

# É

Bruit et vibrations

## Études et recherches

RAPPORT R-662



### Étude de la transmission sonore à travers les protecteurs auditifs et application d'une méthode pour évaluer leur efficacité en milieu de travail Partie 1 – Étude terrain (version révisée)

*Hugues Néllisse  
Marc-André Gaudreau  
Jérôme Boutin  
Frédéric Laville  
Jérémie Voix*



Solidement implanté au Québec depuis 1980, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique reconnu internationalement pour la qualité de ses travaux.

## NOS RECHERCHES

### *travaillent pour vous !*

#### Mission

Contribuer, par la recherche, à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles ainsi qu'à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes.

Offrir les services de laboratoires et l'expertise nécessaires à l'action du réseau public de prévention en santé et en sécurité du travail.

Assurer la diffusion des connaissances, jouer un rôle de référence scientifique et d'expert.

Doté d'un conseil d'administration paritaire où siègent en nombre égal des représentants des employeurs et des travailleurs, l'IRSST est financé par la Commission de la santé et de la sécurité du travail.

#### Pour en savoir plus

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez une information complète et à jour. De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement. [www.irsst.qc.ca](http://www.irsst.qc.ca)

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine Prévention au travail, publié conjointement par l'Institut et la CSST. Abonnement : 1-877-221-7046

#### Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales  
2010  
ISBN : 978-2-89631-504-8 (version imprimée)  
ISBN : 978-2-89631-505-5 (PDF)  
ISSN : 0820-8395

IRSST - Direction des communications  
505, boul. De Maisonneuve Ouest  
Montréal (Québec)  
H3A 3C2  
Téléphone : 514 288-1551  
Télécopieur : 514 288-7636  
[publications@irsst.qc.ca](mailto:publications@irsst.qc.ca)  
[www.irsst.qc.ca](http://www.irsst.qc.ca)  
© Institut de recherche Robert-Sauvé  
en santé et en sécurité du travail,  
septembre 2010



Bruit et vibrations

# Études et recherches

RAPPORT R-662

## Étude de la transmission sonore à travers les protecteurs auditifs et application d'une méthode pour évaluer leur efficacité en milieu de travail Partie 1 – Étude terrain (version révisée)

### Avis de non-responsabilité

L'IRSST ne donne aucune garantie relative à l'exactitude, la fiabilité ou le caractère exhaustif de l'information contenue dans ce document. En aucun cas l'IRSST ne saurait être tenu responsable pour tout dommage corporel, moral ou matériel résultant de l'utilisation de cette information.

Notez que les contenus des documents sont protégés par les législations canadiennes applicables en matière de propriété intellectuelle.

*Hugues Nélisse<sup>1</sup>, Marc-André Gaudreau<sup>2</sup>, Jérôme Boutin<sup>3</sup>,  
Frédéric Laville<sup>2</sup> et Jérémie Voix<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Service de la recherche, IRSST*

*<sup>2</sup>École de technologie supérieure*

*<sup>3</sup>Service soutien à la recherche et à l'expertise, IRSST*

Cliquez recherche  
[www.irsst.qc.ca](http://www.irsst.qc.ca)



Cette publication est disponible  
en version PDF  
sur le site Web de l'IRSST.

**CONFORMÉMENT AUX POLITIQUES DE L'IRSST**

Les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document  
ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

## SOMMAIRE

Le projet « Étude de la transmission sonore à travers les protecteurs auditifs et application d'une méthode pour évaluer leur efficacité effective en milieu de travail » comptait principalement deux parties : i) une étude terrain portant sur la mesure de l'efficacité effective des protecteurs auditifs en milieu de travail; ii) une étude exploratoire visant à examiner le potentiel de la modélisation par éléments finis à traiter le problème de la transmission sonore à travers les protecteurs auditifs. Compte tenu de l'ampleur des travaux effectués et de la quantité d'information à présenter, un rapport formé de deux documents distincts est proposé. Ce document constitue la première partie du rapport final de ce projet.

La réduction du bruit à la source est la solution à privilégier pour combattre les effets du bruit en milieu de travail. Malgré tout, de par sa simplicité à mettre en œuvre et par son apparent faible coût, l'utilisation de protecteurs auditifs demeure très populaire. Il devient donc important de bien connaître l'efficacité réelle des protecteurs utilisés en milieu de travail afin de faire des choix judicieux et éclairés. Cependant, de nombreuses études au cours des vingt dernières années ont clairement montré que la protection affichée par les manufacturiers, obtenue par des essais bien contrôlés en laboratoire, surévalue significativement celle mesurée en milieu de travail. Bien que de nombreuses hypothèses aient été avancées pour expliquer de tels écarts, peu d'études ont porté sur la mesure de la protection en milieu de travail en continu sur de longues périodes de temps.

Ce rapport décrit les développements d'une méthode de mesure de la performance des protecteurs auditifs durant un quart de travail ainsi que les résultats de son application en milieu de travail. Un système léger et robuste a été développé et utilisé sur plusieurs travailleurs et dans plusieurs environnements de travail. La méthode est basée sur la mesure microphonique en continu des signaux temporels sous le protecteur et à l'extérieur du protecteur. Ces signaux sont ensuite analysés à l'aide de programmes de calculs développés dans l'environnement MATLAB<sup>TM</sup> pour obtenir différents indicateurs utiles. Des quantités tels les niveaux d'exposition ambiants, les niveaux protégés, les valeurs d'affaiblissements des protecteurs peuvent être obtenus en fonction du temps et de la fréquence. Deux indices d'atténuation, un dit « terrain » et un dit « laboratoire », sont développés de façon similaire à l'indice *SNR* recommandé dans la norme ISO 4869-2 :1994 et sont comparés. Des résultats obtenus pour des serre-tête et bouchons moulés sur 24 travailleurs dans 8 entreprises différentes sont présentés et discutés. Plusieurs observations sont faites sur les niveaux de protection obtenus pour les protecteurs et sujets étudiés : i) conformément à ce qu'on retrouve dans la littérature, les valeurs de protection sont inférieures à celles affichées par les manufacturiers (mesurées en laboratoire) ; ii) pour un travailleur donné, la protection varie de façon significative en fonction du temps lors d'un quart de travail ; iii) la protection peut varier beaucoup d'un travailleur à l'autre mais aussi d'une oreille à une autre pour un travailleur donné. iv) l'indice d'atténuation développé montre une forte dépendance au contenu fréquentiel du bruit ambiant mettant bien en relief la faiblesse de protecteurs en basses fréquences et l'importance de bien connaître le bruit ambiant pour faire un choix judicieux de protecteurs auditifs. Le projet a permis de montrer le potentiel de la méthode développée pour faire la mesure de la performance des protecteurs auditifs en milieu de travail. Des pistes pour améliorer celle-ci, la rendre plus complète et accessible à un plus large public sont finalement présentées.



## **REMERCIEMENTS**

Les auteurs désirent remercier toutes les personnes qui ont été impliquées dans le projet. Plus particulièrement nous désirons remercier les entreprises et tous les travailleurs qui ont participé de façon volontaire aux mesures en milieu de travail.





## TABLE DES MATIÈRES

1.	AVANT-PROPOS .....	1
2.	INTRODUCTION .....	3
3.	ÉTAT DE L'ART SUR LES MESURES TERRAIN DE LA PROTECTION AUDITIVE..	9
3.1	Mesures terrain de la performance des protecteurs.....	9
3.1.1	Méthodes de mesures subjectives .....	9
3.1.2	Méthodes de mesures objectives.....	10
3.2	Facteurs influant sur la performance.....	12
4.	OBJECTIFS DE L'ÉTUDE TERRAIN.....	15
5.	DÉVELOPPEMENT DU SYSTÈME DE MESURES.....	17
5.1	Principe de la mesure .....	17
5.2	Description des microphones.....	17
5.3	Description du système d'enregistrement.....	18
5.4	Instrumentation des bouchons.....	19
5.5	Instrumentation des coquilles .....	20
5.6	Système de mesures complet .....	21
6.	MESURES EN MILIEU DE TRAVAIL.....	23
6.1	Sélection des entreprises et des candidats.....	23
6.2	Déroulement des mesures .....	24
7.	TRAITEMENT DES SIGNAUX MESURÉS .....	27
7.1	Routines de calculs .....	27
7.2	Traitement des signaux temporels .....	28
7.3	Indicateurs utilisés .....	28
7.4	Facteurs de correction de tube et facteurs de compensations .....	32
7.5	Valeurs d'affaiblissement des manufacturiers (laboratoire).....	35
8.	ANALYSE DES RÉSULTATS.....	37
8.1	Résultats des questionnaires .....	37
8.2	Niveaux d'exposition et balance spectrale.....	37
8.3	Indices d'affaiblissement .....	40
8.3.1	Usines #6 et #7- Serre-tête Peltor H7A.....	40
8.3.2	Niveaux d'exposition moins élevés – Usines #2 et #3 .....	44
8.3.3	Usines #4 et #5 – Bouchons moulés .....	47
8.3.4	Usine #8 – Niveaux de bruit très élevés.....	49
8.4	Valeurs d'affaiblissement en fonction de la fréquence.....	53
8.4.1	Travailleurs #13 et #15 – usine #6.....	54
8.4.2	Travailleurs #16 et #17 – usine #7 .....	56
8.4.3	Travailleurs avec bouchons moulés .....	59
8.4.4	Travailleurs de l'usine #8 – niveaux ambiants élevés .....	61
8.5	Portrait d'ensemble pour tous les travailleurs.....	64

9.	CONCLUSION.....	67
9.1	Constats.....	67
9.2	Perspectives.....	68
10.	BIBLIOGRAPHIE.....	71
ANNEXE A.	SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES DES ÉQUIPEMENTS UTILISÉS .....	74
ANNEXE B.	LISTE DES SUJETS AYANT PARTICIPÉ AUX MESURES TERRAIN.....	77
ANNEXE C.	QUESTIONNAIRE PROPOSÉ AU TRAVAILLEUR À LA FIN DES MESURES .....	78
ANNEXE D.	PROCÉDURES DE CALCUL DES FONCTIONS DE DENSITÉ D'AUTOSPECTRE ET DE SPECTRE CROISÉE .....	80
ANNEXE E.	LISTE DES INDICATEURS UTILISÉS .....	82
ANNEXE F.	FONCTIONS DE PONDÉRATION FRÉQUENTIELLE .....	84
ANNEXE G.	DONNÉES D'AFFAIBLISSEMENTS MOYENS FOURNIES PAR LES MANUFACTURIERS.....	85
ANNEXE H.	HISTOGRAMMES DES NIVEAUX NON PROTÉGÉS ET DES BALANCES SPECTRALES.....	86

