** (American National Standards Institute), et qui soit robuste pour permettre une bonne reproductibilité des mesures. L'objectif était d'élaborer un setup commun à toutes nos mesures, de manière à pouvoir comparer les résultats obtenus pour différentes mesures.

De nombreux efforts ont ainsi été faits sur la mise en place des différents protocoles expérimentaux pour les différents types de mesures. Cette partie explique donc dans un premier temps cette mise en place du setup expérimental, puis les étapes pour préparer les différentes mesures sont ensuite présentées avec les résultats obtenus.

2.1 Setup expérimental

2.1.1 Norme **ANSI**

Les organismes **ANSI** et **ISO** définissent des normes pour réaliser notamment les mesures **REAT**, **MIRE** ou **ATF**[6]. Nous avons ainsi voulu suivre dans la mesure du possible la norme **ANSI** pour la mise en place de nos mesures **MIRE** et **ATF**, dont les principaux points sont résumés ci-dessous.

La norme définit les mêmes contraintes à respecter que ce soit pour les mesures **MIRE** ou **ATF** pour l'instrumentation ainsi que le signal test à utiliser ou le champ acoustique dans la salle (voir section(2.1.2)). Pour le matériel, la norme spécifie les caractéristiques techniques¹⁵ qui ont toutes été respectées.

La norme spécifie également le signal test pour les mesures à utiliser. Ce dernier doit être un bruit rose, avec une pression acoustique supérieure au point de référence à 85 dB par tiers d'octave avec un niveau global de 105 dB \pm 3 dB. Le système son utilisé (voir section (1.1) et figure (2(b))) ne permettait pas d'obtenir de tels niveaux acoustique sans distorsion. Si de tels niveaux sont requis pour la mesure de l'atténuation active, c'est pour que le bruit émis par le système son de la salle masque entièrement le bruit électrique des haut parleurs du casque imposé par le contrôle actif¹⁶ notamment dans les hautes fréquences ou le contrôle passif est fort et le bruit électrique du casque assez important. Nous avons avec notre système de restitution pu assurer un niveau global de 87 dBA ce qui suffisait pour les casques testés jusqu'à 10 kHz (voir sections (2.2) et (2.3)). Le champ acoustique mesuré au point de référence doit également satisfaire des conditions d'homogénéité et de diffusion précisées dans la section suivante (2.1.2)

Pour les mesures **ATF**, la norme spécifie quel type de matériel utiliser (dimensions et matière de l'oreille en silicon, coupleur, serrage du casque...). Notons que *GRAS type 43AG Ear and Cheek Simulator* utilisé pour nos mesures **ATF** répond à tout ces critères.

Pour les mesures **MIRE**, le choix des sujets doit normalement satisfaire les conditions suivantes :

- La mesure doit être réalisée sur 10 sujets au minimum
- Une inspection otoscopique doit être réalisée sur tous les sujets avant le test
- Une mesure des dimensions de la tête doit être effectuée pour tous les sujets
- Le ratio Homme/Femme doit être compris entre 40% et 60%
- Les sujets ne doivent porter ni lunettes, ni boucles d'oreille

10 sujets ont été choisis, mais dans un soucis de simplicité ces 10 sujets étaient tous des

15. telles que la distorsion totale ou la sensibilité des microphones à respecter[6]

16. Idéalement 10 dB supérieur sur tout le spectre

hommes, âgés entre 25 et 35 ans, présentant des morphologies différentes. Notons aussi qu'un des sujets gardait ses lunettes lors des mesures pour avoir une idée de l'impact de ces dernières sur l'atténuation. Aucun examen otoscopique n'a été réalisé sur ces sujets, mais aucun ne présentait de troubles de l'audition.

Précisons aussi que dans la norme, la mesure **MIRE** est utilisée pour avoir une estimation de l'atténuation active tandis que l'atténuation passive est déterminée par **REAT**, et l'atténuation totale donnée par l'équation suivante.

$$TA = PIL_{REAT} + AIL_{MIRE} \quad (1)$$

Enfin, mentionnons qu'à cette valeur de l'atténuation totale s'appliquent normalement des coefficients de correction dus à la conduction osseuse[4], [6] qui n'influent sur l'atténuation totale que si celle-ci se rapproche de la valeur limite définie dans [6], d'environ 50 dB sur l'ensemble du spectre.

2.1.2 Caractérisation du champ acoustique dans la salle

Les normes **ANSI** ou **ISO** précisent des points importants concernant le champ acoustique mesuré au point de référence et autour de ce point, afin de s'assurer d'une bonne reproductibilité des mesures et de pouvoir après comparer les casques.

2.1.2.1 Un champ acoustique homogène

La norme impose premièrement que le champ acoustique soit homogène autour du point de référence. **ANSI** spécifie d'une part que la différence entre les niveaux maximum et minimum mesurés de 2 tiers d'octave entre 100 Hz et 10 kHz n'excède pas 10 dB; et d'autre part que les niveaux sur chaque tiers d'octave à ± 15 cm du point de référence dans les 3 directions de l'espace ne diffèrent pas de plus de ± 3 dB avec ceux du point de référence.

Il fallait donc pour éviter les résonances de salles se placer à un endroit évitant d'éventuels noeuds ou ventres, donc à l'écart du centre notamment. Il fallait cependant aussi éviter de se placer trop près d'un haut-parleur, afin d'être dans les conditions imposées par **ANSI**. Après quelques mesures, un bon compromis a été trouvé à l'emplacement visible sur la figure (2).

L'écart est toujours légèrement supérieur à 10 dB comme c'est visible sur la figure (9), mais c'est la meilleure solution que nous ayons trouvée, pour que le champ acoustique soit en plus diffus (voir paragraphe suivant).

2.1.2.2 Un champ acoustique diffus

Le deuxième point spécifié par la norme est que le champ acoustique mesuré au point de référence soit diffus. Cette contrainte est particulièrement importante lors des mesures de l'atténuation active, puisque le feedforward du contrôle actif est directement affecté par la captation du microphone externe.

Plus précisément, **ANSI** précise que pour un microphone cardioïde¹⁷, le champ acoustique au point de référence doit être compris entre ± 3 dB sur chaque tiers d'octave, sur les plans $\Phi = 0$, $\theta = 0$ et $\theta = \frac{\pi}{2}$ en coordonnées sphériques¹⁸. Nous nous sommes contentés de vérifier le

17. Pour le type de microphone utilisé pour nos mesures

18. Une mesure doit être réalisée tous les 15° sur chaque plan

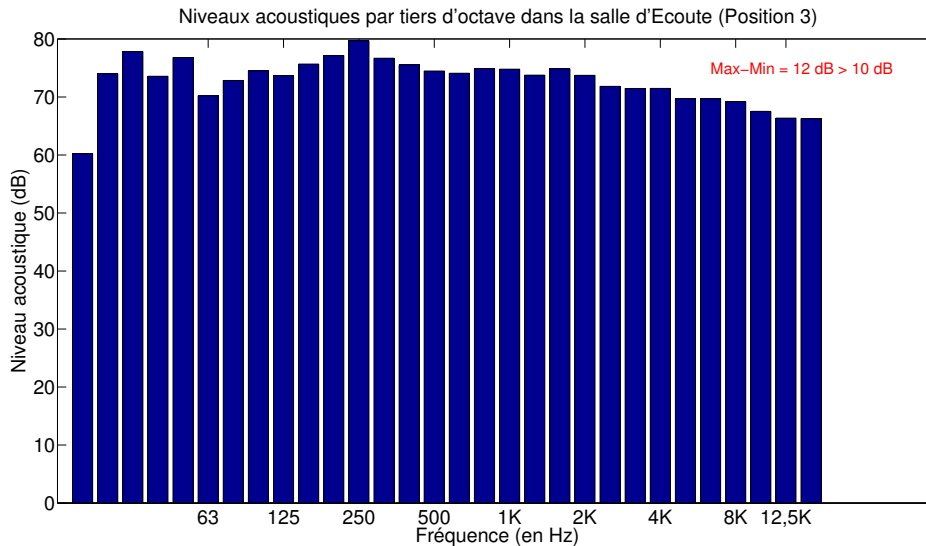


FIGURE 9 – Niveaux acoustiques par tiers d’octave mesurés au point de référence en réponse à un bruit rose

plan $\Phi = 0$ grâce à une plaque tournante *LINEARX System LT360* et un microphone cardioïde *EMC158-010-01*.

Après quelques réglages, nous sommes parvenus à obtenir un champ acoustique globalement diffus, dont quelques mesures sur quelques angles θ sur le plan $\Phi = 0$ sont représentées sur la figure (10).

2.2 Mesures ATF

Mentionnons pour commencer comment ont été calculées toutes nos atténuations **ATF** ou **MIRE**. À partir des fichiers *wav* enregistrés par les microphones (**MIRE** ou **ATF**), la densité spectrale de puissance est estimée par un périodogramme de type *Welchav* sur 4096 points. 3 densités spectrales sont calculées par mesure (en décibel) : une sans le casque I_{ref} , une avec le casque sans contrôle actif I_{ANCOff} et une avec le casque avec contrôle actif I_{ANCon} . Les atténuations passive et totale sont ensuite calculées comme suit : $PIL = I_{ANCOff} - I_{ref}$ et $TA = I_{ANCon} - I_{ANCOff}$ puis l’atténuation active est obtenue en soustrayant l’atténuation passive de l’atténuation totale $AIL = TA - PIL$.

Un lissage par tiers d’octave est ensuite appliqué à la courbe afin d’obtenir une figure lisible en hautes fréquences. Ceci est illustré sur la figure (11), qui montre l’atténuation totale du casque B mesuré par la méthode **ATF**, non lissée sur la figure (11(a)) et lissée sur la figure (11(b)).

2.2.1 Difficultés rencontrées

Afin d’obtenir une mesure qui se rapproche le plus possible de l’atténuation sur une oreille réelle, la force de serrage du casque doit d’abord être mesurée sur un dispositif afin d’appliquer la même force sur la pince de l’oreille artificielle (voir figure (5(b))). De plus, cette pince doit être placée de façon à ce que cette force soit répartie uniformément sur l’ensemble du casque et donc autour de l’oreille.

Même avec ces précautions lors de nos mesures, nous nous sommes aperçus que la reproduc-

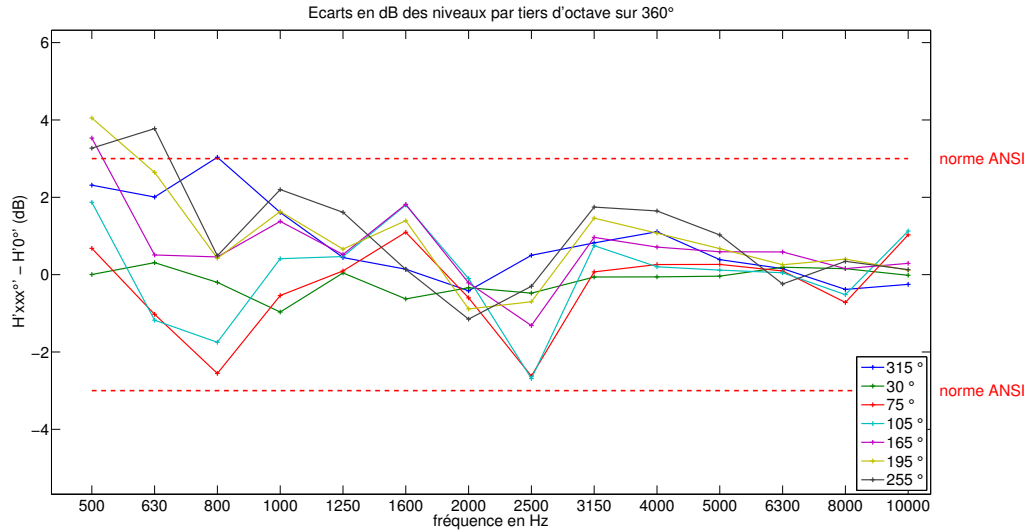
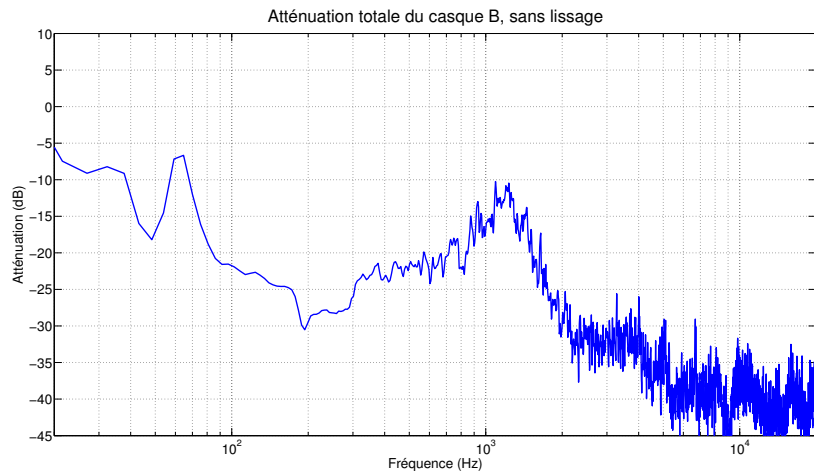
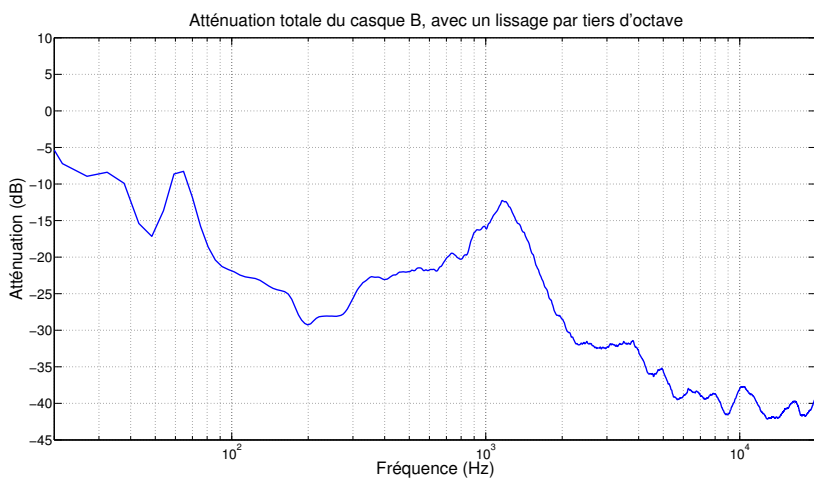


FIGURE 10 – Caractérisation du champ acoustique de la salle : diffusivité



(a)



(b)

FIGURE 11 – Atténuation totale du casque B (mesure **ATF**) : (a) Sans lissage ; (b) Avec un lissage par tiers d'octave.

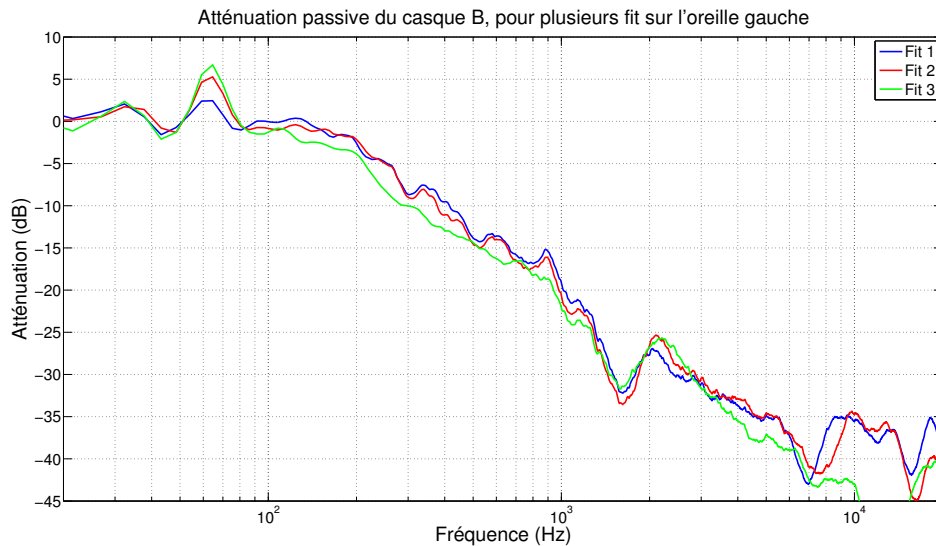


FIGURE 12 – Atténuation passive du casque B pour 3 mesures consécutives

tibilité des mesures¹⁹ était difficile. Ceci est visible sur la figure (12) pour laquelle 3 mesures consécutives de l'atténuation passive du casque B, en remplaçant à chaque fois le casque sur l'oreille et la pince sur le casque. Les différences entre les mesures sont visibles notamment entre la mesure 3 et les deux autres mesures entre 100 Hz et 1 kHz, puis au dessus de 7 kHz.

Nous avons remarqué qu'une des cause de cette variabilité entre les mesures était la présence de fuites acoustiques entre l'oreille en silicon et la plaque, notamment pour l'oreille gauche, qui ne rentre pas complètement dans le socle. Celles-ci affectent directement le contrôle passif, ce qui a aussi un effet important sur le contrôle actif²⁰ comme nous pouvons le voir sur la figure (13) où l'atténuation active est meilleure pour la mesure qui présentait le meilleur contrôle passif. Ces variations étaient notamment importantes lorsque la circonférence du casque était telle que celui-ci reposait à cheval sur l'oreille en silicon et sur la plaque .

Pour contourner ce problème, nous avons coller une mousse sur la plaque et tout autour de l'oreille comme sur la figure (14(a)) afin de limiter ces fuites acoustiques. Ceci a eu pour avantage d'améliorer la reproductibilité de nos mesures **ATF**. En revanche, cette étape a aussi amélioré l'atténuation passive moyenne des casques mesurés ; le contact entre la mousse et le casque ne correspondant peut-être pas au contact entre la peau et le casque. Ceci est représenté sur la figure (15) sur laquelle on peut voir un écart de plus 2 dB entre 100 Hz t 1kHz.

2.2.2 Résultats

Les mesures **ATF**, présentent l'avantage d'être faciles à mettre en place, rapides et de ne nécessiter d'aucun sujet. Elles sont par ailleurs assez reproductibles (après la mise en place de la mousse sur la plaque, voir section précédente (2.2.1)) et peuvent ainsi constituer une mesure de référence. Elles représentent cependant un cas de mise en place optimale du casque autour de l'oreille et nous verrons qu'il sera intéressant de comparer les résultats des mesures **ATF** aux mesures **MIRE** dans la partie (3).

19. Espérée à moins de 1 dB sur l'ensemble du spectre

20. En particulier sur le feedforward[24]

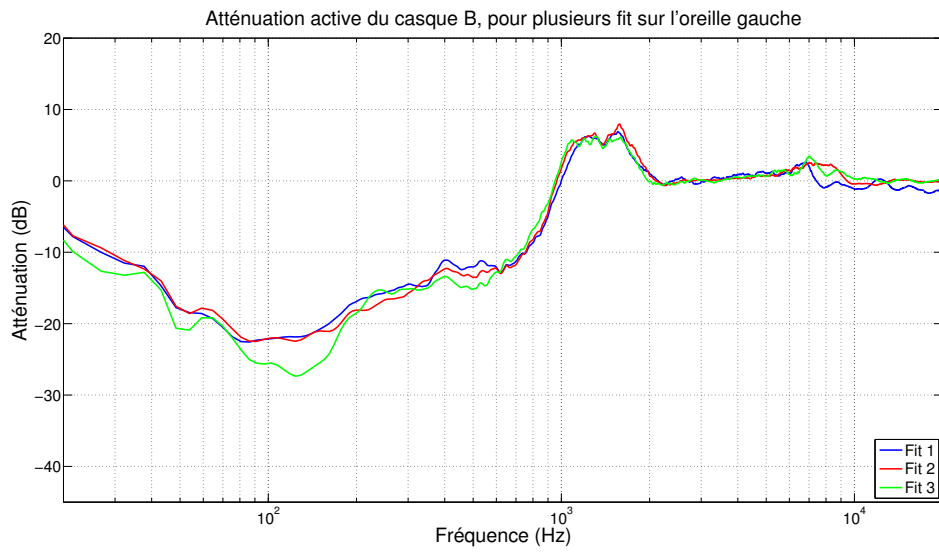


FIGURE 13 – Atténuation active du casque B pour 3 mesures consécutives



FIGURE 14 – GRAS type 43AG Ear and Cheek Simulator : (a) Sans mousse ; (b) Avec mousse

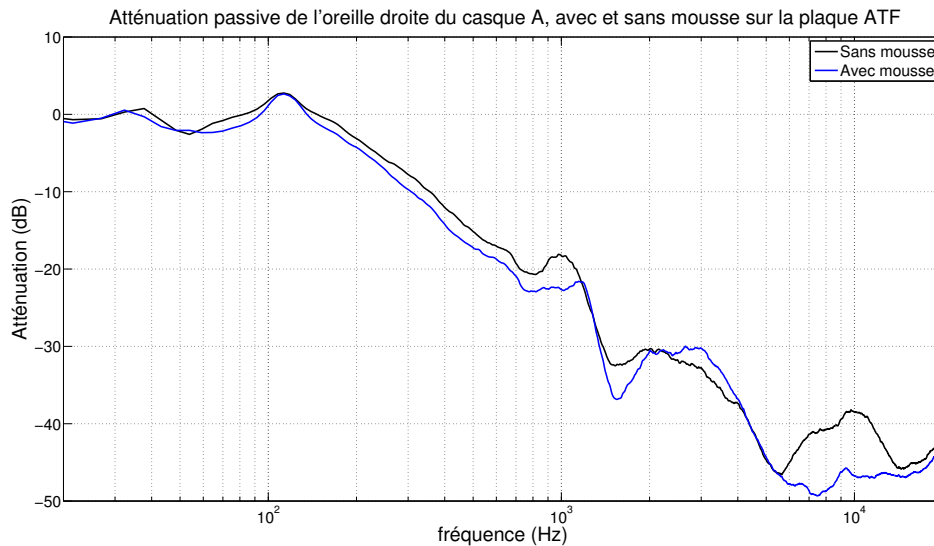


FIGURE 15 – Atténuation passive du casque A pour avant et après mise en place de la mousse sur l'oreille artificielle (figure (14))



FIGURE 16 – Microphone *ER-7C*

2.3 Mesures MIRE

Les mesures **ATF** sont un cas de mise optimale du casque sur l'oreille, de dimension moyenne, serrage moyen... Les mesures **MIRE** permettent de voir les différences d'atténuation totale ou passive entre les individus, dues à des morphologies différentes ou des mises en place du casque différentes.

2.3.1 Choix du microphone

Nous précisons ici quelques difficultés technique rencontrées lors des premières mesures **MIRE**. Celles-ci étaient dues à des limitations du microphone, initialement adapté aux prothèses auditives.

Le premier microphone utilisé *ER-7C series B* visible sur la figure (16) avait l'avantage d'être constitué d'un tube en plastique en amont du microphone à glisser à l'intérieur du canal auditif. Ceci permettait limiter les fuites entre le casque et la peau au niveau du tube par rapport à un fil électrique. En revanche, ce microphone n'était seulement capable de mesurer des atténuations correctes pour les casques testés en dessous de 3 kHz, pour des raisons détaillées dans l'annexe C.

Le deuxième microphone utilisé était du même type que celui de la figure (3), avec des caractéristiques techniques différentes. Les résultats obtenus avec ce microphone présentaient tous le même problème au dessus de 5 kHz. Ce problème est illustré sur la figure (17), qui

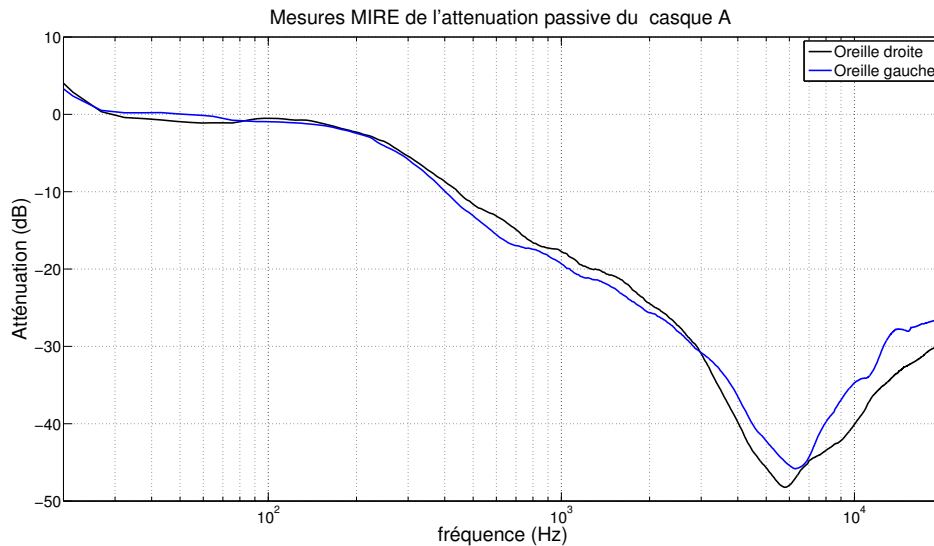


FIGURE 17 – Atténuation passive du casque A, microphone bruité

représente l'atténuation passive du casque A mesuré sur un sujet avec ce microphone pour les oreilles droite et gauche. On observe que l'atténuation diminue selon la même caractéristique pour les deux oreilles. Cette tendance s'est observée pour tous les casques testés à partir de fréquences du même ordre de grandeur (entre 4 kHz et 6 kHz).

Ce problème haute fréquence était en fait la conséquence d'un microphone trop bruité en hautes fréquences. Sur la figure (18), le bruit du microphone utilisé pour les mesures précédentes, ainsi que la densité spectrale de puissance estimée avec le casque A en **ANC** off mis en place sur 1 des sujets sont représentés. On voit sur la figure, que pour des fréquences $f > 6$ kHz, les deux courbes sont confondues ce qui montre que le microphone est trop bruité pour obtenir une estimation de l'atténuation pour ce casque.

Le microphone finalement utilisé a permis d'obtenir un bon rapport signal sur bruit jusqu'à $f \simeq 10$ kHz pour le casque avec la meilleure atténuation passive, ce qui est suffisant pour pouvoir comparer aux mesures perceptives mises en place, qui estiment l'atténuation à une fréquence maximum de 8 kHz.

2.3.2 Importance du fitting et du choix des sujets

Les mesures **ATF**, présentées dans la section (2.2), représentent le cas optimal où le sujet mettrait le casque parfaitement sur ses oreilles. En réalité, 2 sujets différents ne mettent pas le casque de la même manière ; certains le mettent mieux que d'autres, le serrage n'est pas le même sur des différentes têtes...

Présentons une petite expérience faite sur un sujet pour illustrer l'importance du "fitting" et du serrage, quand il s'agit de mettre le casque sur les oreilles d'un sujet. Le sujet avait les consignes de mettre le mieux possible le casque A pour 7 serrages différents²¹ avant de réaliser les mesures **MIRE**. Les atténuations passive et active du casque mesurées pour ces 7 réglages différents sont visibles sur la figure (19). Sur l'atténuation passive (figure (19(a))), on voit principalement 2 tendances différentes. Pour les 2 premiers réglages (casque très fermé), le bas du casque reposait sur l'oreille et le casque n'était donc pas bien mis autour des 2 oreilles. L'atténuation passive mesurée est donc très mauvaise à cause des fuites. Pour le réglage 7 (casque très ouvert), le haut du casque tombait sur le haut de l'oreille et le serrage était mauvais. L'atténuation passive

21. Réglages du serre-tête de fermé à ouvert

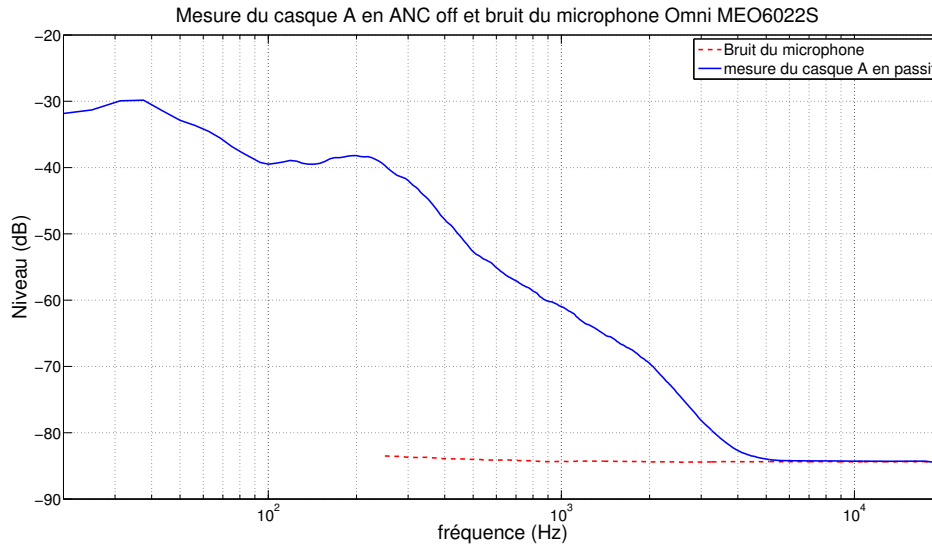


FIGURE 18 – Bruit du deuxième microphone utilisé pour les mesures **MIRE**

mesurée dans ce cas, même si meilleure que dans les 2 précédents cas est moins bonne d'environ 2 dB sur tout le spectre. Pour les autres réglages (de 3 à 6), le casque était ni trop ouvert, ni trop fermé et se mettait bien autour de l'oreille avec un serrage qui semblait uniforme. Cependant, plus le casque était ouvert, moins le serrage était important. Sur la figure (19(a)), les réglages optimaux sont les réglages 3 et 4 pour laquelle l'atténuation passive est globalement la meilleure.

Cela se confirme sur les courbes d'atténuation active sur la figure (19(b)). On remarque néanmoins pour celles-ci une nette différence sur l'efficacité du contrôle actif en fonction du réglage²².

On comprend l'importance du réglage pour obtenir une bonne atténuation. Le choix des sujets est donc aussi important. En effet, des sujets qui ont l'habitude de d'utiliser des caques audio les mettront mieux que des sujets inexpérimentés. Une fois les sujets choisis, il faut ensuite s'assurer des consignes à donner aux sujets pour mettre le casque. On distingue alors 3 types de consignes à donner. La première dite "subject-fit" consiste à laisser le sujet mettre le casque sans lui donner de consigne. Ce choix peut donner lieu à des résultats très variables en fonction des sujets. Le deuxième choix "experimenter-fit" impose au sujet de ne pas toucher au casque et de laisser l'expérimentateur le régler pour lui. Le dernier "subject-oriented" consiste à donner des consignes précises au sujet afin qu'il puisse mettre en place le casque de façon optimale. C'est cette méthode qui a été suivie pour nos mesures. Notons que l'on peut se servir d'un "fitting noise" pour aider le sujet à régler et positionner le casque.

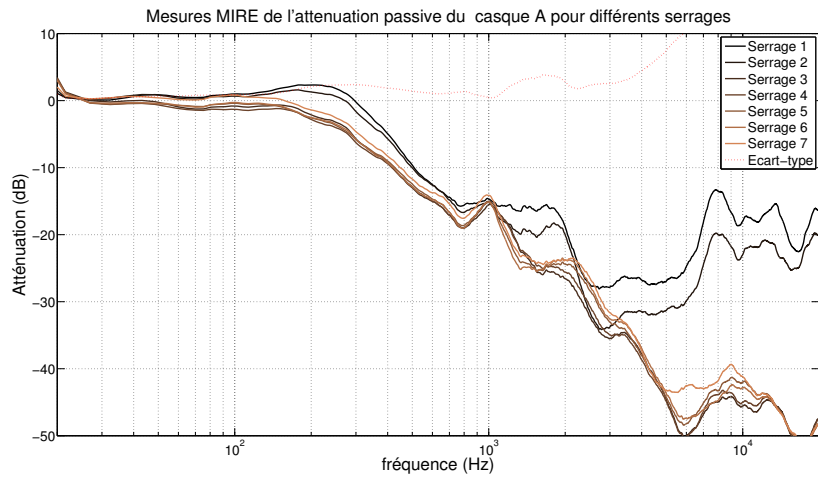
Ainsi, nous avons choisi pour nos tests 10 sujets qui ont l'habitude d'écouter de la musique et d'utiliser des casques audio. En revanche, ils présentaient des morphologies différentes et nous allons voir dans la suite (section (2.3.3)) l'influence de ces considérations sur les mesures de l'atténuation.