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Exemple de protecteurs auditifs (haut : coquilles, bas : bouchons).....	3
Figure 2 : Diagramme de problématiques associées à la protection auditive individuelle.....	4
Figure 3 : Schéma du montage pour les mesures microphoniques des niveaux protégés et non protégés (bouchon moulé (image de gauche), coquille (image de droite).....	17
Figure 4 : Doublet microphonique tel qu'utilisé pour la prise de mesures.....	18
Figure 5 : Photo de face de l'enregistreur Edirol R-09 utilisé pour les mesures terrain.....	19
Figure 6 : Aperçu de l'ensemble « doublet microphonique / embout / bouchon moulé».....	20
Figure 7 : Aperçu d'un bouchon moulé, instrumenté du doublet microphonique, tel qu'inséré dans l'oreille d'un sujet.....	20
Figure 8 : Aperçu d'une coquille instrumentée du doublet microphonique.....	21
Figure 9 : Aperçu du système de mesures complet connecté à la coquille droite d'un serre-tête (l'image de droite montre le système complet, tel que pouvant être installé à la ceinture d'un travailleur).....	22
Figure 10 : Exemples de travailleurs portant le système de mesures pendant un quart de travail.....	22
Figure 11 : Illustration schématique de la procédure de traitement des données temporelles.....	27
Figure 12 : Exemple de spectres avec différentes balances spectrales.....	30
Figure 13 : Exemples de niveaux extérieurs et balance spectrale pour 3 travailleurs dans 3 usines différentes : (a) Usine #2; (b) Usine #6; (c) Usine #7.....	39
Figure 14 : Niveaux non protégés en fonction du temps pour le travailleur #8 (usine #4).....	40
Figure 15 : Indice d'affaiblissement en fonction du temps : travailleur #13 (usine #6).....	42
Figure 16 : Indice d'affaiblissement en fonction du temps : travailleur #14 (usine #6).....	42
Figure 17 : Indice d'affaiblissement en fonction du temps : travailleur #15 (usine #6).....	43
Figure 18 : Portion allant de 10:00 à 12:00 pour le travailleur #15 (usine #6). Des droites illustrant les tendances ont été ajoutées.....	43
Figure 19 : Indice d'affaiblissement en fonction du temps : travailleur #17 (usine #7).....	44
Figure 20 : Indice d'affaiblissement en fonction du temps : travailleur #5 (usine #3).....	45
Figure 21 : Indice d'affaiblissement en fonction du temps : travailleur #6 (usine #3).....	46
Figure 22 : Indice d'affaiblissement en fonction du temps : travailleur #4 (usine #2).....	47
Figure 23 : Indice d'affaiblissement en fonction du temps : travailleur #8 (usine #4).....	48
Figure 24 : Indice d'affaiblissement en fonction du temps : travailleur #12 (usine #5).....	49
Figure 25 : Indice d'affaiblissement en fonction du temps : travailleur #19 (usine #8). La ligne verticale indique quand il a été demandé au travailleur d'enlever ses lunettes de protection.....	50
Figure 26 : Indice d'affaiblissement en fonction du temps : travailleur #20 (usine #8). La ligne verticale indique quand il a été demandé au travailleur d'enlever ses lunettes de protection.....	51
Figure 27 : Indice d'affaiblissement en fonction du temps : travailleur #23 avec serre-tête.....	52
Figure 28 : Indice d'affaiblissement en fonction du temps : travailleur #23 avec casque I.....	52
Figure 29 : Indice d'affaiblissement en fonction du temps : travailleur #23 avec casque II.....	53
Figure 30 : Affaiblissements en fonction de la fréquence : travailleur #13 (usine #6).....	55
Figure 31 : Affaiblissements en fonction de la fréquence : travailleur #15 (usine #6).....	56
Figure 32 : Affaiblissements en fonction de la fréquence : travailleur #17 (usine #7).....	57

Figure 33 : Affaiblissements en fonction de la fréquence : travailleur #16 (usine #7).....	58
Figure 34 : Indice d'affaiblissement en fonction du temps : travailleur #16 (usine #7).....	58
Figure 35 : Affaiblissements en fonction de la fréquence : travailleur #4 (usine #2).....	59
Figure 36 : Affaiblissements en fonction de la fréquence : travailleur #8 (usine #4).....	60
Figure 37 : Affaiblissements en fonction de la fréquence : travailleur #12 (usine #5).....	61
Figure 38 : Affaiblissements en fonction de la fréquence : travailleur #19 (usine #8).....	62
Figure 39 : Affaiblissements en fonction de la fréquence : travailleur #20 (usine #8).....	62
Figure 40 : Affaiblissements en fonction de la fréquence : travailleur #23 casque I (usine #8).....	63
Figure 41 : Affaiblissements en fonction de la fréquence : travailleur #23 casque II (usine #8).....	64
Figure H-1 : Niveaux non protégés et balances spectrales pour l'usine 1 ((a) : travailleur #1; (b) : travailleur #2).....	86
Figure H-2: Niveaux non protégés et balances spectrales pour l'usine 2 ((a) : travailleur #3; (b) : travailleur #4).....	87
Figure H-3 : Niveaux non protégés et balances spectrales pour l'usine 3 ((a) : travailleur #5; (b) : travailleur #6).....	88
Figure H-4 : Niveaux non protégés et balances spectrales pour l'usine 4 ((a) : travailleur #7; (b) : travailleur #8; (c) : travailleur #9).....	89
Figure H-5 : Niveaux non protégés et balances spectrales pour l'usine 5 ((a) : travailleur #10; (b) : travailleur #11; (c) : travailleur #12).....	90
Figure H-6 : Niveaux non protégés et balances spectrales pour l'usine 6 ((a) : travailleur #13; (b) : travailleur #14; (c) : travailleur #15).....	91
Figure H-7 : Niveaux non protégés et balances spectrales pour l'usine 7 ((a) : travailleur #16; (b) : travailleur #17; (c) : travailleur #18).....	92
Figure H-8 : Niveaux non protégés et balances spectrales pour l'usine 8 ((a) : travailleur #19; (b) : travailleur #20; (c) : travailleur #21).....	93
Figure H-9 : Niveaux non protégés et balances spectrales pour l'usine 8 ((a) : travailleur #22; (b) : travailleur #23; (c) : travailleur #24).....	94
Figure H-10 : Niveaux non protégés et balances spectrales pour l'usine 8 ((a) : travailleur #25; (b) : travailleur #26; (c) : travailleur #27).....	95

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Liste des entreprises visitées pour la prise de mesures en milieu de travail.....	23
Tableau 2 : Fréquences centrales des neuf bandes tiers d'octave préférentielles utilisées pour l'analyse.....	29
Tableau 3 : Facteurs de corrections de tube $F_{tube}$ (exprimés en dB) utilisés pour les doublets microphoniques dans les coquilles et les bouchons moulés.....	33
Tableau 4 : Facteurs de compensation $F_{comp}$ (exprimés en dB) utilisés pour les coquilles et les bouchons moulés.....	34
Tableau 5 : Sommaire des résultats pour l'ensemble des travailleurs.....	65
Tableau B-1 : Liste des travailleurs ayant participé aux études terrain (deux travailleurs (#21 et #23) ont participé à plus d'un essai).....	77
Tableau E-1 : Liste des indicateurs acoustiques développés.....	82
Tableau G-1 : Données d'affaiblissements, telles qu'obtenues des manufacturiers (certaines valeurs ne sont pas disponibles pour les bandes de fréquences de 3150 et 6300 Hz).....	85

## GLOSSAIRE

ABR:	<i>Auditory Brainstem Response</i>
APV:	<i>Assumed Protection Value</i>
B :	Balance spectrale
CAE :	Cellules Auditives Externes
DPOAE :	<i>Distortion Product OtoAcoustic Emission</i>
F-MIRE :	<i>Field-Microphone In Real Ear</i>
HSE :	<i>Health &amp; Safety Executive</i> (organisme britannique)
IL :	<i>Insertion Loss</i> (perte par insertion)
INRS :	Institut National de Recherche et de Sécurité (organisme français)
MIRE :	<i>Microphone In Real Ear</i>
NRR:	<i>Noise Reduction Rating</i>
NRS :	<i>Noise Reduction Statistics</i>
PN :	<i>Physiological Noise</i> (bruit physiologique)
NR :	<i>Noise Reduction</i>
REAT :	<i>Real Ear Attenuation at Threshold</i>
SNR :	<i>Single-Number Rating</i>
SST :	Santé et Sécurité du Travail
TFOE :	<i>Transfer Function of the Open Ear</i> (fonction de transfert de l'oreille ouverte)

## 1. AVANT-PROPOS

Le projet « Étude de la transmission sonore à travers les protecteurs auditifs et application d'une méthode pour évaluer leur efficacité effective en milieu de travail » comptait principalement deux parties : i) une étude terrain portant sur la mesure de l'efficacité effective des protecteurs auditifs en milieu de travail; ii) une étude exploratoire visant à examiner le potentiel de la modélisation par éléments finis à traiter le problème de la transmission sonore à travers les protecteurs auditifs. Compte tenu de l'ampleur des travaux effectués et de la quantité d'information à présenter, un rapport formé de deux documents distincts est proposé. Les deux documents sont intitulés :

- « Étude de la transmission sonore à travers les protecteurs auditifs et application d'une méthode pour évaluer leur efficacité effective en milieu de travail – Partie 1 : Étude terrain »
- « Étude de la transmission sonore à travers les protecteurs auditifs et application d'une méthode pour évaluer leur efficacité effective en milieu de travail – Partie 2 : Étude exploratoire sur la modélisation »

La partie 1, qui fait l'objet du présent document, présente les développements et résultats de l'étude portant sur la mesure de l'efficacité effective des protecteurs auditifs sur le terrain. La partie 2, présentée dans le second document, traite de l'étude exploratoire portant sur les travaux de modélisation d'un protecteur de type coquille et de type bouchon moulé. Conséquemment, le reste du présent document porte uniquement sur l'étude terrain et le lecteur est invité à consulter la partie 2 pour tout ce qui concerne le volet modélisation.





## 2. INTRODUCTION

A l'heure actuelle, on estime que plus de 400 000 des 2,5 millions de travailleurs du Québec sont exposés quotidiennement à des niveaux de bruit susceptibles d'engendrer des problèmes d'audition et au moins 100 000 d'entre eux sont aux prises avec les conséquences d'une surdité professionnelle [1]. Les solutions utilisées pour réduire cette exposition consistent à agir sur les conditions de travail en aménageant l'organisation des tâches afin de réduire le temps d'exposition et sur le niveau de bruit auquel est soumis le travailleur. Dans ce dernier cas, des actions peuvent être engagées soit sur la source de bruit, soit sur l'environnement où s'effectue la propagation sonore ou encore au niveau du travailleur par l'intermédiaire d'équipements de protection individuelle. La solution la plus efficace à privilégier est sans conteste l'action au niveau de la source. Cela nécessite idéalement de prendre en compte les contraintes de bruit au niveau de la conception des machines, ce qui n'est pas une pratique courante. Dans le cas de machines existantes, les modifications de design peuvent être coûteuses, longues à mettre en place et rendre difficile d'accès ce type de solution aux PME. L'action sur le milieu de propagation par implantation de traitements acoustiques ou d'encoffrements de machine est également efficace, mais elle peut requérir des investissements conséquents et un réaménagement du poste de travail. Selon l'article 136 du règlement sur la santé et la sécurité du travail du Québec, « l'employeur doit mettre des protecteurs auditifs à la disposition des travailleurs... » s'il se révèle impossible de mettre en œuvre ou en attendant l'application des mesures de réduction de bruit en milieu de travail. Pour les raisons invoquées précédemment, la protection individuelle simple ou double demeure la solution la plus utilisée [2,3] car elle peut être facilement et rapidement implantée et à faible coût.

Trois stratégies de protection auditive sont couramment utilisées (voir par exemple la Figure 1): le port des coquilles, des bouchons et le port simultané de ces deux types de protecteurs, soit la double protection. Les coquilles (reliées entre elles par un arceau ou fixées sur un casque de protection de la tête) sont faites d'un matériau isolant acoustique (par exemple du plastique) et viennent prendre appui sur la tête du travailleur par l'intermédiaire d'un coussin souple fait d'un matériau viscoélastique. Un dispositif de serrage permet de maintenir les coquilles sur les oreilles. Les bouchons sont constitués d'un matériau isolant inséré directement dans le canal auditif; ils peuvent être préformés en différentes tailles standards ou en utilisant un moule personnalisé ou bien formables (mousses). Il existe des protecteurs qui combinent les bouchons avec un cadre de serrage permettant de les maintenir en pression sur l'oreille.



Figure 1 : Exemple de protecteurs auditifs (haut : coquilles, bas : bouchons).

Le port des protecteurs auditifs est associé à plusieurs problématiques en SST qui sont présentées dans ce qui suit en lien avec les problématiques relatives au niveau réglementaire et aux niveaux scientifique et technique. Une vue d'ensemble de ces problématiques et de leurs liens est présentée dans le diagramme de la Figure 2. Chaque aspect de la problématique SST est présenté séparément dans une sous-section.

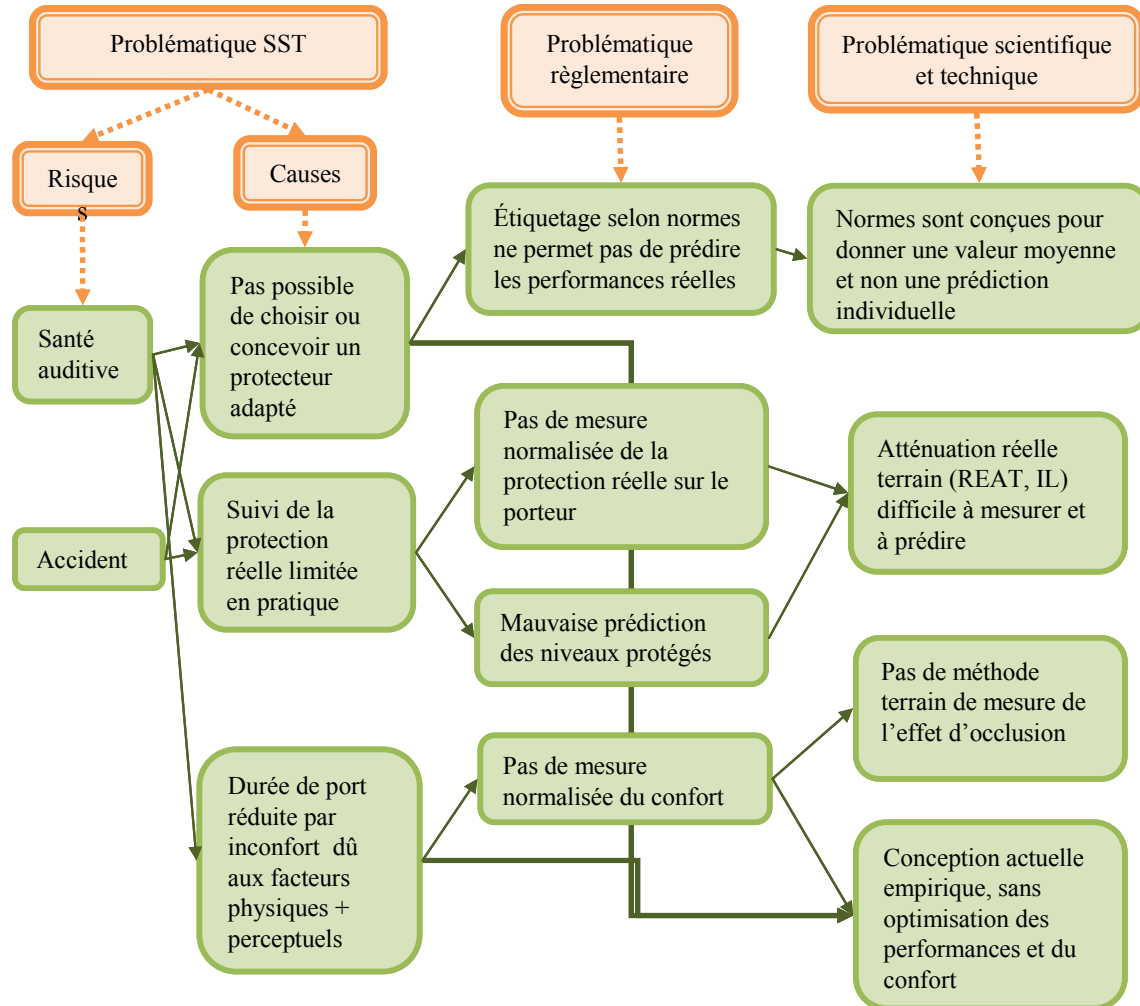


Figure 2 : Diagramme de problématiques associées à la protection auditive individuelle.

### Les protecteurs auditifs peuvent être un cofacteur de risque pour les accidents du travail

Les protecteurs sont censés assurer la protection auditive du travailleur, à condition qu'ils soient correctement portés pendant la durée de l'exposition au bruit et qu'ils soient utilisés en conformité avec l'usage recommandé<sup>1</sup>. Ces dispositifs agissent comme des filtres qui modifient le contenu fréquentiel du bruit, mais aussi du signal utile. Ils peuvent ainsi constituer un facteur aggravant dans les causes d'accidents, en raison de la difficulté à percevoir des signaux d'alarme

<sup>1</sup> Le protecteur doit être en bon état, ne pas avoir été porté au-delà de la durée indiquée par le fabricant.

ou du manque d'intelligibilité des communications verbales entre les travailleurs [4]. Des populations particulièrement à risque sont celles possédant déjà une déficience auditive (jeunes arrivant sur le marché du travail, mais déjà sourds, ou travailleurs déjà atteints de surdité professionnelle), ou les personnes travaillant dans des ambiances très bruyantes qui utilisent la double protection. Pour ces populations, le risque d'accident est accru si les protecteurs sont mal choisis ou inadaptés à l'audition du travailleur.

### **Il existe des risques pour la santé auditive en raison de la difficulté de choisir/concevoir un protecteur adapté.**

Il est important que le niveau d'atténuation offert par le protecteur soit adapté au travailleur et à son environnement sonore. Ceci, comme il a été mentionné dans la section précédente, pour diminuer les risques d'accidents mais aussi pour assurer un niveau de protection suffisant afin d'éviter un traumatisme auditif qui, à moyen terme, mène à la surdité du travailleur. Malheureusement, bien qu'il existe des outils et des normes permettant de sélectionner le type et la performance du protecteur auditif affichée par le fabricant en fonction de l'environnement sonore dans lequel évolue le travailleur, il est relativement difficile d'évaluer à l'avance si ce protecteur sera adapté. En effet, les mesures de l'atténuation effective des protecteurs auditifs en milieu de travail révèlent que celle-ci est non seulement variable, mais qu'elle est souvent bien inférieure à l'efficacité mesurée en laboratoire avec les méthodes recommandées par les normes et fournie par le fabricant. Cela débouche sur une problématique de nature réglementaire (insuffisance des normes d'évaluation des protecteurs) ainsi que scientifique et technique (les efforts de développement d'une prédiction individuelle qui n'en sont qu'à leurs débuts et la conception actuelle empirique des protecteurs restreignent la possibilité d'offrir une gamme de produits adaptés aux besoins).

### **Le suivi de la protection réelle d'un travailleur est limité en pratique par la difficulté à mettre en œuvre en milieu de travail les méthodes de laboratoire du REAT et du IL**

Les méthodes actuelles normalisées de mesure de l'atténuation des protecteurs auditifs sont basées sur une mesure au seuil auditif avec et sans le protecteur (méthode nommée *REAT* pour *Real Ear Attenuation at Threshold*). Ces mesures au seuil permettent d'obtenir une atténuation, dépendante de la fréquence, qu'on peut noter *REAT*. La mesure du *REAT* est subjective car elle requiert des évaluations subjectives des seuils d'audition par différents sujets testés. Des recherches ont alors porté sur le développement de mesures objectives de l'atténuation afin de s'affranchir des difficultés qu'amènent les évaluations subjectives. La perte par insertion *IL* (*Insertion Loss*) est une des méthodes reconnues. Elle consiste, à l'aide de mesures microphoniques dans le conduit auditif (*MIRE : Microphone In Real Ear*), à évaluer la différence des niveaux sonores tympaniques avec et sans le protecteur. Bien que cette approche comporte son lot d'incertitudes, particulièrement quant au positionnement des microphones, elle est moins sensible aux bruits physiologiques que la mesure du *REAT* et montre généralement moins de variabilité que cette dernière [5]. Les techniques du *REAT* et du *IL* demandent, pour chaque sujet testé, des mesures successives avec et sans protecteur. Elles sont donc mal adaptées à la mesure en milieu de travail, ce qui complique l'interprétation des mesures quand vient le temps de comparer des résultats « terrain » et ceux obtenus en laboratoire. Pour pallier ce problème, la méthode *MIRE* peut être utilisée pour obtenir des mesures microphoniques à l'extérieur et sous le

protecteur de façon simultanée pour obtenir l'affaiblissement acoustique *NR* (*Noise Reduction*). Cette approche est particulièrement adaptée aux mesures terrain, car elle demande moins d'infrastructures (e.g. cabine audiométrique) que la méthode des seuils, elle s'appelle alors méthode *F-MIRE* (*Field-MIRE*). Bien que cette approche semble prometteuse, bien peu d'études ont porté sur son application en milieu de travail à grande échelle. C'est un des objectifs de la présente étude.

### **La durée de port recommandée pour limiter l'exposition au bruit n'est pas toujours respectée à cause de problèmes d'inconfort**

Ces équipements de protection présentent également des inconvénients d'ordre organisationnel (problème de leur mise en place, de la facilitation, de la surveillance et de leur utilisation) et d'ordre perceptif<sup>2</sup> qui rebutent les travailleurs et font qu'ils ne sont pas portés en permanence [2,3]. Une étude de synthèse [6] montre que seulement 50% des travailleurs qui devraient porter des protecteurs les portent et qu'il y a un besoin d'améliorer le taux d'utilisation des protecteurs. Dans une autre étude [7] menée auprès de 400 travailleurs de la construction du MidWest des États-Unis, ce sont des taux d'utilisation des protecteurs allant de 18% à 49% selon le type de travail qui sont révélés. Plusieurs études [6-9] se sont intéressées à l'évaluation du confort des protecteurs, notamment aux raisons pour lesquelles le travailleur ne porte pas son protecteur en permanence. Parmi les raisons évoquées [8-10], on recense le fait qu'ils constituent une entrave importante à la communication entre les personnes, à la perception des signaux d'alarmes et des bruits importants<sup>3</sup>, le sentiment d'isolement, la sensation d'irritation, d'être sale, d'être dans de la ouate, le constat de facilité du protecteur à glisser ou à se déloger, la sensation de présence d'un corps étranger dans l'oreille, l'acouphène, le manque de protection acoustique, le changement d'environnement sonore, l'interférence avec la tâche, l'inconfort dû aux parties rigides du protecteur, la déformation trop facile du protecteur et les maux de tête. Les attributs associés à l'inconfort les plus importants, qui ressortent des différents travaux effectués sur le sujet, sont liés à une isolation acoustique trop élevée<sup>4</sup> qui peut conduire : (i) à des problèmes de communication entre individus; (ii) et à un sentiment d'isolement ou d'oppression pour celui qui les porte. En dehors des qualités acoustiques, il est recommandé d'obtenir une pression acoustique résiduelle à l'oreille de l'utilisateur (sous la protection auditive) de 70 à 80 dB(A).