2.3.3 Résultats

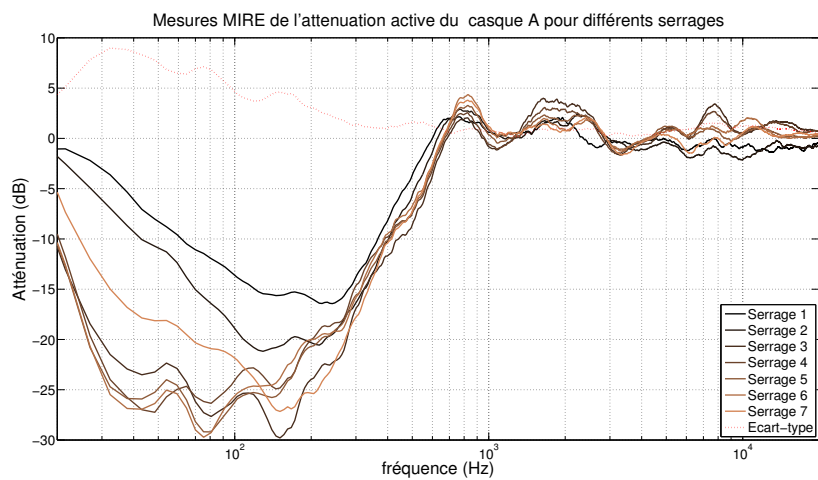
Parmi les 10 sujets, le sujet 4 gardait ses lunettes lors des mesures **MIRE**. Les sujets 8 et 10 avaient les cheveux longs, et le sujet 2 était le moins habitué à mettre des casques.

La figure (20) présente les courbes d'atténuation totale sur ces 10 sujets, pour les casques

²². Les fuites font chuter considérablement le contrôle actif sur ce casque

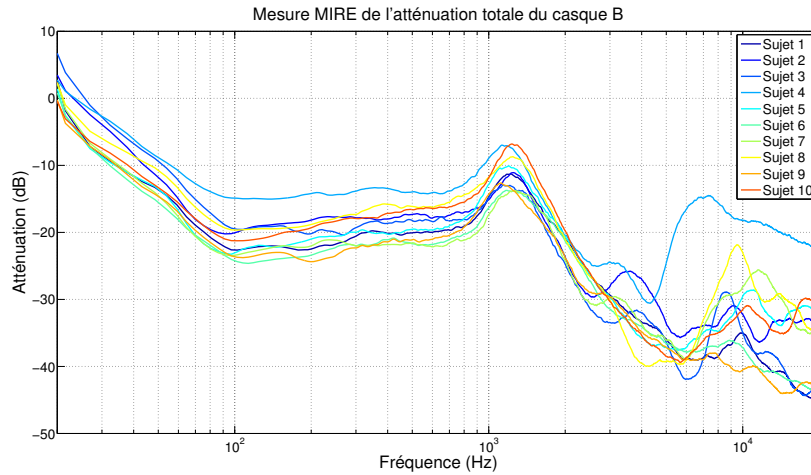


(a)

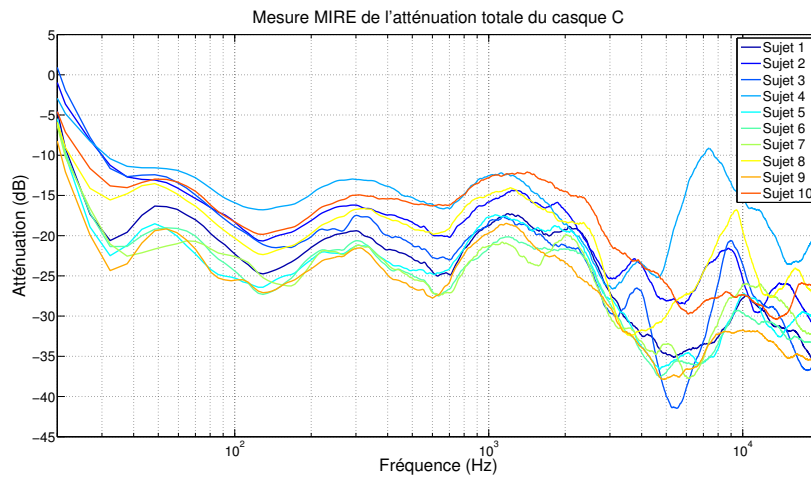


(b)

FIGURE 19 – Atténuation passive et active du casque A sur le sujet 1, pour plusieurs serrages du casque : (a) Atténuation passive ; (b) Atténuation active



(a)



(b)

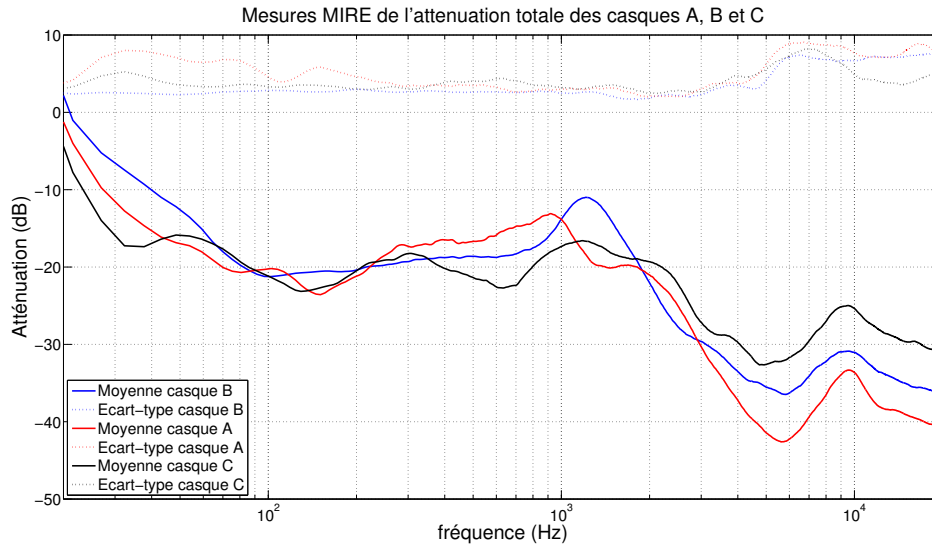
FIGURE 20 – Mesures **MIRE** de l'atténuation totale des casques B et C : (a) Atténuation totale du casque B; (b) Atténuation totale du casque C

B et C. Sur la figure (20(a)), on voit que le sujet portant des lunettes obtient une atténuation nettement inférieure aux autres sujets, ce qui est aussi le cas pour le casque C. Ceci est la conséquence des fuites au niveau des montures des lunettes qui passent entre la peau et le casque. Sur le casque B, la variabilité entre les 9 sujets restant est assez faible et les atténuations sont réparties uniformément, de 19 dB à 24 dB à 100 Hz (4 dB d'écart entre la meilleure atténuation et la moins bonne parmi ces 9 sujets, sur toute l'étendue du spectre). En revanche, on observe une plus grande variabilité sur le casque C. Pour ce dernier, les sujets 2, 8 et 10²³ obtiennent une atténuation nettement inférieure aux sujets 5, 6, 7 et 9. Si on regarde à nouveau la figure (20(a)), on s'aperçoit que ces sujets 2, 8 et 10 sont aussi ceux qui obtiennent la moins bonne atténuation, mais la différence est moins flagrante. Il existe donc un écart-type inter-sujets pour l'atténuation totale plus important pour le casque C que pour le casque B. Par ailleurs, ces deux figures montrent l'influence de la morphologie ainsi que de l'expérience sur l'atténuation.

Il est donc important de prendre en compte l'écart-type inter-sujet lors de l'affichage et du calcul de l'atténuation de casques audio ou de protections auditives²⁴. Par exemple la figure (21)

23. Les 2 sujets ayant les cheveux longs, et le sujet inexpérimenté

24. Cet écart-type est pris en compte dans l'évaluation du *Single Number Rating*[8]

FIGURE 21 – Mesures **MIRE** de l'atténuation totale des casques A, B et C

montre les moyennes et écarts-types sur ces 10 sujets de l'atténuation totale des casques A, B et C. Le casque A a le plus grand écart-type inter-sujets notamment pour des fréquences $f \geq 100$ Hz, et le casque B qui a l'écart-type le plus faible. Ainsi même si le casque C est en moyenne meilleur que le casque B, il se peut que certains sujets (comme le sujet 2 ou 8) aient une meilleure atténuation avec le casque C que le casque B

Remarquons pour finir les forts écarts-types en hautes-fréquences pour tout les casques. Une grande variabilité est en effet visible sur la figure (20), qui est la conséquence d'un mauvais positionnement du microphone dans l'oreille. En effet lors de la mise en place successive des différents casques, il se peut que le microphone bouge un peu sans que le sujet s'en rende compte. Ces petites modifications de la position du microphone difficilement contrôlables peuvent modifier considérablement le champ acoustique mesuré à ces fréquences par le microphone ce qui conduit à de telles différences visibles sur cette figure.

2.4 Mesures TAM

Cette section présente les résultats de la première version méthode perceptive **TAM** développée pendant le stage (section (1.2.1)).

2.4.1 Choix du timbre et des sujets

Les mêmes sujets que pour les mesures **MIRE** ont été choisis afin de pouvoir comparer les résultats des 2 mesures (voir partie (3)). Parmi ces 10 sujets, notons que le sujet 2 n'écoute pas régulièrement de la musique ni ne pratique un instrument de musique.

Revenons sur le choix du signal utilisé dans la méthode **TAM**, déjà mentionné dans la section (1.2.1). Le choix retenu pour nos mesures a été un signal à la fréquence fondamentale $f_1 = 62.5$ Hz composé de 8 harmoniques en puissance de 2 : $f_{2^k}, k \in \llbracket 1, 7 \rrbracket$ ²⁵. La question s'est posée de savoir quels gains choisir pour chacune des harmoniques. Le but est chaque harmonique puisse être audible par le sujet de manière à pouvoir l'ajuster, en **ANC** on comme en **ANC off**²⁶. Il ne fallait donc pas de composante prépondérante par rapport aux autres. Comme l'atténuation

25. Ou $f_1 = 78.75$ Hz, $f_1 = 99.20$ Hz

26. Le réglage se fait avec le casque toujours sur la tête

active affecte les basses fréquences, nous avons choisi un signal composé de 8 composantes avec les gains suivants : $g_1 = 0$ dB et $g_{2k} = -3k$ dB , $k \in \llbracket 1, 7 \rrbracket$, soit -3 dB par octave.

S'est ensuite posé la question de savoir si l'exercice en tant que tel était réalisable, c'est à dire si les sujets pouvaient ajuster chaque harmonique jusqu'à obtenir un timbre identique en **ANC** off au timbre en **ANC** on. Le filtre actif a en effet les 2 particularités suivantes : il n'est pas à phase linéaire, et il ajoute du bruit électrique au signal test. Le but du stage n'était pas de rentrer dans les détails des mécanismes perceptifs en jeu, mais mentionnons quelques éléments qui permettent de comprendre l'influence de ces deux paramètres sur le test.

Il est connu qu'un bruit large bande a un effet sur l'intensité perçue. E. Zwicker précise dans [16], p214 l'influence d'un bruit rose à 40dB sur l'intensité perçue d'une sinusoïde pure de 1 kHz. Lorsque le niveau sonore du signal test dépasse 60 dB, les intensités perçues avec et sans bruit sont comparables. Or les niveaux de bruits des casques testés sont très faibles par rapport au niveau du signal test (écart > 30 dB) ce qui permet de négliger cet effet dans notre cas²⁷.

Le filtre actif n'est pas à phase linéaire. Or, dans notre test, les sujets ajustent le timbre uniquement grâce à des sliders modifiant l'intensité de chaque composantes, sans se préoccuper de la phase de chaque composante. Mais quelle est l'influence de la phase sur la perception d'un timbre, ou de sons complexes, notamment lorsque plusieurs composantes se situent dans la même bande critique ? T. Buunen prouve dans [25] que la phase avait une influence sur la perception de sons composés de 3 composantes $f_0 - \Delta f$, f_0 et $f_0 + \Delta f$. R. Plomp et H. Steeneken complètent dans [26] sur l'effet de la phase sur la perception des sons complexes en montrant que :

1. L'effet maximal de la phase sur un un son complexe est obtenu en comparant un timbre dont les harmoniques sont déphasées de $\frac{\pi}{2}$ avec un timbre dont les harmoniques sont toutes en phase.
2. Cet effet maximal est toujours inférieur à l'effet d'un changement de gain des harmoniques de 2 dB par octave ou plus.
3. L'effet est plus important aux basses fréquences qu'aux hautes fréquences.
4. L'effet de la phase est indépendant de l'amplitude globale et de chaque harmonique sur la perception du timbre.

Ces résultats ont été obtenus sur des sons synthétisés, avec des harmoniques naturelles, multiples de la fréquence fondamentale. On peut penser que notre signal test, composé d'harmoniques à l'octave est encore moins sujet aux effets de phase voir pas du tout influencé par des variations de phase. Pour s'en convaincre, nous avons réalisé un petit test²⁸, en demandant à 3 sujets de comparer : le signal test avec toutes ses harmoniques en phase, avec ses harmoniques déphasées de $\frac{\pi}{2}$ ou avec des phases aléatoires, ainsi que les mêmes signaux sans leurs 4 harmoniques aigües²⁹. Aucun des 3 sujets n'a perçu de différence dans les signaux tests et nous avons conclu que la phase n'avait aucune influence sur la perception de notre signal test.

Une fois ces deux paramètres écartés, nous avons estimé qu'il était possible de parvenir à une perception de deux timbres équivalents dans les cas **ANC** on et **ANC** off, juste en jouant sur le gain des différentes composantes.

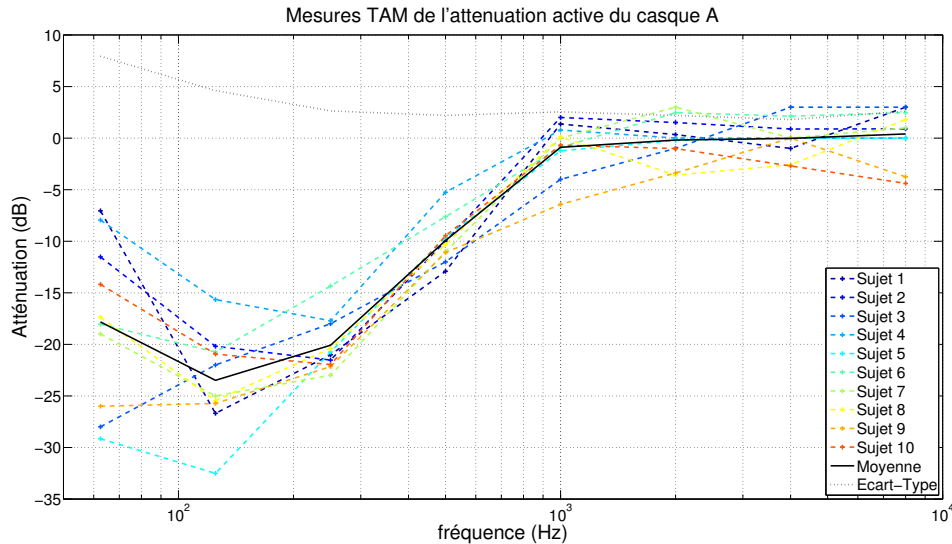
2.4.2 Résultats

Les mêmes sujets que pour les mesures **MIRE** ont passé le test **TAM** selon les même consignes "subject-oriented fit" (voir section (2.3)). Pour cette série de mesures, notons qu'au-

27. Il s'agit cependant d'un son complexe et pas d'une sinusoïde pure

28. Cette étape nécessiterait d'un test plus approfondi

29. de manière à regarder les basses fréquences, là où la phase est susceptible d'avoir le plus d'effet sur la perception

FIGURE 22 – Mesures **TAM** de l'atténuation active du casque

cune atténuation aléatoire entre -7 dB et $+3$ dB n'a été mise sur chaque composante (voir section (1.2.1)). Les résultats sont présentés dans la figure (22). Le sujet 4 est toujours celui qui possède l'atténuation la plus faible³⁰. En revanche, les autres tendances observées pour les mesures **MIRE** sont moins visibles sur ces mesures **TAM**. Le sujet 5 semble obtenir une meilleure atténuation que les autres de 5 dB environ pour les fréquences $f_0 = 62.5$ Hz et $f_1 = 125$ Hz. À part pour les sujets 1 et 3, la courbe obtenue pour les 4 premières harmoniques a la même allure, même si l'écart-type pour les 2 premières harmoniques est important. Pour les 4 harmoniques aigües, il y a aussi quelques disparités et on observe qu'en moyenne, les composantes sont toutes atténuées et pas amplifiées, et aucun waterbed effect³¹, caractérisé par une amplification locale de quelques dB généralement situé autour de la fréquence $f = 1kHz$ n'est visible³².

2.4.3 Biais possible

Quel biais peut-il y avoir sur la méthode présentée dans cette forme? Parmi les 10 sujets, la plupart étaient familiers avec les courbes d'atténuation, notamment les courbes d'atténuation active, et le fait qu'il puisse exister un waterbed effect plus ou moins important. Ces sujets peuvent donc être biaisés en tentant de se rapprocher d'une courbe d'atténuation active idéale avec le visuel de la position relative de tous les sliders (voir figure (7)).

Au contraire, certains sujets dont les sujets 3 et 9 notamment n'avaient aucune connaissance a priori sur l'allure des courbes d'atténuation active, ni de l'effet waterbed. Le fait qu'ils prennent part à une mesure d'atténuation peut les avoir inciter à atténuer toutes les composantes, sans oser en amplifier certaines et donc avoir biaisé la mesure. Sur la figure (22), on voit que ces 2 sujets ont nettement plus atténué la fréquence $f_5 = 1$ kHz que les autres sujets.

De plus, mentionnons que cette méthode mesure une coloration sonore des différentes harmoniques, et que les sujets ne se concentrent pas sur l'intensité globale du signal. Ils égalisent un timbre et non une intensité, et 1 sujet a notamment fait la remarque que le signal test **ANC** on lui paraissait toujours plus fort à la fin du test que le signal en **ANC** off, même s'il avait le sentiment d'avoir obtenu la même coloration sonore entre les deux signaux.

30. Celui qui porte des lunettes

31. On citera[24] pour avoir des détails sur ce waterbed effect

32. Nous reviendrons sur ce point dans la partie (3)

Nous verrons dans la partie suivante (3) si ces biais étaient réels et comment contourner les problèmes indiqués ci-dessus.

3 Analyse des Résultats

Dans cette partie, nous analysons dans premier temps les résultats présentés dans la partie (2), en expliquant les différences observées entre les différentes méthodes. Ensuite, nous tentons de comprendre en détail la différence entre les résultats **MIRE** et **TAM**. Nous suivons pour cela les différentes étapes de la démarche scientifique adoptée, visant à améliorer la méthode **TAM** et à répondre à la question suivante : les mesures **MIRE** de l'atténuation active normées selon **ANSI** sont-elles une bonne approximation de l'atténuation perçue ?

3.1 Différences entre les méthodes

3.1.1 Différences entre **MIRE** et **ATF**

Comparons ici les résultats des mesure **MIRE** et **ATF** sur l'atténuation du casque B. Les atténuations passive, totale et active de ce casque sont présentées sur la figure (23). En plus des courbes **MIRE** moyennées sur les 10 sujets et **ATF**, l'atténuation du sujet 7 est aussi affichée³³.

On voit sur la figure (23(a)) que l'atténuation passive est bien meilleure pour la mesure **ATF** que pour la mesure **MIRE**, même pour le sujet 7. Elle est meilleure de 3 à 6 dB de 100 Hz à 1 kHz. L'écart est moins important mais toujours visible sur l'atténuation active du casque B (figure (23(c))). Il y a au final un écart de 6 à 9 dB entre 150 Hz et 800 Hz sur l'atténuation totale comme on peut le voir sur la figure (23(b)).

La mesure **ATF** surestime donc considérablement l'atténuation du casque B. Ceci est la conséquence notamment de la surface de contact entre le casque et le contour de l'oreille. L'ajout de mousse sur la plaque (voir figure (14)), même si cela a permis de rendre les mesures **ATF** plus reproductibles (section (2.2)), a augmenté l'atténuation passive d'environ 3 dB sur l'ensemble du spectre. La mousse utilisée n'est en effet pas représentative de la peau et le contact entre le casque et celle-ci permet une meilleure étanchéification qu'entre le casque et la peau³⁴. De plus, même sans la mousse, la plaque de l'oreille *GRAS type 43AG* est plate ce qui n'est pas le cas du contour de l'oreille. En réalité, la force de serrage n'est pas répartie uniformément tout autour de l'oreille. En dessous de l'oreille notamment, il y a un "creux" au niveau duquel la force est moins importante, et il peut y avoir des fuites, qui sont responsables de la majeure partie de la différence remarquée sur la figure (23). Enfin, le fil électrique du microphone **MIRE** peut être responsable très localement de fuites qui affectent directement l'atténuation.

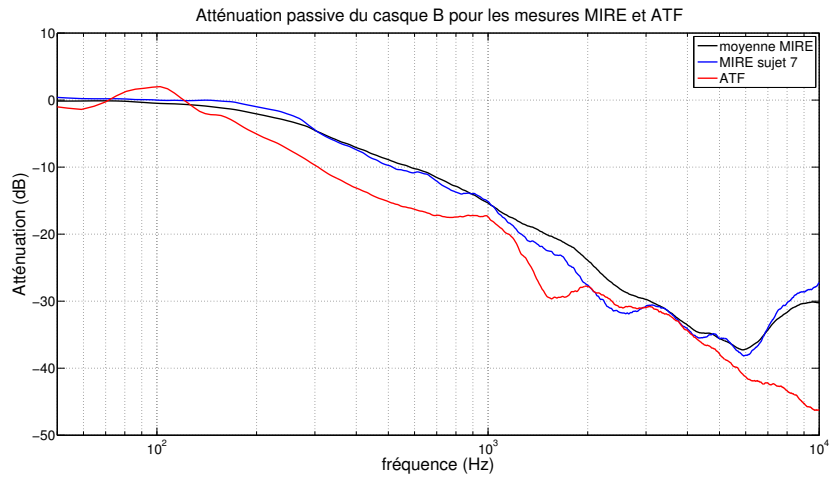
Nous voyons donc que même très bien mis sur l'oreille, l'atténuation du casque est en général inférieure à celle mesurée sur l'oreille *GRAS*.

3.1.2 Différences entre **TAM** et **MIRE**

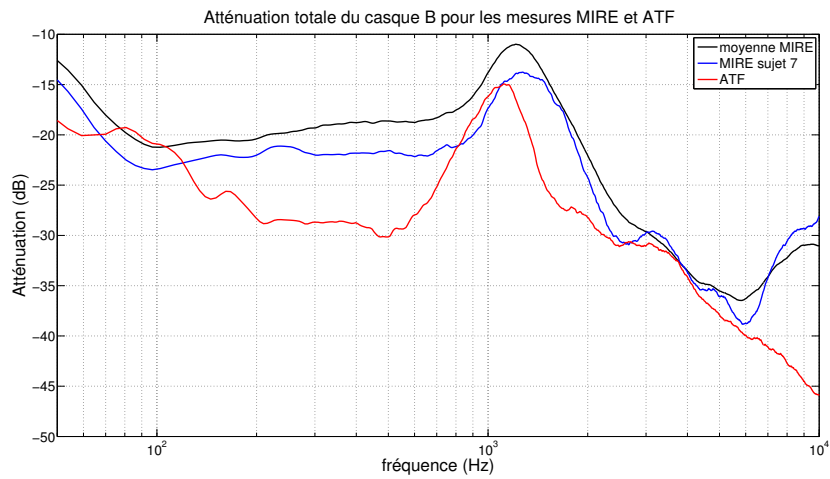
La figure (24) montre les atténuations actives du casque A mesurées avec les méthodes **ATF**, **MIRE** et **TAM**. L'atténuation **ATF** est meilleure pour ce casque comme pour le casque B (voir section précédente (3.1.1)). Si on compare les courbes d'atténuation **TAM** et **MIRE**, on voit que les deux composantes les plus aiguës sont assez similaires, ainsi que les deux fréquences les plus graves $f_0 = 62.5$ et $f_1 = 125$ Hz. En revanche, les 4 harmoniques intermédiaires ont été réglées avec en moyenne une atténuation de 3 à 5 dB supérieurs à **MIRE**. L'allure des deux courbes reste similaire mais l'atténuation **TAM** est globalement meilleure que **MIRE**. Mais cela ne veut pas dire que l'atténuation perçue est supérieure à **MIRE**, à cause du biais possible de la mesure, détaillé dans la section (2.3.3).

33. Qui possède une des meilleures atténuation

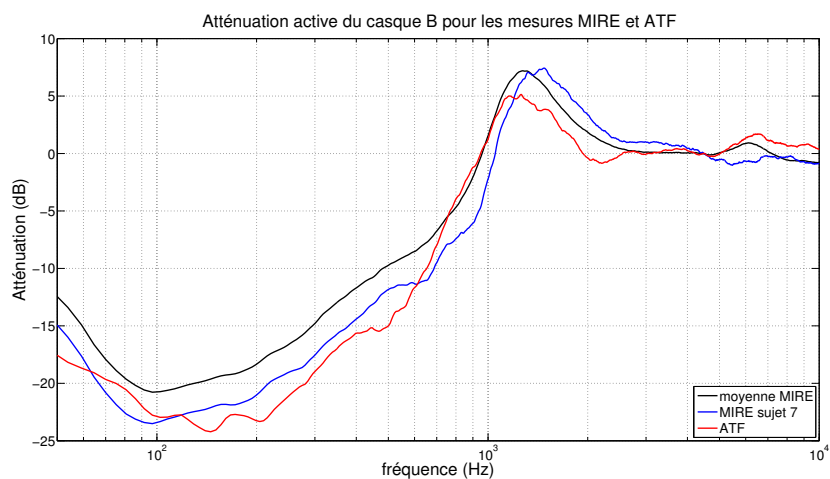
34. La partie supérieure du casque repose en plus sur les cheveux donc les fuites sont à ce niveau plus importantes



(a)

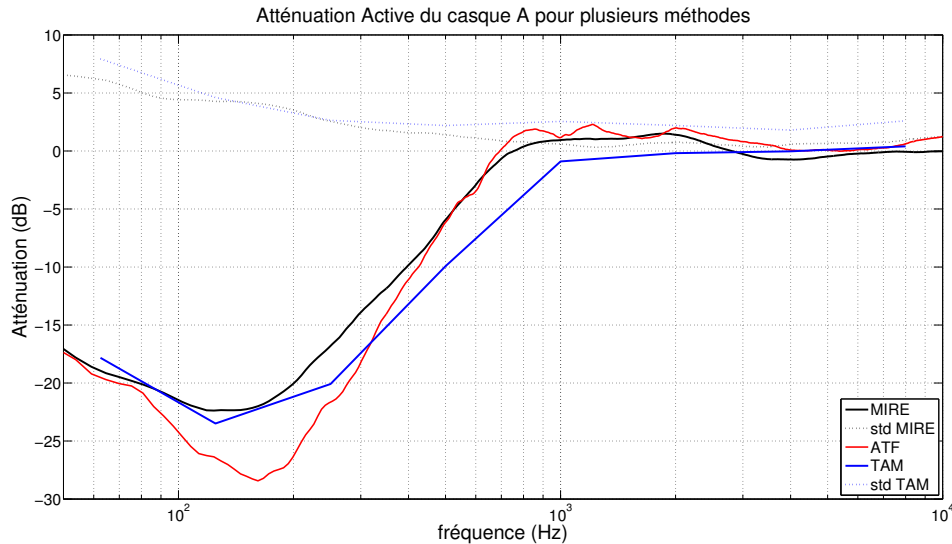


(b)



(c)

FIGURE 23 – Atténuations du casque B pour les méthodes **MIRE** et **ATF** : (a) Atténuation passive ; (b) Atténuation totale ; (c) Atténuation active

FIGURE 24 – Atténuation active du casque A pour les méthodes **MIRE**, **ATF** et **TAM**

La figure (25) montre les atténuations **MIRE** et **TAM** obtenues pour 4 sujets différents. Pour les 4 sujets, l'atténuation **TAM** est effectivement meilleure que **MIRE** dans les médium pour les 4 composantes $f_k = 62.5 * 2^k$ Hz, $k \in \llbracket 2, 5 \rrbracket$. En revanche, il y a des différences obtenues en basses fréquences pour les composantes $f_0 = 62.5$ Hz et $f_1 = 125$ Hz. Les sujets 5 et 8 (figures (25(c)) et (25(d))) ont obtenu avec la méthode **TAM** des atténuations pour ces 2 composantes supérieures à celles de **MIRE**. Les 2 courbes **TAM** obtenues semblent être décalées vers le bas d'environ 5 dB par rapport à **MIRE**. En revanche le sujet 7 a obtenu des atténuations pour ces 2 composantes similaires entre les deux méthodes, alors que le sujet 1 a obtenu une atténuation nettement inférieure avec la méthode **TAM** qu'avec la méthode **MIRE** pour la première composante $f_0 = 62.5$ Hz. Sur la figure (24), on remarque que l'écart-type pour cette première composante est très important pour la méthode **TAM**, d'environ 8 dB³⁵. Il semblerait donc que la première composante du signal soit difficile à régler avec la méthode **TAM** et qu'elle ne soit pas indispensable pour régler la couleur globale du signal test.

Notons que les 10 sujets ont passé les test **MIRE** et **TAM** sur 2 sessions différentes. Ils ont ainsi pu mettre le casque différemment d'une session à l'autre. Or nous avons vu dans la section (2.3) l'importance du positionnement du casque sur l'atténuation active, surtout pour la casque A. Nous proposerons dans la section (3.3.2) un test qui permettrait de s'affranchir de ce problème.

Nous avons désormais 2 courbes d'atténuation active différentes pour le casque A, avec les méthodes **MIRE** et **TAM**. Une question se pose désormais : laquelle de ces 2 méthodes est la plus proche de l'atténuation réellement perçue ? Il semblerait à priori que ce soit la méthode subjective **TAM**, qui mesure une atténuation perçue par définition. Cependant nous avons vu dans la section (2.4.3) des paramètres qui pouvaient biaiser la méthode, donc donner de mauvais résultats. Les sections suivantes suivent la démarche scientifique adoptée pour répondre à ces questions, en proposant les améliorations de la méthode **TAM** pour arriver à la méthode finalement testée présentée dans la section (1.2.4).

35. Seulement 2 dB de plus que l'écart-type de la méthode **MIRE** : cependant ce ne sont pas nécessairement ceux qui obtiennent la plus faible atténuation avec **MIRE** qui obtiennent aussi la plus faible atténuation avec **TAM**, et vice-versa.