### **L'évaluation de la protection réelle individuelle et le confort des protecteurs : des préoccupations internationales de tous les acteurs de la protection auditive**

En juillet 2008, s'est tenu dans les locaux de l'INRS à Paris un atelier sur la performance réelle des protecteurs auditifs. Cet événement a rassemblé 44 participants regroupant des chercheurs, des membres experts d'organismes en santé et sécurité du travail ou en normalisation et des manufacturiers de protecteurs auditifs de 17 pays. La journée a commencé par une série de conférences le matin pour présenter le contexte et les éléments nécessaires à la compréhension

---

<sup>2</sup> Les travailleurs peuvent notamment sous-estimer le risque induit par le non-port de la protection, en raison de l'absence d'effets immédiats sur la santé et leur adaptation à des environnements bruyants.

<sup>3</sup> Alarme, bruit émis par la machine permettant de repérer son état dans une tâche donnée.

<sup>4</sup> Il existe des protecteurs de type coquilles qui sont conçus pour fournir une protection modérée mais uniforme en fréquence menant à un confort et une durée de port accrues et une meilleure communication dans le bruit. Il est donc possible de jouer sur la conception du protecteur pour rendre ce dernier plus efficace pour le travailleur.

du problème de l'évaluation des niveaux d'exposition sous protecteurs. Les visions européenne et nord-américaine ont été exposées. L'atelier s'est poursuivi l'après-midi par des débats au sein de petits groupes sur les questions soulevées le matin pour se terminer par une synthèse des discussions. L'événement a permis de faire ressortir notamment un consensus sur une avenue de recherche particulière en vue d'améliorer la situation lorsque les solutions de réduction de bruit à la source et de traitement des chemins de propagation ne peuvent être réalisées, soit :

- La nécessité de disposer de méthodes de mesures universelles pour évaluer la protection réelle individuelle des différents protecteurs

Il ressort de cet atelier qu'il reste une grande marge de progrès pour améliorer l'évaluation de la protection effective des protecteurs auditifs. Les travaux présentés dans ce document s'orientent dans ce sens.

On présente dans ce rapport les développements qui ont été réalisés en ce qui concerne l'élaboration d'un système de mesures de l'atténuation des protecteurs adapté au milieu de travail. De plus, on présente les résultats obtenus avec ce système pour plusieurs travailleurs et plusieurs environnements de travail différents.



## 3. ÉTAT DE L'ART SUR LES MESURES TERRAIN DE LA PROTECTION AUDITIVE

Le présent état de l'art se concentre essentiellement sur les principaux résultats concernant la **mesure terrain** de la performance des protecteurs ainsi que sur certains facteurs influant sur cette performance. Ce dernier aspect nous apparaît important car il conditionne en partie le choix de l'approche à utiliser pour l'évaluation de la performance en milieu de travail.

### 3.1 Mesures terrain de la performance des protecteurs

Les principaux résultats de l'état de l'art sur les mesures terrain de la performance des protecteurs auditifs sont notamment présentés dans un article [11] publié dans le cadre du présent projet. Une vue plus générale et détaillée du domaine est disponible dans trois articles qui présentent une revue de la littérature : deux par Berger, avec une première revue en 1986 [12] suivie d'une mise à jour en 2007 [13] et un article par Hager [14] en 2006. Nous recommandons aussi l'étude bibliographique exhaustive, écrite en français, sur la mesure *in situ* de l'affaiblissement acoustique des protecteurs auditifs présentée tout récemment par Kusy [15].

Sauf pour des protecteurs très performants (dans le cas de la double protection par exemple) il est généralement admis que la conduction par voie osseuse n'affecte pas les performances des protecteurs; il est alors possible de considérer la perte par insertion (*IL*, abréviation de *Insertion Loss*) comme la mesure idéale de l'atténuation d'un protecteur : elle consisterait à mesurer le signal sonore qui agit sur le tympan, avec et sans protection. Cette mesure idéale est réalisée en pratique par des méthodes qui peuvent être divisées en 2 catégories : les méthodes subjectives et les méthodes objectives. Les méthodes de mesures subjectives utilisent principalement la technique *REAT* (abréviation de *Real-Ear Attenuation at Threshold*), technique utilisée pour déterminer le *NRR* (abréviation de *Noise Reduction Rating*), indice de performance utilisé en Amérique du Nord. Les méthodes objectives recensées utilisent des instruments de mesures pour déterminer les niveaux sonores. Elles sont, principalement, des dérivés de la méthode *MIRE* (abréviation de *Microphone-in-Real-Ear*).

#### 3.1.1 Méthodes de mesures subjectives

**REAT.** La mesure d'atténuation subjective la plus utilisée est la méthode de type *REAT* : le seuil d'audition d'un sujet est déterminé à plusieurs fréquences (entre 125 et 8000 Hz), avec et sans protecteurs auditifs et la différence des seuils, en dB, entre les 2 séries de mesures donne l'atténuation du protecteur auditif. Cette approche donne la perte par insertion avec un biais dû à l'effet de masquage des bruits physiologiques du sujet dont le niveau est indiqué par la variable *PN* (abréviation de *Physiological Noise*). Malgré cela, le *REAT* est généralement vu comme le *gold standard* de la mesure de la protection auditive et il est accepté comme mesure équivalente du *IL*. Pour les mesures terrain, deux types de procédures *REAT* peuvent être utilisés: en cabine insonorisée portable ou avec des écouteurs portatifs. Plusieurs études ont été réalisées récemment en utilisant ces procédures [16,17]. Une des méthodes utilisées dans les récentes études est le FitCheck<sup>TM</sup> qui ne nécessite pas de cabine audiométrique, car il utilise des écouteurs et semble donner des résultats comparables aux tests *REAT* en cabine audiométrique [18] ; par contre, il ne permet de tester que les bouchons. Outre le fait qu'elle n'en soit qu'encore à ses

débuts, quatre difficultés sont associées à la méthode FitCheck™: i) les mesures ne peuvent s'effectuer que de façon ponctuelle dans le temps; ii) le sujet n'est pas évalué dans sa position réelle de travail; iii) le temps nécessaire pour évaluer un sujet est important; iv) il faut trouver un endroit où le bruit ambiant est faible, ce qui peut être difficile en milieu industriel.

**Équilibrage des niveaux acoustiques (*Loudness balance*).** Pour pallier la difficulté de trouver un endroit calme, une étude récente [19] propose d'utiliser une technique où on demande au sujet d'ajuster au même niveau de force sonore ce qu'il entend dans chacune de ses deux oreilles. La méthode propose deux avantages par rapport au *REAT*: premièrement, elle ne nécessite pas un endroit silencieux pour réaliser les tests, puisque la calibration se fait à 60 dB sous casque et deuxièmement, le travailleur s'auto-évalue, ce qui est un excellent moyen de motivation et de formation auprès des travailleurs. Par contre, le temps nécessaire pour réaliser le protocole complet de mesures se compare au temps nécessaire pour la méthode du *REAT*. De plus, il existe encore très peu d'études démontrant la fiabilité de cette technique pour évaluer les protecteurs en milieu de travail.

### 3.1.2 Méthodes de mesures objectives

**Méthode *F-MIRE*.** La principale méthode objective de mesures terrain est la méthode *F-MIRE* (*F* pour *Field*) développée par certains des auteurs de ce rapport dans le cas des bouchons d'oreille [5,20]. Elle est basée sur une mesure par un doublet microphonique des pressions sous et sur le protecteur. Elle repose sur une formulation qui permet de prédire le *REAT* du porteur à partir de la différence des niveaux mesurés sous le protecteur et sur le protecteur. Cette prédiction repose présentement sur deux calibrations en laboratoire et une calibration terrain du système microphonique et sur l'utilisation d'un facteur moyen de compensation qui prend en compte l'effet de masquage dû au bruit physiologique ainsi que trois fonctions de transfert: pression à l'entrée de l'oreille obstruée sur pression champ libre, pression au tympan de l'oreille ouverte sur pression en champ libre et pression au microphone sous le protecteur sur pression au tympan de l'oreille occluse. Il reste à améliorer cette prédiction en déterminant un facteur de compensation individuelle et à étendre cette mesure aux protecteurs de type coquille.

***DPOAE (Distortion product otoacoustic emission)*.** La *DPOAE* est utilisée en audiologie pour détecter certains problèmes auditifs. Il s'agit d'une réponse, auto-générée, à la stimulation de 2 tons purs, émise par les cellules auditives externes (CAE) vers le conduit auditif. En ce qui concerne la protection auditive mesurée par la méthode de la *DPOAE*, les écrits à ce sujet sont rares, mais il y a au moins une étude recensée de l'usage de la *DPOAE* afin de mesurer l'atténuation donnée par un protecteur [21]. Cependant les possibilités d'utilisation de cette méthode restent limitées parce que le sujet mesuré doit posséder, pour que les mesures soient valables, une audition parfaite et de plus, comme la réponse des CAE au stimulus s'affaiblit quand la dose de bruit du sujet augmente<sup>5</sup>, il sera difficile, voire impossible, d'utiliser cette méthode pour mesurer l'atténuation réelle des protecteurs en milieu industriel.

---

<sup>5</sup> On peut définir la dose de bruit comme étant l'énergie acoustique perçue par notre système auditif pendant un temps d'exposition donné.



**Évaluation audiolologique des potentiels évoqués du tronc cérébral (*ABR pour Auditory brainstem response*).** Il y a très peu d'études expérimentales à ce sujet [22,23]. Il s'agit d'une méthode, encore à ses débuts, qui associe le stimulus auditif à une mesure de l'activité cérébrale en collant des électrodes sur la tête de sujets. Bien que les équipements de mesures afin de mesurer l'activité cérébrale reliée à l'audition existent, le problème majeur de la méthode, appliquée à la mesure de la protection auditive, se situe au niveau de la grande variabilité des résultats qui dépendent de la procédure utilisée [23].

### **Mesure en continu**

L'avantage d'une méthode en continu dans le temps est de prendre en compte les facteurs influençant l'atténuation réelle, chose qu'il est très difficile de faire, voire impossible, avec les méthodes de mesures ponctuelles. En 1993, alors que les appareils n'étaient pas encore suffisamment compacts pour être portés directement par les travailleurs, une étude utilisant des émetteurs radio et permettant ainsi l'enregistrement de données audio à distance a été effectuée [24], il s'agit à notre avis de la première étude de mesure de l'atténuation en continu recensée. De nos jours, les développements en miniaturisation nous offrent la possibilité d'équiper un travailleur avec un enregistreur suffisamment compact pour ne pas déranger ses mouvements [25]. Ci-après sont présentées trois méthodes de mesures terrain qui permettent d'obtenir, de façon objective et continue, soit l'atténuation réelle des protecteurs, soit la dose réelle du travailleur.