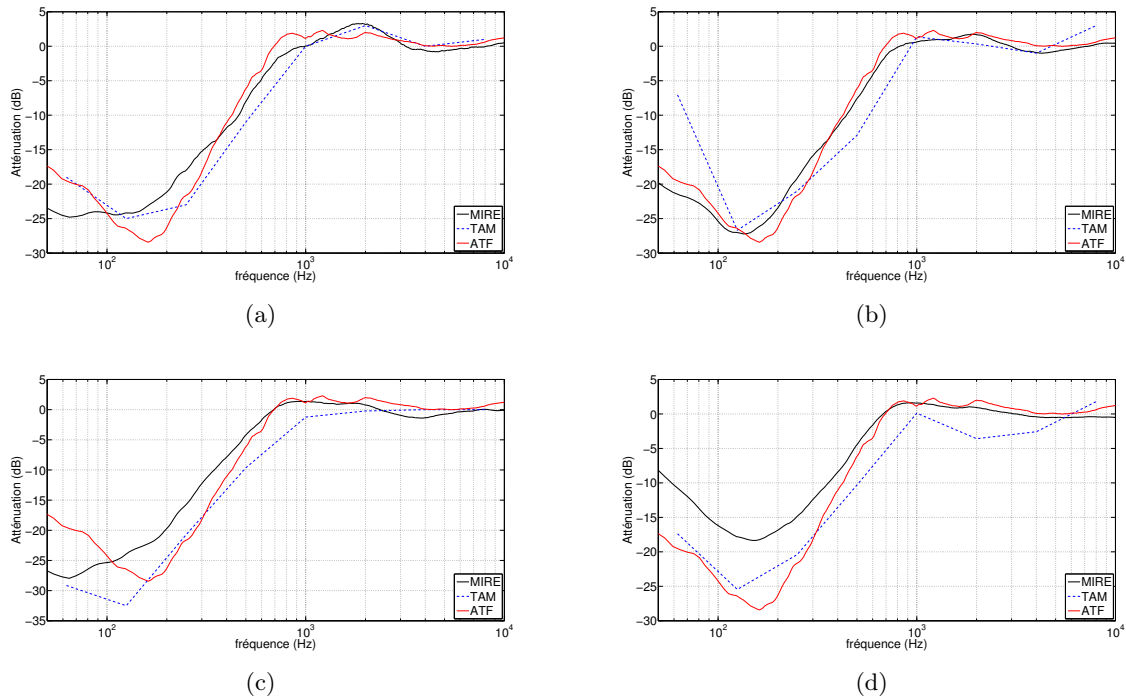


FIGURE 25 – Atténuation active du casque A avec les méthodes **MIRE**, **TAM** et **ATF** pour les sujets : (a) Sujet 7 ; (b) Sujet 1 ; (c) Sujet 5 ; (d) Sujet 8

3.2 Test comparatif entre **MIRE** et **TAM**

3.2.1 Test comparatif entre 2 méthodes

Cette section présente un mis en place lors du stage pour comparer 2 atténuations différentes sur un même sujet. Elle ne mesure donc pas l'atténuation active d'un casque mais permet de déterminer quelle mesure représente le mieux l'atténuation perçue entre 2 mesures données.

Illustrons le principe de cette méthode comparative sur un exemple. Imaginons que l'on obtienne deux courbes d'atténuation active différentes avec **TAM** et **MIRE** sur un sujet pour un casque A donné comme sur la figure (26). Sur cette figure (26), nous apercevons des différences entre les 2 courbes de plus de 1 dB³⁶ un peu sur tout le spectre, notamment dans les basses avec plus de 3 dB d'écart entre les deux courbes pour des fréquences $f < 300$ Hz. Nous aimerions savoir laquelle de ces 2 courbes représente le mieux l'atténuation perçue par le sujet 1.

L'idée est la suivante : récupérer des bruits de la vie courante (bruit d'avion, de pluie, de métro...) et leur appliquer à chacun les atténuations sur les courbes bleue et noire de la figure (26). L'utilisateur choisit ensuite le bruit parmi ces deux bruits atténués selon **TAM** ou **MIRE** celui qui correspond le plus à ce qu'il entend lorsque le contrôle actif du casque A est en marche³⁷.

L'utilisateur a donc devant lui l'interface graphique représentée sur la figure (27). Comme pour toute les mesures présentées dans les sections (1.1) et (1.2), il est placé au même endroit (voir figure (2(b))), avec le casque mis en place. Lorsqu'il clique sur le timbre A, le contrôle actif du casque est mis en route, et le bruit parmi ceux cités plus haut est joué tel quel sur le système 5.1 (voir section (1.1)). Lorsqu'il clique sur B ou C, le contrôle actif est désactivé et le même bruit atténué selon la courbe **MIRE** ou **TAM**³⁸ est joué sur le même système. De plus, le bouton du

36. Seuil moyen de perception d'une différence d'intensité[16]

37. L'utilisateur ne connaît pas la forme des 2 atténuations sur la figure (26)

38. L'attribution aux boutons B et C des atténuations est aléatoire pour chaque test

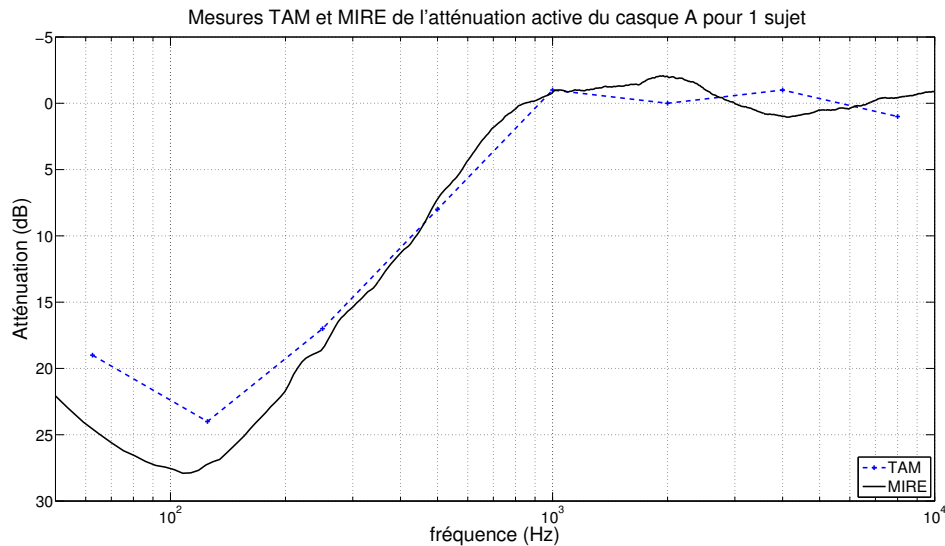
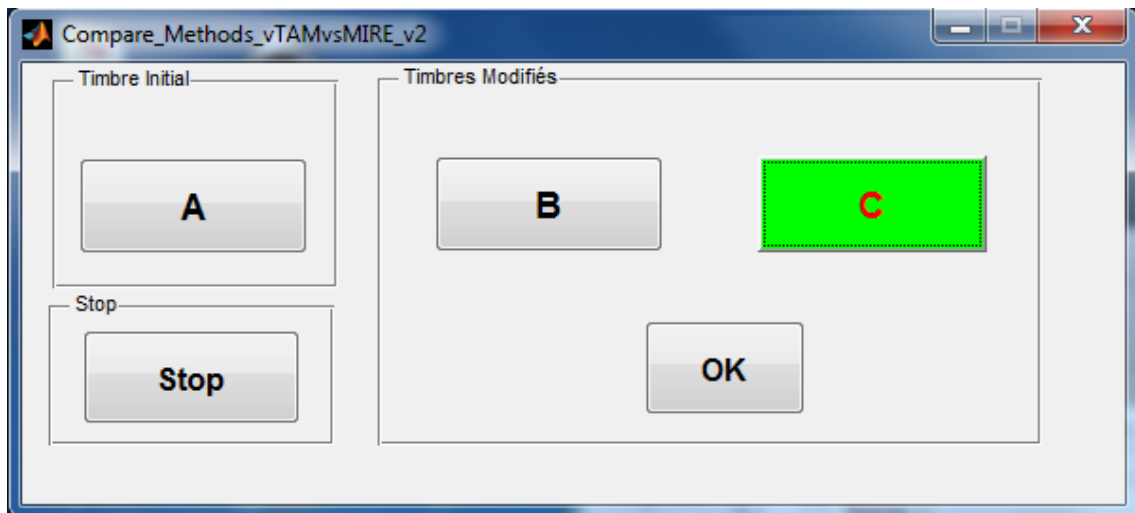
FIGURE 26 – Mesures **TAM** et **MIRE** de l'atténuation active du casque A pour un sujet

FIGURE 27 – Interface graphique de la méthode comparative

dernier timbre joué (B ou C) devient vert. L'utilisateur peut écouter les différents timbres A, B et C autant de fois qu'il le désire, jusqu'à ce qu'il choisisse le timbre parmi B ou C qui ressemble le plus à A. Il appuie ensuite sur le bouton *OK* pour valider son choix. Il peut aussi cliquer sur *STOP* afin de réinitialiser le lecteur audio (utile pour certains sons non-stationnaires).

Le test est répété 3 fois pour chaque bruit (5 ou 6 bruits utilisés par test), de manière à déceler d'éventuel choix aléatoires de l'utilisateur, sur des bruits dont l'énergie est répartie de manière différente, le tout dans un test n'excédant pas 15 minutes³⁹.

Notons qu'à l'issue de chaque test, un fichier "**nomsujet.csv**" est créé, contenant non seulement les choix (**MIRE** ou **TAM** dans ce cas) du sujet pour chaque étape de chaque bruit, mais aussi les valeurs des énergies par octave des bruits ainsi que de la différence d'atténuation $AIL_{MIRE} - AIL_{TAM}$ par octave de manière à trouver d'éventuels variables explicatives dans le cas d'un choix non univoque entre les deux méthodes par l'utilisateur.

39. Les détails techniques de cette méthode comparative sont présentés dans l'annexe (B)

3.2.2 résultats

Pour évaluer les 2 méthodes, afin de répondre à la question posée dans la section précédente (3.1), le test comparatif présenté en détail dans la section précédente (3.2.1) et dans l'annexe B a été utilisé. Les 10 même sujets ont donc passé un troisième test, durant lequel ils devaient choisir l'atténuation la plus "réelle" parmi **TAM** ou **MIRE** pour 6 parmi 7 bruits qui sont les suivants : un bruit rose, un bruit de l'intérieur d'un avion, un bruit de l'intérieur d'une voiture, un bruit de pluie, un bruit d'aspirateur, un bruit d'une cour de récréation et le signal test **TAM**.

Pour chaque sujet, les atténuations mesurées par **TAM** et **MIRE** étaient appliquées aléatoirement sur les boutons B ou C (voir figure (27)). Au final, il y a eu 80 % de réponses **MIRE** contre seulement 20 % de réponses **TAM**. Les sujets 1, 5, 9 et 10 ont répondu à 100 % **MIRE** ce qui montre notamment que la mesure **TAM** du sujet 5 visible sur la figure (25(c)) surestime l'atténuation par rapport à l'atténuation perçue. Le sujet 4, qui portait des lunettes a répondu 12 fois sur 18 **TAM**, probablement à cause des différences de mise en place du casque entre chaque session de test. Le bruit de cour de récréation a eu 45 % de réponse **TAM** contre 55 % de réponses **MIRE**, ce qui montre qu'il est difficile de choisir entre les deux méthodes pour ce bruit, probablement à cause du fait qu'il soit non stationnaire, et qu'il ait peu d'énergie en basses fréquences. Enfin, nous pouvons noter que pour le signal test, utilisé par la méthode **TAM** n'a eu que 50 % de réponses **TAM**, ce qui montre que certains sujets n'ont pas réussi à obtenir un réglage parfait sur les composantes, et que la méthode n'est pas assez précise.

En résumé, nous pouvons dire que la méthode **TAM** surestime probablement l'atténuation active du à un des biais possible présentés dans la section (2.4.3). Nous pouvons ajouter que le réglage de 8 harmoniques simultanément dans la méthode actuelle est peut être trop compliqué pour des sujets sans entraînement, et nécessiterait plusieurs mesures consécutives pour chaque sujet qui soient ensuite moyennées pour avoir une atténuation cohérente⁴⁰. Ajoutons que le biais causé par les différences de positionnement du casque entre les sessions nous empêche de dresser certaines conclusions sur ce test, par exemple sur les réponses du sujet 4 portant des lunettes.

Face à ces problèmes, nous pouvons envisager les développements suivants pour améliorer la méthode **TAM** :

1. Trouver des solutions pour se débarrasser du biais de la mesure présenté dans la section (2.4.3).
2. Faciliter la méthode en entraînant les sujets ou en réduisant les paramètres à régler.
3. Faire des mesures successives puis moyenner les résultats.
4. Se débarrasser du biais causé par les différents positionnements du casque entre chaque session de test.

3.3 Amélioration de la méthode **TAM**

Un des biais possible de la mesure **TAM** mentionné dans la section (2.4.3) se justifie par le fait que la plupart des sujets n'aient pas conscience qu'ils mesurent une atténuation active et qu'il puisse y avoir un waterbed effect, donc des composantes du signal test à amplifier et non à atténuer. Ainsi, ils ajustent le timbre en atténuant toutes les composantes, jusqu'à arriver à la sensation d'une même couleur sonore sans forcément une même intensité.

Pour contourner ce problème, plusieurs solutions ont été envisagées.

- Informer les sujets sur ce qu'est un waterbed effect, et le fait qu'ils mesurent une atténuation active, efficace en basses-fréquences.

40. Et éviter le cas où certaines composantes seraient mal réglées comme dans la figure (25(b)).

- Proposer un réglage master volume une fois le test **TAM** terminé afin de régler le l'intensité indépendamment du timbre.
- Imposer une atténuation aléatoire à toutes les composantes, de manière à forcer le sujet à "amplifier" certaines composantes sur les sliders.

La première solution, bien que plus facile à réaliser puisque ne nécessitant d'aucune modification de l'interface utilisateur comportait le risque de biaiser le test à nouveau dans l'autre sens, en poussant les sujets à amplifier certaines composantes, et n'a donc pas été retenue. Parmi les deux solutions suivantes, c'est finalement la deuxième qui a été testée car elle permettait d'éviter que les sujets habitués ne règlent les différentes composantes grâce au visuel de la position des sliders (voir section (2.4.3)). Les résultats obtenus avec cette modification sont présentés dans la section suivante (3.3.1).

De plus, nous avons vu dans la section précédente que la méthode **TAM**, avec 8 composantes à régler simultanément était trop compliquée pour des sujets non expérimentés. Afin de permettre à tous les sujets même non expérimentés de passer le test, nous avons voulu diminuer le nombre de composantes à régler simultanément à 4, tout en gardant les 8 composantes du signal test. Pour cela, plusieurs solutions étaient aussi envisageables.

- Fixer 4 composantes du signal avec la mesure **MIRE**
- Régler 4 composantes indépendamment selon des critères d'intensité (méthode **LBM** modifiée présenté dans la section (1.1.2.2))
- Trouver un compromis entre les 2 solutions précédentes : fixer 2 composantes et régler 2 autres selon la méthode **LBM** modifiée.
- Régler d'abord 4 composantes puis 4 autres en partant des atténuations mesurées par la méthode **MIRE**.

Nous voulons pouvoir comparer les résultats des méthodes **TAM** et **MIRE**. La première solutions consistant à se servir des mesures **MIRE** pour définir les atténuations de 4 composantes n'a donc pas été retenue. C'est finalement la troisième solution qui a été choisie pour la méthode hybride **TAM LBM** présentée dans la section (1.2.4).

3.3.1 Comparaison entre **TAM** et **LBM** modifiée

Afin de choisir quelles composantes du signal test régler par la méthode **LBM** modifiée pour notre méthode hybride, nous avons fait passer le test **TAM** ainsi que le test **LBM** 10 fois au même sujet 7, 10 jours consécutifs. Ceci permettait en plus de mesurer l'importance de l'entraînement pour les 2 méthodes. De plus, la méthode **TAM** a été modifiée pour ce test : une atténuation aléatoire entre -7 dB et $+3$ dB était appliquée à chaque composante du signal avant le début de chaque réglage⁴¹. Les 2 mesures **TAM** et **LBM** étaient réalisées à la suite, pour chaque test et ainsi avoir les mêmes positionnements du casque lors d'une session.