*Mesure en continu par dosimétrie.* Dans cette méthode, un dosimètre sert à déterminer le niveau équivalent de pression acoustique global pondéré A équivalent auquel est exposé le travailleur sous le protecteur durant un quart de travail. Cette méthode est le fruit de plusieurs études publiées dans les 25 dernières années. La première étude recensée utilisant cette méthode date de 1983 [26]. L'année suivante, Goff and Blank [27] arrivaient à la conclusion, en utilisant une procédure semblable, que les valeurs d'indice de protection *NRR* étaient surévaluées. Récemment, un système à dosimètre a été utilisé pour effectuer des mesures terrain [28] et d'autres études sont en cours, utilisant cette méthode de façon extensive [29]. En se basant sur la logique de mesure *MIRE*, il serait possible d'équiper un travailleur avec 2 dosimètres et ainsi ajouter à la dose réelle du travailleur, la mesure dosimétrique du champ dans lequel il se trouve. Il serait alors possible de déterminer une atténuation réelle obtenue par le port d'un protecteur auditif.

*Mesure fréquentielle de l'atténuation, en continu.* Giardino et Durkt [30], en utilisant des microphones miniatures installés à l'intérieur et à l'extérieur des protecteurs de type coquille, ont pu étudier la performance de 1265 protecteurs (23 modèles et 20 types de machines) dans le secteur minier. Pour chaque protecteur/travailleur, des mesures de pression acoustique d'environ 40 minutes ont été effectuées et analysées. Ainsi, les données d'affaiblissement ont pu être analysées en fonction de l'indicateur C-A (balance spectrale), indicateur caractérisant le contenu spectral du bruit. Les auteurs en concluent que les valeurs de *NRR* obtenues en laboratoire sont largement supérieures à celles obtenues en usines. Une récente étude, utilisant une méthode basée sur l'approche *MIRE*, vient d'être présentée par

Kotarbinska et al [31]. L'étude visant à mesurer l'atténuation de coquilles de protection, un microphone est installé sous le protecteur de chaque oreille, l'autre étant attaché sur le protecteur. Le système d'enregistrement étant un analyseur sonore quatre voies, les données recueillies sont archivées sous forme de spectres fréquentiels en bandes de tiers d'octave, cela pour chacun des 4 microphones. Il s'agit d'une des premières études à être présentée qui enregistre les données de la protection en continu, ce qui constitue une percée importante dans les techniques de mesures terrain. Cette étude donne des résultats intéressants sur la protection réelle obtenue par des travailleurs pendant leur journée de travail.

### **3.2 Facteurs influant sur la performance**

Un des facteurs affectant le plus la performance réelle des protecteurs est le temps de non-port de ceux-ci lors de leur utilisation en milieu de travail. Les problèmes de communication entre travailleurs, les questions d'inconfort et des problèmes d'ordre perceptif sont notamment évoqués pour expliquer la réduction du temps de port des protecteurs (voir par exemple [2,3]). Plus spécifiquement, Berger [32] dresse un aperçu des principaux facteurs affectant l'atténuation des protecteurs auditifs et souligne leur effet sur le temps de non-port de ceux-ci. L'effet de la réduction du temps de port sur l'atténuation réelle y est notamment discuté. La notion de confort, mise en relation avec le temps de non-port, est discutée par Damongeot [33] et Arezes et Miguel [34]. Ces derniers discutent particulièrement de l'importance de s'assurer de « l'acceptabilité » des protecteurs par les travailleurs pour obtenir une performance optimale. À l'aide de questionnaires, Arezes et Miguel introduisent un indice de confort et le mettent en relation avec le temps de port. Les auteurs montrent qu'il existe une corrélation positive entre l'indice de confort et le temps de port. Sans surprise, il en ressort que plus le protecteur est jugé confortable, plus il est porté. Notons aussi les travaux de Casali et Park [35,36] qui ont tenté de recréer en laboratoire certaines conditions que l'on retrouve en milieu de travail (e.g. insertion des bouchons, mouvement dynamique de la tête, etc.).

Morata et al [8] ont étudié les raisons exprimées par des travailleurs d'imprimerie pour ne pas porter adéquatement leurs protecteurs. Un groupe de 124 travailleurs exposés à différents types et niveaux de bruit a été étudié. Différentes données ont été obtenues par interviews avec les travailleurs. Il en ressort que 64% des travailleurs disent porter des protecteurs, mais que seulement 20% de ce sous-groupe les porte en permanence lorsqu'exposés au bruit. Les principales raisons évoquées par les travailleurs pour ne pas porter les protecteurs sont : i) interférence à la communication ; ii) interférence avec le travail à accomplir (e.g. ne pas entendre certains bruits de machines pouvant être utile) ; iii) confort des protecteurs (particulièrement les coquilles pour les environnements chauds et humides) ; iv) la perception propre des travailleurs de leur déficience auditive. Williams [37] discute du temps de non-port et de confort pour les coquilles en posant la question de savoir s'il est raisonnable de demander à des travailleurs de porter des protecteurs sur une longue période de temps. Des mesures d'atténuation pour des coquilles et de pression sanguine autour de l'oreille pour différentes force de serrage sont présentées. Les résultats semblent indiquer que la force de serrage provoque un inconfort par une réduction du flux sanguin dans les tissus autour de l'oreille. Ces résultats font dire à l'auteur qu'une des solutions pour augmenter le temps de port des protecteurs pourrait être de fournir aux

travailleurs des pauses en milieu moins bruyant, lors desquelles un travailleur pourrait enlever ses protecteurs afin de soulager l'inconfort.

Au *HSE (Health & Safety Executive)*, Hugson et al [9] proposent une étude comportementale sur l'attitude des travailleurs face à la protection auditive. Des questionnaires ont été envoyés dans 19 compagnies et un total de 280 employés ont répondu aux questionnaires. Les auteurs ont pu notamment observer que 132 des 280 répondants disaient porter leurs protecteurs en tout temps, tandis que 112 affirmaient ne les porter que quelques fois et 30 pas du tout (en accord avec les résultats présentés par Berger [6]). Les principales raisons évoquées pour ne pas (ou peu) porter les protecteurs sont principalement les problèmes d'entrave à la communication, le manque de perception des signaux d'alarmes et des bruits importants, le sentiment d'isolement et le manque de confort des protecteurs. De plus, les auteurs relèvent aussi certaines attitudes négatives des travailleurs qui peuvent influencer le temps de port. Par exemple, « I'm already deaf so there is no point in wearing hearing protection », « Using earplugs will cause ear infections », « Earmuffs make me appear less attractive, silly, less macho », « I'm resigned to hearing loss by having to work in a noisy job », « The manager doesn't wear the hearing protection, why should I? ». Neitzel et Seixas [38] ont mené une large étude, à l'aide de questionnaires et de mesures terrain, sur l'efficacité de la protection auditive pour des travailleurs de la construction. Il en ressort que les travailleurs participant à l'étude portaient leur protecteur moins de 25% du temps où ils étaient exposés à des bruits de plus de 85 dB(A). De plus, les résultats montrent que les travailleurs rapportant utiliser leurs protecteurs « en tout temps » ne le faisaient en fait que 33% du temps où ils étaient exposés à plus de 85 dB(A). Finalement, en combinant les temps d'exposition réels et les mesures d'atténuation effectuées sur le terrain, les auteurs concluent que la protection effective apportée par les protecteurs était moins de 3 dB, une protection négligeable, compte tenu des forts niveaux d'exposition associés au domaine de la construction. Des résultats comparables ont été obtenus par Lusk et al [7] auprès de 400 travailleurs de la construction du MidWest américain. Des taux d'utilisation allant de 18% à 49% ont été obtenus selon le type de tâche.

La revue de la littérature fait ressortir quelques points importants qui ont guidé les travaux du présent projet :

- 1) Il existe relativement peu d'études portant sur la mesure en milieu de travail de la performance des protecteurs.
- 2) Il n'existe pas, à l'heure actuelle, de système de mesures simple et « clé en main » qui permette de faire la mesure en milieu de travail
- 3) Les méthodes de mesures terrain dites subjectives ne permettent pas la mesure en continu et sont lourdes à mettre en œuvre. De plus, les travailleurs doivent être retirés de leur environnement de travail.
- 4) Les méthodes utilisant des dosimètres sont intéressantes mais ne permettent pas, pour un suivi sur une longue durée, d'obtenir de l'information sur le contenu fréquentiel et posent la question du risque d'affecter l'étanchéité du protecteur par le passage du fil du microphone vers l'intérieur de celui-ci.

- 5) De toutes les méthodes objectives celle dite du *F-MIRE* semble la plus prometteuse, si on désire faire un suivi dans le temps de la performance. Par contre, elle demande certaines adaptations et développements, particulièrement au niveau du système d'enregistrement et des microphones de mesures.

## 4. OBJECTIFS DE L'ÉTUDE TERRAIN

L'état de l'art a permis de mettre en évidence qu'il existe bien un écart important entre l'atténuation de protecteurs auditifs mesuré en laboratoire et celle obtenue en milieu de terrain. Cependant les causes d'un tel écart sont encore mal connues. Qui plus est, les variations dans le temps de l'atténuation au cours d'un quart de travail ont fait l'objet de très peu d'études ce qui est en partie attribuable à la difficulté d'aller faire des mesures objectives sous les protecteurs.

Dans ce contexte l'**objectif principal** de l'étude terrain est de déterminer quelle est l'efficacité effective des protecteurs auditifs sur le terrain pour un quart de travail complet. Plus spécifiquement, il s'agit d'établir les fondements d'une méthode de mesure de cette efficacité valide autant en laboratoire que sur le terrain.

L'accomplissement de cet objectif passe par la réalisation de quatre **objectifs spécifiques** :

1. **Développement du système de mesures** : L'évaluation de l'efficacité effective de protecteurs auditifs en fonction du temps au cours d'une journée normale de travail implique le développement d'un système d'enregistrement temporel en continu des signaux de pression acoustique à l'oreille du travailleur en avant et derrière le protecteur de façon simultanée. Cet enregistrement continu est nécessaire pour se garder toute possibilité d'analyse subséquente. Le système, basé sur la méthode *F-MIRE*, se doit d'être suffisamment léger et robuste afin de pouvoir être porté sans gêne par des travailleurs durant tout un quart de travail et doit permettre d'étudier des coquilles (serre-tête) et bouchons moulés.
2. **Mesures en milieu de travail** : Il est nécessaire de mettre au point un protocole de mesures permettant l'évaluation des niveaux sonores perçus sous le protecteur par un travailleur en milieu de travail. Ce protocole doit pouvoir être appliqué à plusieurs travailleurs œuvrant dans différents environnements sonores.
3. **Traitement des signaux mesurés** : L'examen des résultats doit passer par le développement d'une méthodologie de traitement de signal, d'outils et d'indicateurs pertinents pour l'analyse des signaux recueillis pour déterminer les variations d'atténuation en fonction du temps et en lien avec les événements de la journée de travail et l'environnement sonore (contenu spectral, présence de parole ou de signaux d'alarme).
4. **Analyse des résultats** : L'analyse des résultats doit permettre de non seulement étudier la variation dans le temps de l'atténuation (ou tout autre indicateur) mais aussi la comparaison des résultats obtenus avec les valeurs réglementaires et norme(s) en cours afin d'évaluer le potentiel du système et de la procédure développés.

Chacune des quatre sections qui suivent présente la méthodologie utilisée pour atteindre chacun de ces quatre objectifs spécifiques.