La figure (28) présente les résultats obtenus pour ce sujet après ces 10 tentatives. Sur la figure (28(a)), on observe globalement les choses suivantes. Pour les trois premières composantes, $f_0 = 62.5$ Hz, $f_1 = 125$ Hz et $f_2 = 250$ Hz, la variabilité entre les sessions est assez importante, la tendance sur générale de la courbe pour les basses-fréquences n'est observable qu'en moyenne. Les mesures 1, 6 10 donne par exemple des résultats assez différentes deux à deux. En revanche, les résultats pour la quatrième composantes $f_3 = 500$ Hz sont très reproductibles puisque on note une différence de seulement 3 dB sur les 10 mesures. Le constat est le même pour les quatre composantes aigües que pour les 3 composantes graves. Il semble qu'il soit plus facile de régler les médiums avec cette méthode, comme nous l'avions déjà remarqué dans la section (2.4). Il apparaît sur la figure (28(b)) que les résultats sont assez similaires pour la méthode **LBM**, sauf

41. Cette atténuation aléatoire était aussi appliquée pour la méthode **LBM** pour que le sujet ne puisse pas s'aider de la position des sliders entre 2 mesures consécutives.

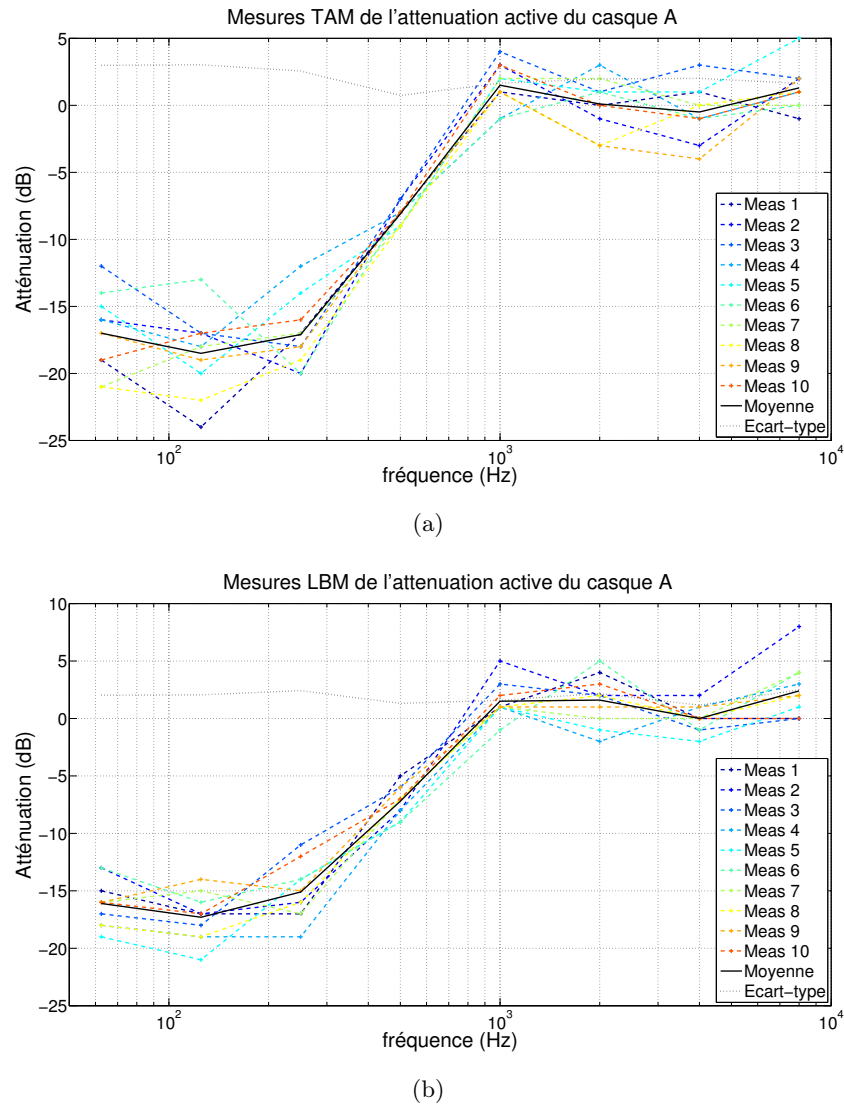


FIGURE 28 – Mesures **TAM** et **LBM** de l'atténuation active du casque A : (a) Méthode **TAM** ; (b) Méthode **LBM**

pour les 2 composantes graves, qui présentent une moins grande variabilité avec un écart-type de 2 dB contre 3.5 dB pour la méthode **TAM** environ. Les écarts-types sur les 10 mesures réalisées reste assez importants, notamment pour la fréquence $f_2 = 250$ Hz ou il est supérieur à 2.5 dB pour les deux méthodes, mais ces écarts sont peut-être encore une fois la conséquence de positionnements du casque différents d'une session à l'autre. Nous avons en effet vu dans la section (2.3) que l'efficacité de l'atténuation active du casque A était particulièrement liée au réglage du casque.

La figure (29) montre les atténuations active du casque A sur le sujet 1 obtenues en moyennant les 10 mesures **TAM**, les **LBM** et 3 mesures **MIRE**⁴². Les résultats sont différents de ce qui a été présenté dans la section (3.1). Les 3 courbes sont similaires pour les fréquences $f > 300$ Hz notamment dans les médiums ce qui n'était pas le cas sur la figure (24). En revanche, les atténuations mesurées avec les méthodes perceptives sont nettement inférieures à l'atténuation mesurée avec la méthode **MIRE** pour les basses fréquences, de plus de 5 dB de pour $f < 200$ Hz. L'atténuation mesurée avec la méthode **LBM** semble légèrement plus faible que celle de **TAM** pour les basses fréquences, notamment pour la troisième composante du signal $f_3 = 250$ Hz.

42. Moyenne entre oreille droite et oreille gauche

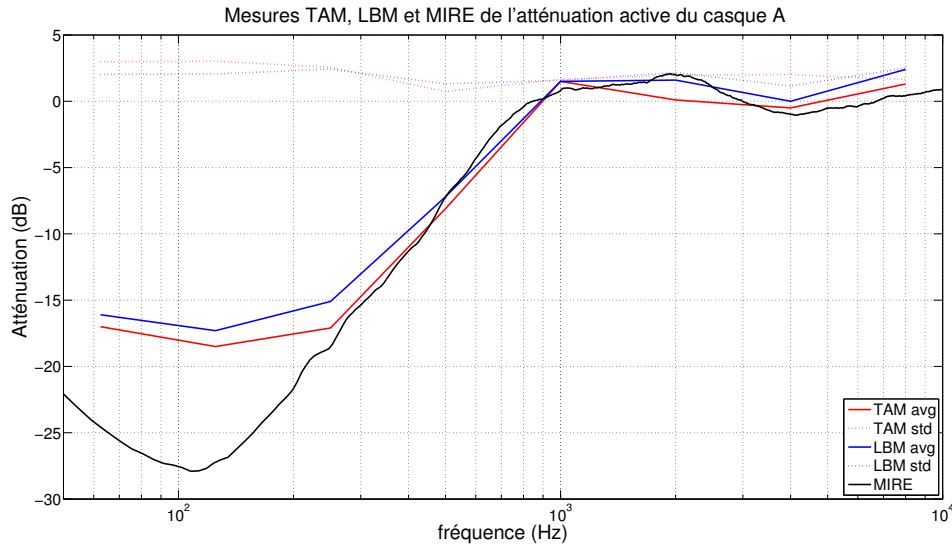


FIGURE 29 – Comparaison de l'atténuation active du casque A pour les méthodes **TAM**, **LBM** et **MIRE**

Cependant, l'écart est trop faible (environ 1 dB) pour affirmer qu'il y ait une réelle différence entre les deux méthodes, sur seulement 10 tests. On vérifie par contre sur cette figure ce qui a été mentionné au paragraphe précédent sur l'écart-type pour chaque méthode de toutes les composantes.

Cette étape a permis de choisir les composantes du signal test à fixer avec avant le réglage, et celles à régler avec la méthode **LBM**. Comme les hautes fréquences sont peu affectées par le contrôle actif et les composantes f_7 et f_8 ont des écarts-types comparables entre les deux mesures perceptives, ces dernières ont été choisies comme composantes à fixer avant le réglage des 6 autres composantes par la méthode **TAM** hybride. De plus, comme nous venons de voir, l'écart-type des 2 premières composantes f_0 et f_1 est supérieur pour la méthode **TAM** à celui de la méthode **LBM** pour des moyennes équivalentes (à 1 dB près). Ces deux composantes sont donc celles qui sont réglées grâce à la méthode **LBM** dans la méthode **TAM** hybride.

3.3.2 Méthode hybride

Pour préparer la dernière session et tester la méthode **TAM** hybride, nous avons choisi de mesurer le casque B, dont l'atténuation active est moins sensible à des différences sur le positionnement que le casque A (voir section (2.2)). De plus, pour éviter les différences pouvant exister même sur ce casque entre deux mises en place successive du casque, nous avons élaboré un test qui mesure lors d'une même session⁴³ d'abord l'atténuation active par la méthode **MIRE**, puis par la méthode **TAM** hybride. Le test a été réalisé sur 8 sujets, dont 7 ont participé aux précédentes mesures. La méthode a aussi été testée sur le sujet 7 10 fois, comme pour l'étape précédente.

La figure (30) montre les résultats obtenus pour ces 8 sujets, avec les méthodes **MIRE** et **TAM** hybride. On observe sans surprise sur la figure (30(a)) que le sujet 4 portant des lunettes possède une fois de plus l'atténuation la plus faible. Mise à part les sujets 2 et 10 pour lesquels les atténuations active des deux méthodes sont assez éloignées, les résultats pour les autres sujets sont similaires à ceux obtenus dans la section précédente (3.3.1) : les médiums sont à peu près équivalents tandis que l'atténuation des 2 premières composantes est plus faible de quelques dB

43. Donc d'une même disposition du casque

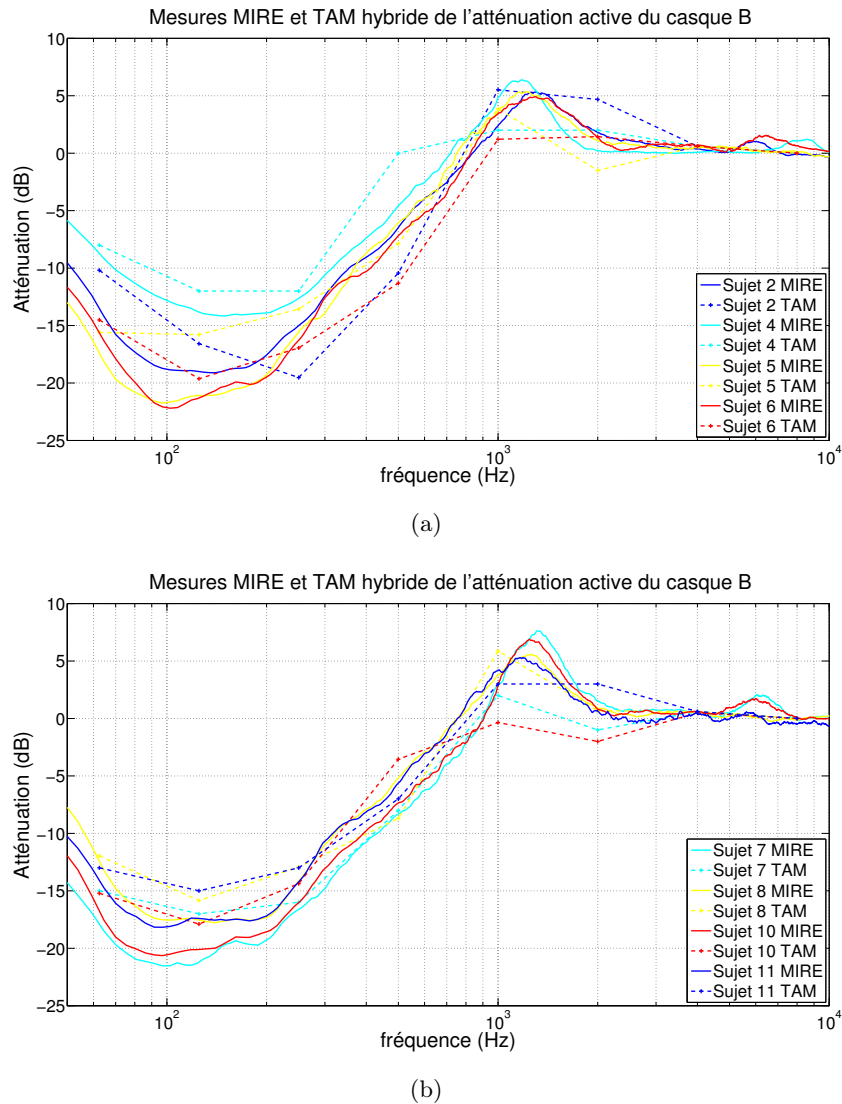


FIGURE 30 – Mesures **TAM** hybride de l'atténuation active du casque A : (a) 4 premiers sujets ; (b) 4 autres sujets

pour la méthode **TAM** hybride, par rapport à **MIRE**. Ceci peut être vérifié sur la figure (31) qui montre les moyennes et écarts-types obtenus pour les deux méthodes, sur ces 8 sujets. Parmi les 8 composantes du signal, seules les 2 premières f_0 et f_1 présentent un écart significatif (d'environ 3 dB à 100 Hz) avec la mesure **MIRE**. Celles-ci possèdent aussi étrangement un écart-type inférieur à **MIRE**. En revanche, l'écart-type de la composante f_2 pour la mesure **TAM** hybride est élevée, d'environ 4 dB soit 2 dB de plus que pour la mesure **MIRE**. Il aurait fallu plus de sujets, pour pouvoir analyser précisément ces résultats. Tout de même, il semble que soit **MIRE** surestime l'atténuation en basses-fréquences par rapport à l'atténuation perçue, soit que la méthode **TAM** hybride sous-estime cette atténuation⁴⁴, et donc encore biaisée.

Regardons désormais les résultats du sujet 7, présentés sur la figure (32). Sur la figure (32(a)), on peut voir que les mesures **MIRE** sont assez reproductibles pour ce casque. Les mesures **TAM** hybride sont également très reproductibles avec des écarts de seulement 1 dB sur toutes les mesures pour les deux premières composantes et 2 dB au maximum pour les autres composantes. Un sujet entraîné peut donc parvenir à une très bonne précision avec cette méthode. Les résultats

44. P. Guiu dans [14] et J. Zera dans [13] montrent que la méthode **LBM** sous-estime l'atténuation en basses-fréquences.

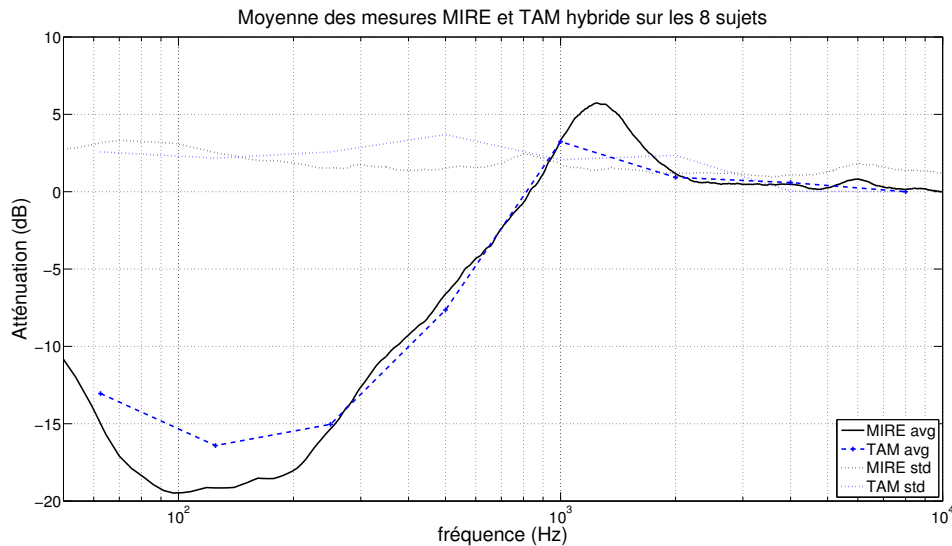


FIGURE 31 – Atténuation active du casque B pour les méthodes **TAM** hybride et **MIRE**

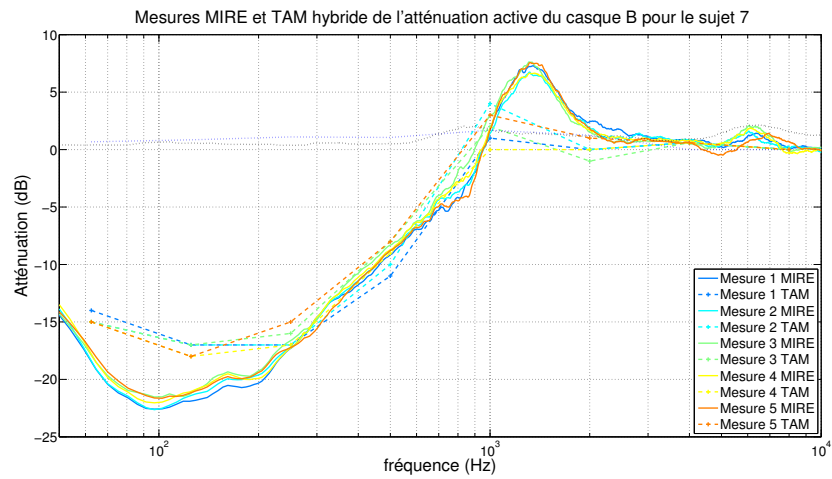
présentés sur la figure (32(b)) sont très semblables à ceux obtenus sur l'ensemble des 8 sujets, avec des écarts significatifs entre les deux méthodes seulement pour les deux premières composantes. En revanche, Les écarts-types obtenus pour un sujet entraîné sont très proches de ceux obtenus avec la mesure **MIRE**, avec une différence de moins de 0.3 dB pour les huit composantes. Ceci montre notamment que l'on peut parvenir à des écarts-types comparables à ceux de **REAT** avec des sujets entraînés, sur une méthode perceptive de mesure de l'atténuation active.

Il reste à savoir si c'est la méthode **MIRE** qui surestime l'atténuation en basses fréquences, ou si c'est la méthode **TAM** hybride qui est biaisée et qui conduit à un réglage des huit composantes qui ne corresponde pas exactement à l'atténuation active perçue, et qui de ce fait au contraire sous-estime l'atténuation perçue.

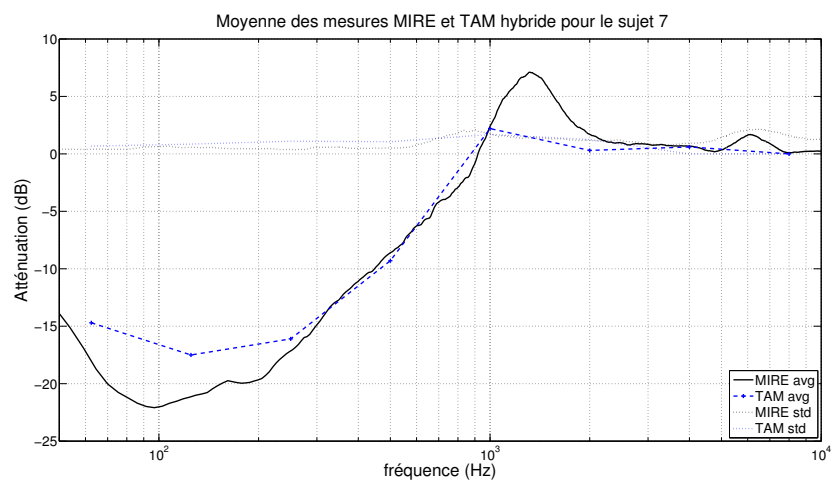
3.4 Test comparatif entre **MIRE** et la méthode hybride

Nous présentons ici le test comparatif final pour déterminer laquelle des deux atténuations **MIRE** ou **TAM** mesure le mieux l'atténuation perçue par l'utilisateur. Cependant, elle n'a pas encore été testée et nous mentionnons comment l'expérience sera réalisée.

Ce dernier test ressemble au test détaillé dans la section (3.2). Toutefois, plutôt que de prendre les atténuations mesurées sur des sessions différentes, et ainsi éviter les problèmes dus au positionnement du casque, 2 microphones sont placés dans chaque oreille avant le début du test comparatif afin de refaire une mesure **MIRE** sur chaque sujet, utilisée pour le test. Par ailleurs, plutôt que de prendre les atténuations **TAM** hybride personnelles de chaque sujet et éviter ainsi un mauvais réglage par un sujet non entraîné, une atténuation **TAM** moyenne est calculée à partir de cette mesure **MIRE**, en ôtant la différence moyenne visible sur la figure (31) pour $f < 250$ Hz de l'atténuation mesurée sur chaque sujet, et en gardant l'atténuation **MIRE** pour $f \geq 250$ Hz. Ainsi, il n'est pas indispensable d'avoir au préalable participé au test **TAM** hybride pour réaliser ce test comparatif, et d'autres sujets peuvent être sollicités pour l'expérience. Le but est tout de même de faire passer le test à une quinzaine de sujets, dont les 8 qui ont été sollicités pour la mesure **TAM** hybride.



(a)



(b)

FIGURE 32 – Mesures **TAM** hybride de l'atténuation active du casque A sur le sujet 7 : (a) 5 mesures sur 5 sessions différentes ; (b) Moyenne et écart-type

3.5 Conclusion

Les premiers résultats du test comparatif présentés dans la section précédente (3.4) sont partagés entre **MIRE** et **TAM** en fonction des bruits et des sujets⁴⁵, et ne permettent aucune conclusion. Il semblerait qu'aucune des 2 méthodes ne mesurent parfaitement l'atténuation active perçue, et que celle-ci se situe peut être entre les deux courbes sur la figure (31). Il resterait donc à comprendre pourquoi l'une des mesure surestime l'atténuation tandis que l'autre la sous-estime.

45. Pour les trois premier sujets, le signal test a obtenu 8 fois sur 9 une réponse **TAM**.

Pour aller plus loin

Nous avons présenté dans ce rapport une nouvelle méthode, **TAM**, qui permet une estimation de l'atténuation active de casques audio ou de protection auditives. Cette nouvelle méthode présente l'originalité de reposer sur des mécanismes perceptifs différents de ceux qui étaient mis en jeu par les méthodes existantes comme **REAT** ou **LBM**. En effet, cette nouvelle méthode consiste à égaliser 2 couleurs sonores avec et sans contrôle actif, en ajustant le gain de chaque harmonique d'un signal complexe.

Nous avons ainsi détaillé le long de ce rapport les différentes étapes, qui ont permis à partir de l'idée d'initiale, de construire un test qui soit aujourd'hui applicable et puisse être utilisé pour une mesure de l'atténuation active, même pour des sujets peu expérimentés.

Cependant, nous avons vu qu'il existait des différences entre les résultats obtenus avec **MIRE** et ceux obtenus par la méthode **TAM**. En effet, l'atténuation active est plus faible de quelques dB⁴⁶ pour les fréquences $f < 300$ Hz. Nous avons ainsi proposé un test pour déterminer quelle méthode au final se rapproche le plus de l'atténuation perçue par l'utilisateur.

Ce dernier pourra conduire à une des 3 conclusions suivantes :

1. La méthode **MIRE** surestime l'atténuation active perçue et la méthode **TAM** correspond bien à l'atténuation perçue.
2. La méthode **TAM** sous-estime au contraire l'atténuation active, et la méthode **MIRE** est finalement une bonne approximation de l'atténuation perçue.
3. Aucune des deux méthodes ne donne des résultats correspondant parfaitement à l'atténuation perçue.

Chacune des conclusions donnera lieu à de nouvelles questions, qui mériteront une étude appropriée. La première nécessitera une étude pour comprendre les mécanismes perceptifs qui font que **MIRE** surestime cette atténuation en basses fréquences. Peut être que les paramètres de conduction osseuse estimés dans[4] et présentés dans la norme **ANSI**[6] sont sous-estimés en basses fréquences. Si au contraire, le test conduit à la conclusion 2, il faudra comprendre d'où vient le biais de la mesure **TAM** dans sa forme finale. L'ajustement des 2 premières composantes par la méthode **LBM** sous-estime peut être l'atténuation, le bruit électrique influant beaucoup sur l'intensité perçue de la sinusoïde pure. Le test suivant pourra alors être envisagé : faire deux mesures **TAM** consécutives pour chaque sujet, le premier en égalisant les harmoniques en **ANC** off jusqu'à arriver à la même perception du timbre en **ANC** on, qui est fixe ; le deuxième dans l'autre sens : fixer le timbre en **ANC** off et égaliser les harmoniques du timbre en **ANC** on jusqu'à arriver à la même perception des deux signaux. Ceci permettra d'identifier d'éventuelles différences sur les résultats en fonction du "sens" de l'ajustement⁴⁷. Enfin, la dernière conclusion conduira un peu aux questions soulevées pour chacune des conclusions 1 ou 2.

Notons aussi qu'un résumé a été soumis à **JASA** dans le cadre d'une conférence sur les mesures de protections auditives, proposant cette nouvelle méthode.

46. De 3 dB environ pour le casque B

47. E. Zwicker montre par exemple dans[16], p 208 qu'égaliser l'intensité d'un son pur à 1 kHz à un bruit blanc d'intensité fixe ne donne pas les mêmes résultats qu'égaliser le bruit au son pur fixe.

Références

- [1] E.H.Berger. Preferred methods for measuring hearing protector attenuation. *Environmental Noise control Congress*, 2005.
- [2] S. Stenfelt and R.L. Goode. Transmission properties of bone conducted sound : Measurements in cadaver heads. *Journal of Acoustical Society of America*, 118 (4) :2373–2391, June 2005.
- [3] M. Eeg-Olofsson. *Transmission of bone-conducted sound in the human skull based on vibration and perceptual measures*. University of Gothenburg, 2012.
- [4] S. Stenfelt. Acoustic and physiologic aspects of bone conduction hearing. *Linköping University Electronic Press*, 2011.
- [5] S. Stenfelt. Estimation of bone conduction skull transmission by hearing thresholds and ear-canal sound pressure. *Linköping University Electronic Press*, 2013.
- [6] ANSI/ASA S12.42-2010. Methods for the measurement of insertion loss of hearing protection devices in continuous or impulsive noise using microphone-in-real-ear or acoustic test fixture procedures. 2010.
- [7] ANSI S1.11-2004. Specification for octave-band and fractional-octave-band analog and digital filters. 2004.
- [8] United States Environmental Protection Agency. Method for calculating and using the nrr. *Workshop on Hearing Protector Devices*, 2003.
- [9] Bose Corporation D. Gauger. Testing and rating of anr headsets. *Workshop on Hearing Protector Devices , Washington DC*, pages 163–179, March 2003.
- [10] United States Environmental Protection Agency. *Workshop on Hearing Protector Devices*. March 27-28, 2003.
- [11] ANSI/ASA S12.6-2008. Methods for measuring the real-ear attenuation of hearing protectors. 2008.
- [12] J.H. Berger and J.E. Kerivan. Influence of physiological noise and the occlusion effect on the measurement of real-ear attenuation at threshold. *Journal of Acoustical Society of America*, 74 (1) :81–94, July 1983.
- [13] A. Brammer J. Zera and G.J. Pan. Comparison between subjective and objective measures of active hearing protector and communication headset attenuation. *Journal of Acoustical Society of America*, 101 :3486–3496, June 1997.
- [14] P. Darlington and P. Guiu. Active noise reduction in personal audio delivery systems ; assessment using loudness balance methods. *Audio Engineering Society, Convention Paper 8049*, May 2010.
- [15] M.M. Taylor and C.D. Creelman. Pest : Efficient estimates on probability functions. *Defense Research Medical Laboratories Research Paper*, 41 (4) :782–787, 1967.
- [16] E. Zwicker and H. Fastl. *Psycho-acoustics, Second Updated Edition*. Springer, 1999.
- [17] D.A. Harris J.L. Johnson J.R. Franks, W.J. Murphy and P.B. Shaw. Alternative field methods for measuring hearing protector performance. *AIHA Journal*, 64 :501–509, July/August 2003.
- [18] S. Somers R. Neitzel and N. Seixas. Variability of real-world hearing protector attenuation measurements. *Oxford University Press*, pages 679–691, June 2006.
- [19] C. Perala. *Active Noise Reduction Headphone Measurement : Comparison of Physical and Psychophysical Protocols and Effects of Microphone Placement*. PhD thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2006.

-
- [20] J.G. Casali and J.A. Landcaster. Reat and mire insertion loss comparison for eight headphones of various passive and anr designs, inclusive of nrr and spectral attenuation. 2004.
- [21] W.H. Hartmann. *Signals, Sound, and Sensation*. American Institute of Physics, 1997.
- [22] B.C. Moore. *Hearing, Second Edition*. Academic Press, Handbook of Perception and Cognition, 1995.
- [23] S.T. Brichfield and R. Gangishetty. Acoustic localization by interaural level difference. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, March 2005.
- [24] E. Friot. *Une introduction au contrôle acoustique actif*. CNRS - Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, 2005.
- [25] T.J.F. Buunen. On the perception of phase differences in acoustic signals. *PhD Thesis*, 46 :409, March 1976.
- [26] R. Plomp and H.J.M. Steeneken. Effect of phase on the timbre of complex tones. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1976.

Table des figures

1	Comparaison entre mesure de perte après insertion et mesure de réduction de bruit	5
2	A set of two subfigures.	7
3	Microphone MIRE MEO 5P215	7
4	Différence entre une mesure MIRE et une mesure REAT	8
5	A set of two subfigures.	9
6	Setup de la mesure MTM (Masked Threshold Method)	12
7	Interface graphique de la méthode par ajustement du timbre	14
8	Interface graphique de la méthode hybride	15
9	Niveaux acoustiques par tiers d'octave mesurés au point de référence en réponse à un bruit rose	19
10	Caractérisation du champ acoustique de la salle : diffusivité	20
11	A set of two subfigures.	20
12	Atténuation passive du casque B pour 3 mesures consécutives	21
13	Atténuation active du casque B pour 3 mesures consécutives	22
14	A set of two subfigures.	22
15	Atténuation passive du casque A pour avant et après mise en place de la mousse sur l'oreille artificielle (figure (14))	23
16	Microphone <i>ER-7C</i>	23
17	Atténuation passive du casque A, microphone bruité	24
18	Bruit du deuxième microphone utilisé pour les mesures MIRE	25
19	A set of two subfigures.	26
20	A set of two subfigures.	27
21	Mesures MIRE de l'atténuation totale des casques A, B et C	28
22	Mesures TAM de l'atténuation active du casque	30
23	A set of three subfigures.	33
24	Atténuation active du casque A pour les méthodes MIRE , ATF et TAM	34
25	A set of four subfigures.	35
26	Mesures TAM et MIRE de l'atténuation active du casque A pour un sujet	36
27	Interface graphique de la méthode comparative	36
28	A set of two subfigures.	39
29	Comparaison de l'atténuation active du casque A pour les méthodes TAM , LBM et MIRE	40
30	A set of two subfigures.	41
31	Atténuation active du casque B pour les méthodes TAM hybride et MIRE	42
32	A set of two subfigures.	43
33	Banc de filtres par tiers d'octave	51
34	Atténuation passive du casque B, mesurée avec les microphones <i>43AG</i> et <i>ER-7C</i>	52

35	Bruit du microphone <i>ER-7C</i> et dsp du casque B en passif	53
36	Bruit du microphone <i>ER-7C</i> avec le tube bouché, et non bouché	54
37	Atténuation maximale mesurable avec le microphone <i>ER-7C</i>	54

Annexes

Annexe A : Mesure de l'atténuation totale par ajustement du timbre

La première solution pensée pour mesurer l'atténuation totale ou passive du casque par ajustement du timbre était simplement de retirer le casque et d'ajuster les différentes composantes du signal sans le casque, jusqu'à obtenir la même perception qu'avec le casque porté. Le problème de cette solution était d'une part le biais du aux mises en place successives du casque, puisque le sujet ne remet pas exactement le casque comme il l'a mis précédemment ce qui affecte l'atténuation passive comme l'atténuation active ; et d'autre part le fait qu'il soit difficile de se garder en mémoire parfaitement la coloration du timbre, étant perturbé par l'action de retirer le casque.