## 5. DÉVELOPPEMENT DU SYSTÈME DE MESURES

### 5.1 Principe de la mesure

La méthode proposée dans cette étude repose sur la technique *F-MIRE* (*Field-Microphone In Real Ear*). Elle consiste à faire la mesure, à l'aide de microphones miniatures, des signaux de pression **non-protégés** (à l'extérieur du protecteur) et **protégés** (sous le protecteur). Un schéma illustrant le principe des deux microphones est présenté à la Figure 3. La partie gauche de la figure illustre le principe pour un bouchon moulé (bouchon fabriqué par Sonomax Hearing Healthcare Inc[39]). On utilise un doublet microphonique avec lequel on insère la partie « microphone interne » dans un canal de mesure (*sound-bore*) qui permet d'avoir accès au canal auditif. Pour des protecteurs de type coquille (serre-tête), on perce un trou dans la coquille pour insérer aussi un petit canal de mesure auquel on peut fixer le doublet microphonique.

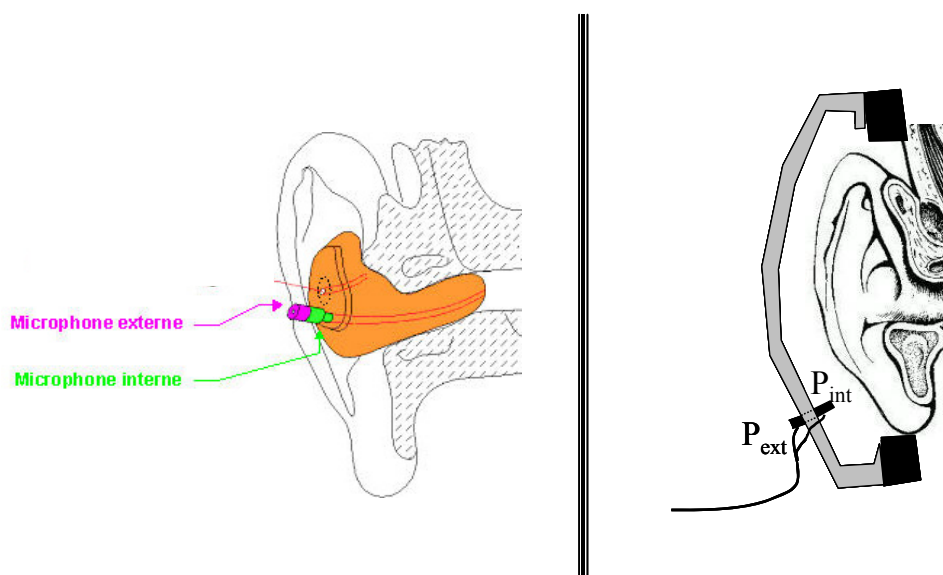


Figure 3 : Schéma du montage pour les mesures microphoniques des niveaux protégés et non protégés (bouchon moulé (image de gauche), coquille (image de droite))

Le doublet microphonique est ensuite connecté à un système d'enregistrement, qui permet l'enregistrement en continu des signaux temporels pour les deux microphones. Ces données sont par la suite utilisées en post-traitement pour évaluer la performance des protecteurs en fonction du temps pour toute la durée de la prise de mesures.

### 5.2 Description des microphones

Des microphones à condensateur électret miniatures de la série FG fabriqués par la compagnie Knowles sont utilisés pour faire les mesures. Les microphones de type FG-23742 sont employés pour la mesure des signaux non protégés (extérieurs) tandis que ceux de type FG-23652 sont employés pour les signaux protégés (sous le protecteur). Ces derniers diffèrent des FG-23742 par leur sensibilité qui est de 10 dB supérieure. Ces microphones sont omnidirectionnels et offrent une réponse plate (jusqu'à au moins 10 kHz). Chaque paire de microphones FG-23742 et FG-

23652 est assemblée par la compagnie Sonomax pour former un doublet microphonique. Les spécifications techniques de ce doublet microphonique sont présentées à l'Annexe A. La Figure 4 montre un doublet microphonique, tel qu'utilisé pour la mesure avec et sans l'embout pour le canal de mesure. Un total de 6 doublets microphoniques ont été acquis, ce qui permet de faire la mesure sur trois travailleurs simultanément (3 travailleurs  $\times$  deux oreilles = 6 doublets microphoniques).

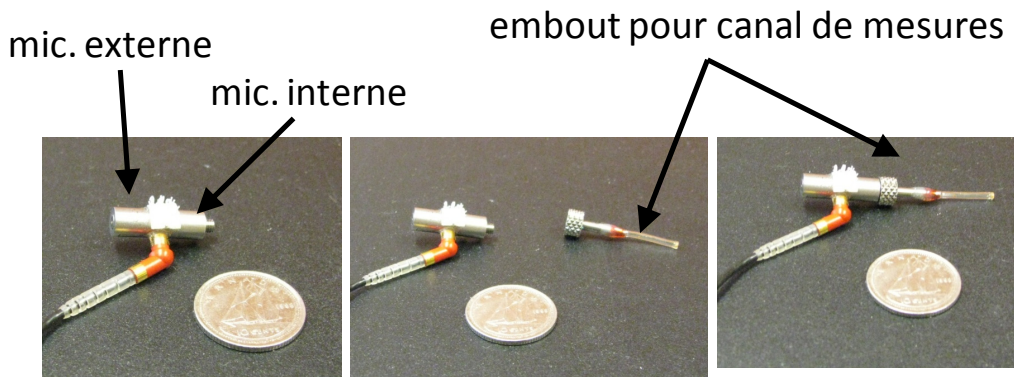


Figure 4 : Doublet microphonique tel qu'utilisé pour la prise de mesures

### 5.3 Description du système d'enregistrement

Plusieurs critères ont guidé le choix du système d'enregistrement. Le système se doit premièrement d'être suffisamment léger et robuste afin de pouvoir être porté sans gêne par un travailleur pendant une longue période de temps. Le système doit aussi permettre un échantillonnage à fréquence suffisamment élevée pour permettre de couvrir le spectre audible. Finalement, il doit posséder assez de mémoire pour permettre le stockage des signaux temporels des deux microphones pour toute la durée de la prise de mesures. Le système d'enregistrement Edirol R-09 (voir Figure 5) possède les caractéristiques requises et 6 de ces systèmes ont été achetés au début de l'étude. Le Edirol R-09 est un enregistreur numérique 16 bits à deux canaux qui permet l'enregistrement de signaux sous format *wav* non-compressés à une fréquence d'échantillonnage de 44,1 kHz. L'enregistrement des signaux sous format *wav* se fait sur des cartes-mémoire SD de 4 GB ce qui permet, pour deux canaux à 44,1 kHz d'échantillonnage (16 bits), des durées d'enregistrement pouvant aller jusqu'à un peu plus de 6 heures. Il est relativement simple, en changeant de carte-mémoire et de piles une fois durant les mesures, de faire des enregistrements pour des quarts de travail allant jusqu'à douze (12) heures.





Figure 5 : Photo de face de l'enregistreur Edirrol R-09 utilisé pour les mesures terrain

L'enregistreur est alimenté par deux piles AA (1.25 V) rechargeables NiMH qui procurent une autonomie d'au moins 6 heures en mode enregistrement. Le poids de l'enregistreur, avec les piles, est d'environ 160 grammes. L'enregistreur peut aussi être mis en mode « blocage » (*lock*), qui permet de mettre celui-ci en mode enregistrement sans qu'on puisse l'arrêter par accident en touchant à la touche d'enregistrement. Les spécifications techniques de l'enregistreur sont présentées à l'Annexe A.

## 5.4 Instrumentation des bouchons

Le défi qui se présente, si on désire tester des travailleurs portant des bouchons, est de trouver une façon d'insérer un microphone miniature du côté protégé sans modifier le comportement des bouchons. Cette contrainte a restreint le choix des protecteurs de type « bouchon » aux bouchons moulés de la compagnie Sonomax. De par sa conception, ce bouchon est un des seuls permettant l'insertion de microphones miniatures pour la mesure des signaux protégés. Ainsi, pour cette étude, la partie portant sur les bouchons ne concerne que des bouchons moulés de la compagnie Sonomax.

Tel que décrit brièvement à la section 5.1 et à la Figure 6, ce bouchon possède un canal de mesures intégré permettant l'insertion du microphone. Afin de s'assurer de bien maintenir en place ce microphone dans le bouchon, celui-ci est vissé à un embout s'insérant fermement dans le canal de mesures du bouchon. La Figure 6 donne un aperçu de la façon dont l'ensemble « doublet microphonique + embout » est inséré dans le bouchon moulé. Aussi, afin de s'assurer de l'étanchéité et d'éviter les déplacements du système pendant les mesures, un anneau de pâte adhésive était apposé sur le joint entre le protecteur et le doublet microphonique.

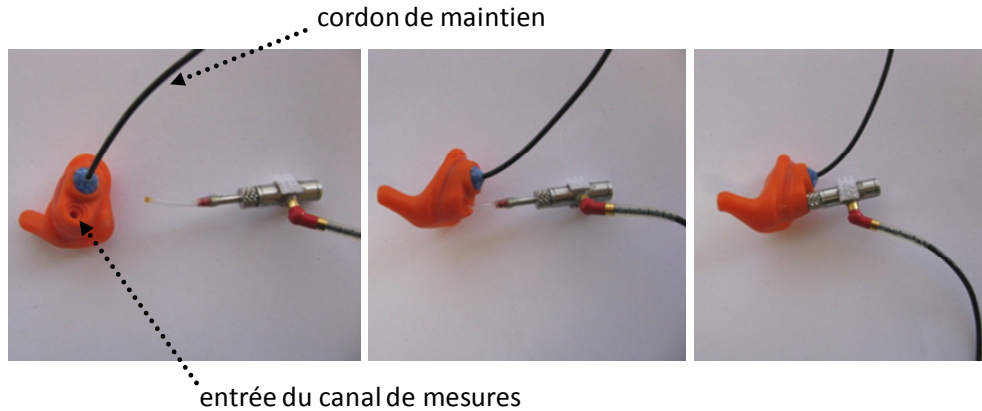


Figure 6 : Aperçu de l'ensemble « doublet microphonique / embout / bouchon moulé »

La Figure 7 montre un exemple d'un bouchon moulé, instrumenté des microphones, tel qu'inséré dans l'oreille d'un sujet.



Figure 7 : Aperçu d'un bouchon moulé, instrumenté du doublet microphonique, tel qu'inséré dans l'oreille d'un sujet.

## 5.5 Instrumentation des coquilles

Dans le cas des coquilles (serre-tête), deux possibilités peuvent être envisagées : i) insérer un microphone sous la coquille et laisser passer le fil entre le coussin et la tête; ii) percer la coquille et insérer le microphone à travers celle-ci. La deuxième option a été retenue, car elle permet d'éviter d'introduire de potentielles fuites dans le cas où on laisse le fil du microphone entre le coussin et la tête. Le principe utilisé consiste à percer la coquille et à y insérer un tube (voir le canal de mesures à la Figure 8) qui pointe vers l'intérieur de la coquille. Le trou est ensuite bouché de façon hermétique par un embout métallique dans lequel le tube est raccordé. Le doublet microphonique est ensuite vissé à l'embout. Le microphone « intérieur » du doublet permet donc de faire la mesure à l'intérieur de la coquille, tandis que le second microphone permet de faire la mesure à l'extérieur de la coquille. La Figure 8 montre un exemple d'une

coquille modifiée dans laquelle est inséré un double microphonique, ainsi qu'un exemple de port par un travailleur.



Figure 8 : Aperçu d'une coquille instrumentée du doublet microphonique.

La position du doublet microphonique sur la coquille a été choisie pour minimiser la gêne que pouvait occasionner le doublet pour le travailleur. Il a été convenu que de positionner le doublet vers l'avant et vers le bas de la coquille permettait de faciliter le déplacement des coquilles quand un travailleur le désire (pour les enlever, les bouger, etc.) sans toucher au doublet. De plus, cette position permet aussi d'éviter que le doublet touche à l'épaule du travailleur, lorsque celui-ci doit bouger la tête. En pratique, cette position permet au travailleur de porter ces coquilles le plus normalement possible.

## 5.6 Système de mesures complet

Un système d'acquisition complet permet de faire la mesure pour **une** oreille d'un travailleur. Il comprend : i) un doublet microphonique installé sur le protecteur de la façon présentée dans les sections précédentes; ii) un petit boîtier permettant d'alimenter les microphones; iii) un enregistreur Edirol R-09 à deux canaux; iv) un petit étui, pouvant être porté à une ceinture, contenant le boîtier d'alimentation et l'enregistreur Edirol. Un travailleur porte sur lui deux systèmes complets lors d'une prise de mesures. Chaque système complet pèse moins de 300 grammes. La Figure 9 montre le système de mesures complet. L'image de gauche montre les différentes parties du système, tandis que l'image de droite montre le système lorsqu'inséré dans l'étui et prêt à être installé à la ceinture d'un travailleur. La Figure 10 montre trois exemples de travailleurs portant l'équipement de mesures durant leur quart de travail. Le travailleur de gauche peut glisser l'étui afin de s'asseoir confortablement sur le siège du chariot élévateur. L'image du centre montre un travailleur portant l'équipement avec des coquilles sur casque, tandis que le travailleur de droite porte l'équipement avec des bouchons moulés. Afin de minimiser les artéfacts dus aux mouvements des fils des microphones, ceux-ci sont attachés dans le dos des travailleurs à l'aide d'une petite pince.



Figure 9 : Aperçu du système de mesures complet connecté à la coquille droite d'un serre-tête (l'image de droite montre le système complet, tel que pouvant être installé à la ceinture d'un travailleur)



Figure 10 : Exemples de travailleurs portant le système de mesures pendant un quart de travail

## 6. MESURES EN MILIEU DE TRAVAIL

### 6.1 Sélection des entreprises et des candidats

Les entreprises dans lesquelles les mesures ont été réalisées ont été principalement choisies en fonction des contacts qu'ont les chercheurs participant au projet tout en gardant en tête certaines conditions ou critères : i) les entreprises devaient employer des serre-tête et/ou des bouchons moulés Sonomax (pour les raisons expliquées auparavant); ii) une diversité de secteurs d'activité ou, autrement dit, différents environnements sonores et différentes tâches de travail devaient être couverts. iii) les entreprises visées devaient accepter de participer de leur plein gré à l'étude et rendre disponible à l'équipe trois travailleurs (dans la limite du possible) pour une journée normale de travail. Un court document présentant le projet était d'abord envoyé aux personnes contacts pour chaque entreprise visée. Ensuite, un entretien téléphonique était tenu avec les entreprises intéressées à participer à l'étude, afin de s'entendre sur les arrangements logistiques relatifs aux essais. Pour les entreprises utilisant des coquilles, l'IRSST leur demandait d'envoyer les protecteurs normalement utilisés par les travailleurs visés afin de les modifier pour inclure le canal de mesures (voir section 5.5). Une fois les essais terminés, les travailleurs se voyaient offrir des protecteurs neufs. Les travailleurs participant à l'étude l'ont fait sur une base volontaire et pouvaient en tout temps (que ce soit avant ou pendant les essais) se retirer de l'étude sans avoir à fournir d'explications.

Le Tableau 1 dresse un sommaire des entreprises visitées pour les mesures. Pour deux d'entre elles (#3 et #7), les essais ont été effectués sur des périodes plus courtes que le quart de travail régulier. Le Tableau B-1, se trouvant à l'Annexe B, donne une liste des 24 travailleurs ayant participé aux essais (on note que deux travailleurs ont participé aux essais plus d'une fois, soit les travailleurs notés #21 et #23). Dix-neuf des travailleurs étaient des hommes (19 sur 24) et cinq des femmes (5 sur 24). Ils étaient âgés entre 23 et 59 ans.

Tableau 1: Liste des entreprises visitées pour la prise de mesures en milieu de travail.

#	Type d'entreprise	# de travailleurs testés	Type de protecteur	Marque	Durée approximative des mesures par travailleur
1	Transformation alimentaire	2	Bouchons moulés	Sonomax	8 heures
2	Pétrochimie	2	Bouchons moulés	Sonomax	8 heures
3	Fabrication de meubles	2	Serre-têtes	Oris Mustang EM-4155	3 heures
4	Transformation de l'aluminium	3	Bouchons moulés	Sonomax	8 heures
5	Assemblage de produits motorisés	3	Bouchons moulés	Sonomax	8 heures
6	Transformation du bois	3	Serre-têtes	Peltor H7A	9 heures
7	Aéronautique	3	Serre-têtes	Peltor H7A	9 heures
8	Production d'électricité – groupe électrogène	6	Serre-têtes	Bilsom Thunder T3 & T3H	30 min.



## 6.2 Déroulement des mesures

L'équipe de l'IRSST en charge des essais est constituée de deux personnes. Une journée typique de mesures se déroule de la façon suivante :

- Préparation de l'équipement

L'équipement (systèmes d'enregistrement, microphones, calibrateur, etc.) est d'abord inspecté rapidement, assemblé et préparé avant que les travailleurs n'arrivent au travail. On vérifie que les cartes-mémoire sont vides et que les piles sont bien toutes chargées.

- Calibration des microphones

Une calibration de chacun des microphones est ensuite effectuée. Pour ce faire, on utilise un calibreur Brüel & Kjaer type 4231 comme source de référence et un coupleur spécialement conçu pour s'adapter aux microphones. On place à tour de rôle chacun des microphones dans le coupleur inséré dans le calibreur acoustique et on enregistre, sur l'enregistreur associé au microphone, le signal du calibreur pendant environ 10 secondes. Ces signaux de référence sont ensuite utilisés lors de l'analyse des résultats.

- Rencontre d'introduction avec les travailleurs

Une brève rencontre d'introduction est ensuite faite avec les travailleurs. On leur explique brièvement l'objectif de l'étude, le fonctionnement du système de mesures (même s'ils n'ont pas à y toucher) et le fonctionnement de la journée de mesures. On leur spécifie notamment que le système est conçu pour qu'ils puissent faire leur travail de la même façon qu'ils le font d'habitude. On leur donne aussi quelques indications sur les précautions à prendre s'ils désirent enlever leurs protecteurs (pause, heure du « lunch », etc.). Il leur est aussi mentionné que leur participation aux essais est volontaire et qu'ils peuvent se retirer de l'étude en tout temps sans avoir à donner de raisons.

- Installation de l'équipement sur les travailleurs

On installe ensuite l'équipement sur chacun des travailleurs participant aux essais ce jour-là. Pour ce faire, l'équipement est installé préalablement sur une ceinture fournie aux participants. Cette ceinture est ensuite posée à la taille du travailleur. On s'assure que les fils des microphones ne viennent pas interférer avec le travailleur en les attachant à l'arrière de celui-ci à l'aide d'une petite pince (voir Figure 10). On s'assure aussi d'avoir une synchronisation droite/gauche en démarrant simultanément l'enregistrement sur les deux enregistreurs.

- Pause-midi

Lors de la pause du midi (pause pour le lunch) on demande au travailleur d'enlever tout le système de mesures. On récupère alors la ceinture équipée des deux systèmes pour chaque travailleur. On remplace alors les cartes-mémoire par de nouvelles cartes vides et remplace aussi les piles par de nouvelles piles chargées. Par mesure de vérification, on refait la

procédure de calibration des microphones. Une fois la pause-midi terminée, on redémarre les enregistrements et replace la ceinture « instrumentée » sur les travailleurs.

- Fin du quart de travail et des mesures

À la fin du quart de travail on demande aux travailleurs de venir rendre leur ceinture « instrumentée ». Pendant qu'une dernière calibration des microphones est effectuée, on demande aux travailleurs de remplir un questionnaire. Ce questionnaire (voir Annexe C) avait pour buts principaux de : i) vérifier si les sujets étaient des utilisateurs fréquents du type de protecteur mesuré; ii) vérifier si les sujets étaient des « pro-protecteurs »; iii) vérifier si le système avait modifié leur façon de travailler; iv) vérifier si le système était dérangeant et/ou inconfortable. Finalement, dans le cas où des serre-tête ont été testés, on donne un serre-tête neuf aux travailleurs. Ceux-ci peuvent par la suite quitter les lieux s'ils le veulent. Les systèmes de mesures sont ensuite démontés et rangés.





## 7. TRAITEMENT DES SIGNAUX MESURÉS

Les signaux mesurés sont récupérés sous forme de fichier en format non compressé *wav*. Pour chaque oreille (et chaque travailleur), quatre fichiers sont généralement obtenus : i) deux fichiers de référence (calibration), pour lesquels un de ceux-ci réfère au microphone interne et l'autre au microphone externe; ii) deux fichiers, généralement volumineux, contenant les données relatives au travailleur (un pour le matin et un pour l'après-midi). Ainsi, pour chaque oreille et chaque travailleur, on analyse les données temporelles des signaux **protégés** et **non protégés** et ce, pour le matin et pour l'après-midi. Des routines ont été développées sous MATLAB[40] pour faire le traitement des signaux. La Figure 11 illustre, de façon schématique, la procédure utilisée pour le calcul des principaux indicateurs et indices, tandis que l'Annexe C donne les définitions de ceux-ci. La procédure de traitement des signaux temporels est détaillée dans les sous-sections qui suivent.