La deuxième solution était donc d'utiliser le système de restitution du casque, pour jouer le signal dont les composantes sont à ajuster. Plus précisément, le contrôle actif du casque est activé ou désactivé avant le début de la mesure suivant que l'on veuille mesurer l'atténuation totale ou l'atténuation passive du casque. Lorsque le sujet clique sur *Signal Test*, le signal est joué sur le système 5.1 comme dans la méthode **TAM** présentée dans la section (1.2.1). Par contre, lorsque le sujet clique sur *Signal Modifié*, le signal avec les gains des sliders n'est plus joué sur le même système son, mais sur les hauts-parleurs du casque audio.

La méthode nécessite donc une étape de calibration détaillée ci-dessous. Il faut tout d'abord connaître la réponse en fréquence du casque audio⁴⁸. La calibration s'effectue avec une sinusoïde pure à 1 kHz. L'oreille *GRAS* est placée au point de référence et le signal est d'abord envoyé sur le système 5.1. Le microphone de l'oreille **GRAS** récupère un niveau rms I_1 . Puis le casque est posé sur l'oreille et le signal est ensuite envoyé sur les hauts-parleurs du casque pour obtenir un niveau rms I_2 . Une première correction à apporter sur le signal modifié est de le multiplier par $\frac{I_2}{I_1}$. Une deuxième correction composante par composante doit ensuite être appliquée en fonction de la réponse en fréquence du haut parleur⁴⁹

Cette méthode a été testée sur 2 sujet avec le casque E, qui ont trouvé l'exercice beaucoup plus difficile que la version pour la mesure de l'atténuation active. Il a en effet semblé difficile pour les deux sujets d'égaliser 2 couleurs sonores provenant de 2 sources différentes, et les résultats n'étaient pas vraiment reproductibles d'une mesure à l'autre.

48. Specifications ou mesures.

49. Le système 5.1 est considéré comme ayant une réponse plate.

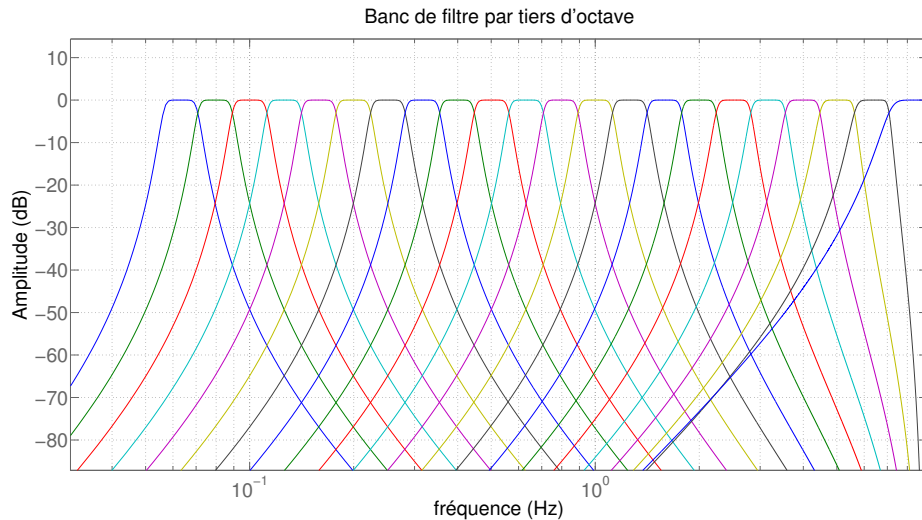


FIGURE 33 – Banc de filtres par tiers d’octave

Annexe B : Détails techniques sur la mise en place du test comparatif

Le test comparatif applique deux courbes d’atténuations différentes à des bruits réels pour ensuite les comparer. Nous spécifions dans cette annexe la technique employée pour filtrer nos bruits réels selon des courbes d’atténuation prédéfinies.

Pour cela les bruits sont d’abord sous échantillonnés à 18 kHz⁵⁰ Un passe-haut à $f = 60$ Hz ainsi qu’un passe-bas à $f = 8250$ Hz sont ensuite appliqués au bruit. Un banc de 22 filtres de classe 0 par tiers d’octave[7] visible sur la figure (33) est ensuite créé et des matrices B de taille $22 \times \text{size}(\text{bruit})$ `nom_bruit.mat` sont enregistrées pour tous les bruits, chaque ligne de la matrice correspondant au bruit filtré par un des filtres de la figure (33).

À partir des courbes d’atténuation **MIRE**, 22 coefficients sont récupérés dans un vecteur m en prenant les valeurs de la courbe aux indices dont les fréquences sont les plus proches de $f = 10^{(p/10)}$ Hz, $p \in \llbracket 18, 39 \rrbracket$. Un vecteur t est également formé de 22 coefficients récupérés de l’atténuation estimée par la méthode **TAM** en interpolant linéairement aux tiers d’octave entre les fréquences $62.5 * 2^k$ Hz, $k \in \llbracket 0, 7 \rrbracket$.

Les signaux numériques y^0 , y^1 et y^2 correspondant aux boutons A, B et C⁵¹ dans la figure (27) sont alors donnés par :

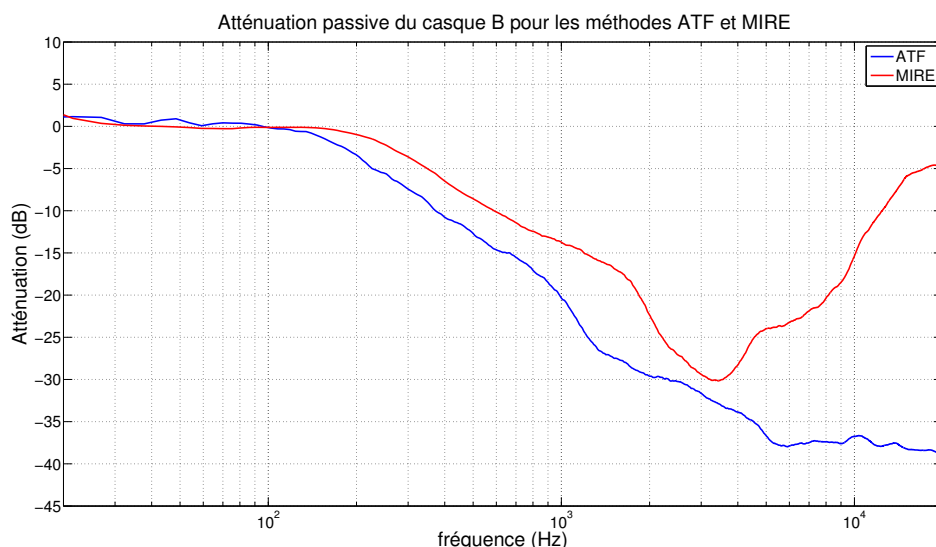
$$y_i^0 = \sum_{j=0}^{22} B_{i,j}^T$$

$$y_i^1 = \sum_{j=0}^{22} (B^T t)_{i,j}$$

$$y_i^2 = \sum_{j=0}^{22} (B^T m)_{i,j}$$

50. Nous nous intéressons qu’à des fréquences $f \leq 8$ kHz.

51. Les atténuations **TAM** et **MIRE** sont utilisées aléatoirement sur B ou C.

FIGURE 34 – Atténuation passive du casque B, mesurée avec les microphones *43AG* et *ER-7C*

Annexe C : Problème du microphone *ER-7C* séries *B* pour les mesures **MIRE**

Le microphone *ER-7C* visible sur la figure (16), conçu pour faire des mesures avec des prothèses auditives n'était pas adapté pour les mesures d'atténuation des casques audio testés.

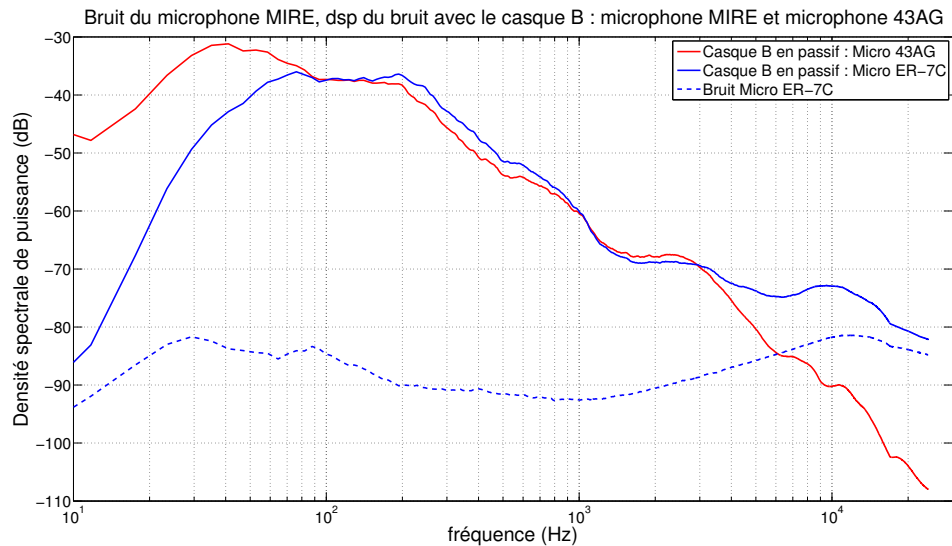
La figure (34) montre l'atténuation passive du casque B mesuré avec le microphone *43AG* de l'oreille *GRAS*, ainsi qu'avec le microphone *ER-7C* sur le sujet 7. On observe qu'à partir de $f \simeq 3$ kHz, l'atténuation mesuré avec le microphone **MIRE** diminue fortement jusqu'à atteindre 5 dB d'atténuation à 20 kHz contrairement à l'atténuation mesurée avec le microphone **ATF**. Cette tendance s'est retrouvée sur tous les casques mesurés entre 2 kHz et 4 kHz.

La première hypothèse pour expliquer cette différence entre les deux mesures, était que le microphone *ER-7C* soit probablement trop bruité en hautes fréquences. Mais après quelques tests en augmentant le niveau du bruit joué, puis en jouant un bruit filtré hautes fréquences ($f \geq 500$ Hz), nous nous sommes aperçus que cela ne modifiait pas la fréquence à partir de laquelle l'atténuation chute. Nous avons donc fait une mesure de bruit de ce microphone dans une chambre sourde. La figure (35) représente la densité spectrale du bruit du microphone *ER-7C*, ainsi que les densité spectrale de puissance mesurés par les 2 microphones, en plaçant le tube du microphone *ER-7C* dans le conduit de l'oreille *GRAS*, puis en posant le casque B en passif autour de l'oreille. On peut voir que les réponses des deux microphones sont très proches entre 100 Hz et 3 kHz⁵², puis la réponse du microphone *43AG* continue de chuter contrairement au microphone *ER-7C*. Cependant, on peut voir sur la figure que le rapport signal sur bruit du microphone est supérieur à 10 dB de 3 kHz à 10 kHz, donc que le problème n'est pas causé par le bruit du microphone.

Sur la figure (16), on voit que lors des mesures, le microphone *ER-7C* se situe à l'extérieur de la cavité formée entre l'oreille et le casque. Il y a donc deux chemins acoustiques qui mènent au microphone. Le chemin principale est celui du tube, placé dans le canal auditif. Mais le microphone capte aussi le son par les fuites entre le tube et la partie en plastique, ainsi que les vibrations de celle-ci. Il est donc important pour pouvoir mesurer l'atténuation des casques que le rapport signal chemin primaire sur chemin secondaire soit très bon. La figure (36) montre la réponse en fréquence du microphone *ER-7C*⁵³ avec le tube bouché ou non bouché, donc les

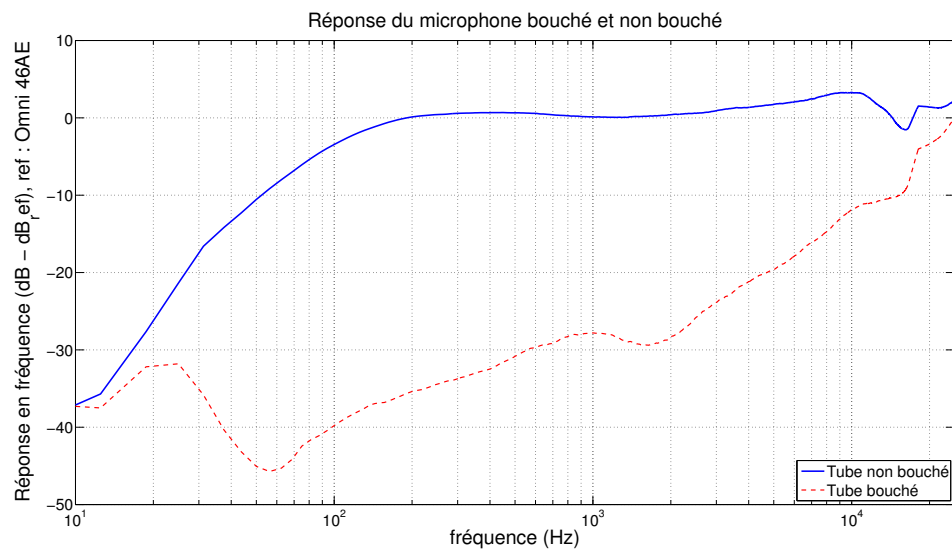
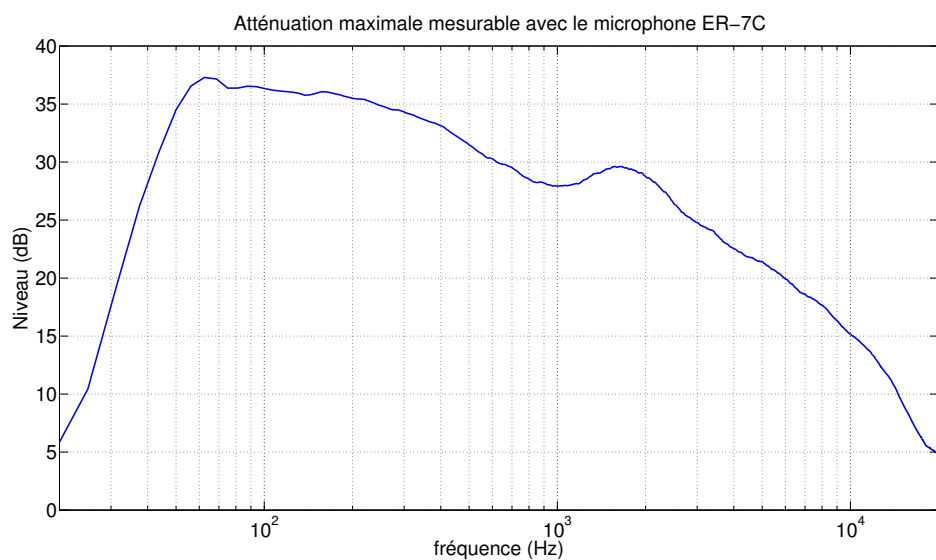
52. Différences dues à des spécifications des deux microphones différentes

53. Avec un microphone omni *46AE* comme microphone de référence

FIGURE 35 – Bruit du microphone *ER-7C* et dsp du casque B en passif

réponses en fréquences du chemin primaire plus le chemin secondaire, ainsi du chemin secondaire uniquement. On peut voir que réponse du chemin secondaire augmente significativement avec la fréquence. Or, lors de la mise du casque, c'est seulement le niveau acoustique du chemin primaire qui est affecté, et on ne peut donc pas mesurer une atténuation qui soit supérieure à la différence des deux courbes.

Finalement, la figure (37) représente l'atténuation maximale qui soit mesurable avec le microphone *ER-7C*, en fonction de la fréquence. On voit notamment que l'atténuation maximale mesurable à 3 kHz est de 25 dB, et continue de diminuer pour des fréquences plus élevées. Or c'est justement vers 3 kHz sur la figure (34), alors que l'atténuation du casque dépasse les 25 dB, que la tendance change.

FIGURE 36 – Bruit du microphone *ER-7C* avec le tube bouché, et non bouchéFIGURE 37 – Atténuation maximale mesurable avec le microphone *ER-7C*