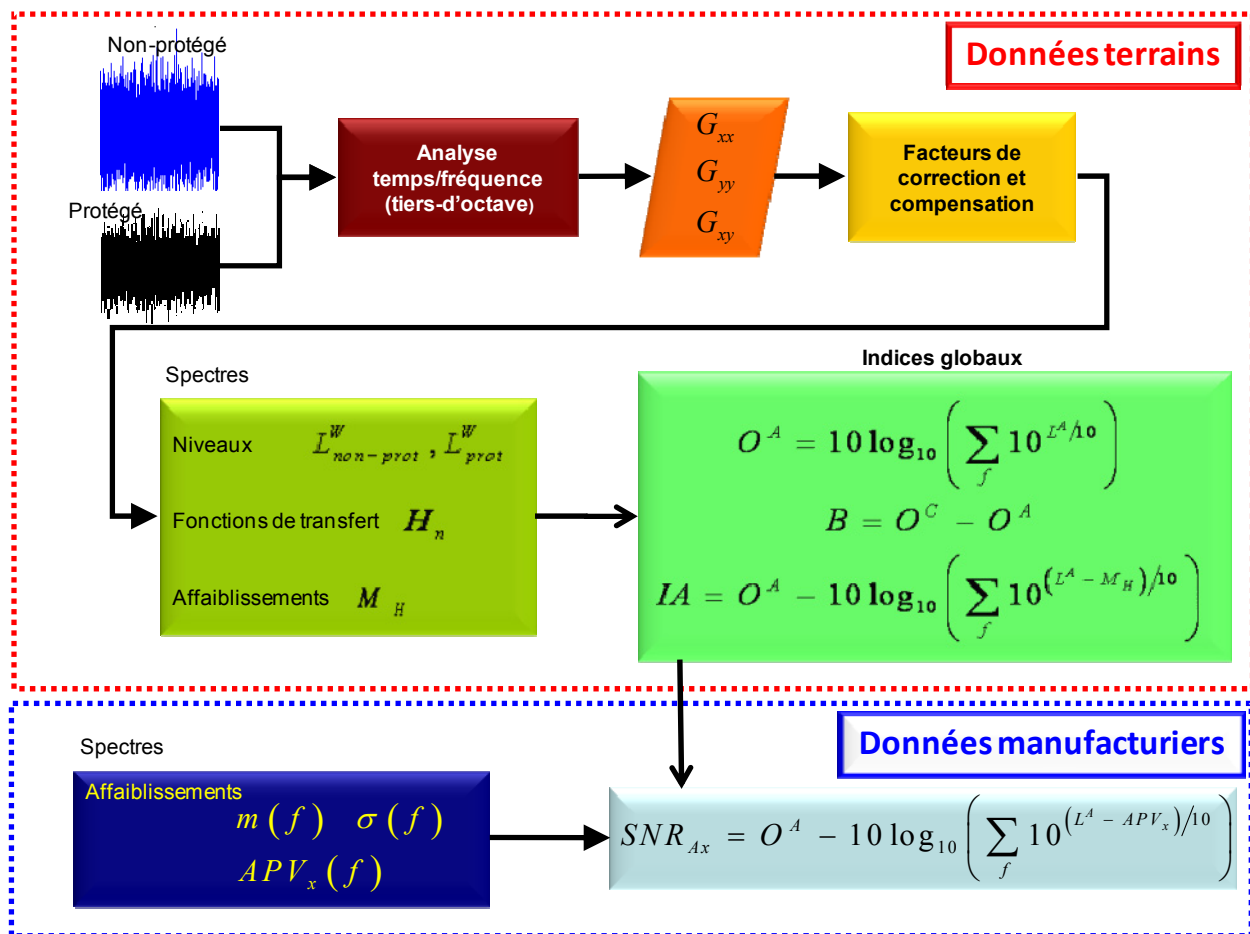


Figure 11 : Illustration schématique de la procédure de traitement des données temporelles

### 7.1 Routines de calculs

Des routines ont été développées sous MATLAB pour faire le traitement des signaux. Ces routines permettent de faire le calcul, pour deux signaux  $x(t)$  et  $y(t)$  enregistrés simultanément,

des fonctions de densité d'autospectre  $G_{xx}(t)$  et  $G_{yy}(t)$  et de densité de spectre croisée  $G_{xy}(t)$ . L'Annexe C présente la procédure de calcul, tirée de Bendat et Piersol[41], qui est utilisée pour le calcul de ces fonctions. Les fonctions de densité d'autospectre et de spectre croisée permettent le calcul de différents indicateurs utiles (e.g. niveaux de pression, fonction de transfert,  $L_{eq}$ , etc.). Pour le présent rapport, une analyse en bandes de tiers d'octave est utilisée (bien que la procédure puisse être utilisée pour tout type de bande de fréquence).

## 7.2 Traitement des signaux temporels

Le traitement des signaux temporels (simultanément un signal **protégé** et un **non protégé**) se fait, globalement, en trois étapes :

### 1. Calibration (valeurs de référence)

On lit d'abord les signaux de référence enregistrés lors de la procédure de calibration (on utilise les signaux de calibration enregistrés en fin de session de tests). En calculant le niveau *rms* du signal de référence et connaissant la valeur de référence qui doit être obtenue, on obtient un facteur de calibration que l'on applique subséquemment au signal à traiter.

### 2. Calculs des fonctions de densité d'autospectre et de spectre croisée

On découpe le signal en  $N_t$  signaux de durée  $\Delta t$ . Pour chaque tranche de durée  $\Delta t$ , on calcule les fonctions de densité d'autospectre et de spectre croisée. On obtient alors  $N_t \times N_f$  valeurs pour chaque fonction où  $N_f$  est le nombre de bandes de fréquences.

### 3. Calcul des indicateurs

Une fois les fonctions de densité disponibles, on calcule différents indicateurs utiles à l'analyse. On peut calculer des indicateurs globaux (intégrés en fréquence) variant en fonction du temps ou encore obtenir des indicateurs dépendant simultanément du temps et de la fréquence. Les principaux indicateurs utilisés pour l'analyse des résultats sont présentés à la section 7.3 qui suit.

## 7.3 Indicateurs utilisés

Les principaux indicateurs<sup>6</sup> utilisés dans le rapport sont résumés au Tableau E-1 de l'Annexe E. La suite de cette section détaille un peu plus chaque indicateur développé. Dans ce qui suit, on suppose que le signal  $x(t)$  réfère, pour une oreille donnée, au signal extérieur (non protégé) et  $y(t)$  au signal intérieur (protégé). La fonction  $W(f)$  fait référence à la fonction de pondération fréquentielle, telle que définie à l'Annexe C (dans le cas où on ne désire pas de pondération, on pose simplement  $W(f) = 1$ ). À moins d'avis contraire, on ne retient dans le reste du document, pour le calcul des indicateurs, que les résultats des bandes centrales tiers d'octave pour les 7

<sup>6</sup> Par indicateur, on entend toute grandeur permettant de qualifier, quantifier et/ou caractériser les différents phénomènes acoustiques en jeu lors des mesures

octaves situés entre 125 et 8000 Hz. À ces 7 bandes, s'ajoutent les tiers d'octave de 3150 et 6300. Les 9 bandes de fréquences préférentielles sont données au Tableau 2, qui suit :

Tableau 2 : Fréquences centrales des neuf bandes tiers d'octave préférentielles utilisées pour l'analyse

#	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Fréquence (Hz)	125	250	500	1000	2000	3150	4000	6300	8000

a. Niveau extérieur (non protégé)

Le signal du microphone extérieur (non protégé) permet de calculer :

- Spectre de niveaux (avec ou sans pondération)

$$L_{ext}^W(t, f) = 10 \log_{10} \left( \frac{G_{xx}(t, f) W(f) \Delta f}{4 \times 10^{-10}} \right) \quad (1)$$

- Niveau global (avec ou sans pondération)<sup>7</sup>

$$O_{ext}^W(t) = 10 \log_{10} \left( \sum_{i=1}^{N_f} 10^{L_{ext}^W(t, f_i)/10} \right) \quad (2)$$

- Balance spectrale

La balance spectrale permet d'obtenir une idée du contenu spectral du signal à l'aide des niveaux globaux pondérés A et C. Elle représente la proportion de contenu basses fréquences dans un spectre. Un signal présentant un contenu dominé par les hautes fréquences (typiquement 1000 Hz et plus) a une balance spectrale inférieure à 1, tandis qu'un bruit dominé par les basses fréquences a une balance spectrale supérieure à 1. La balance spectrale est définie par :

$$B(t) = O_{ext}^C(t) - O_{ext}^A(t) \quad (3)$$

La Figure 12 montre trois exemples de spectres de signaux à balances spectrales différentes.

<sup>7</sup> Dans le cas des niveaux globaux protégés et non protégés, la somme sur les bandes de fréquences s'effectue sur toutes les bandes tiers d'octave plutôt que sur les bandes préférentielles seulement.

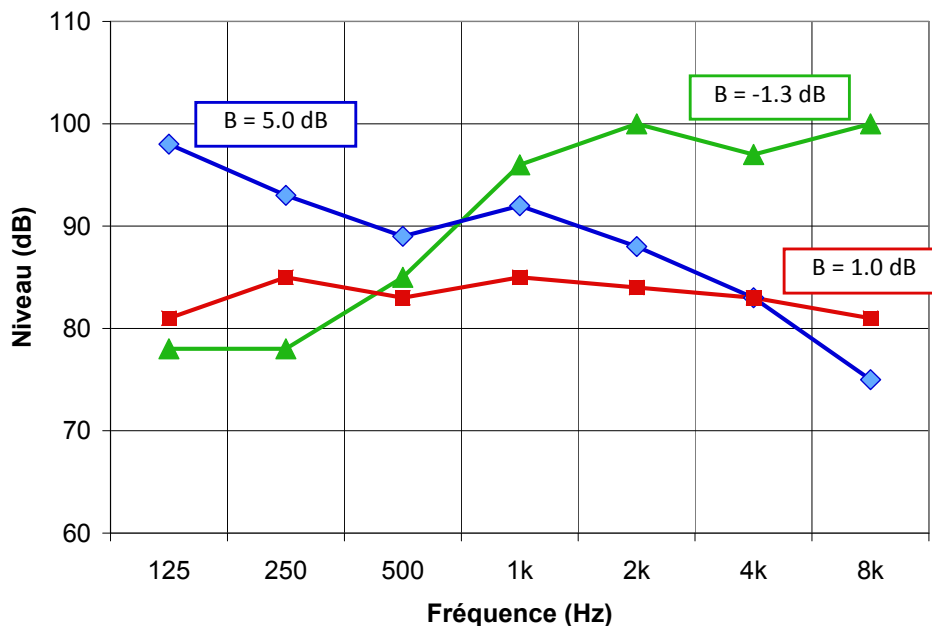


Figure 12 : Exemple de spectres avec différentes balances spectrales

## b. Niveau intérieur (protégé)

- Spectre de niveaux (avec ou sans pondération)

$$L_{int}^W(t, f) = 10 \log_{10} \left( \frac{G_{yy}(t, f) W(f) \Delta f}{4 \times 10^{-10}} \right) \quad (4)$$

- Niveau global (avec ou sans pondération) (voir note de bas de page en page 29)

$$O_{int}^W(t) = 10 \log_{10} \left( \sum_{i=1}^{N_f} 10^{L_{int}^W(t, f_i)/10} \right) \quad (5)$$

## c. Affaiblissement (atténuation) sonore

- Fonction de transfert

Afin d'évaluer la protection ou l'atténuation apportée par les protecteurs on peut utiliser différentes fonctions de transfert reliant les signaux protégés et non protégés. Quatre fonctions de transfert sont utilisées :

$$\begin{aligned}
 H_0(t, f) &= \sqrt{\frac{G_{yy}(t, f)}{G_{xx}(t, f)}} \\
 H_1(t, f) &= \frac{G_{xy}(t, f)}{G_{xx}(t, f)} \\
 H_2(t, f) &= \frac{G_{yy}(t, f)}{G_{xy}^*(t, f)} \\
 H_3(t, f) &= \frac{1}{2}(H_1(t, f) + H_2(t, f))
 \end{aligned} \tag{6}$$

○ Valeurs d'affaiblissement sonore

Les fonctions de transfert défini précédemment sont utilisées pour définir des valeurs d'affaiblissement sonore, valeurs positives exprimées en dB, sous la forme :

$$M_{H_n}(t, f) = -20 \log_{10}(|H_n(t, f)|) \quad \text{où } n = 0, 1, 2 \text{ ou } 3 \tag{7}$$

L'affaiblissement obtenu en utilisant  $H_0$  ( $n = 0$ ) est aussi appelé réduction sonore (*NR* pour *Noise Reduction*). Il correspond en fait à prendre la différence des niveaux non-protégés et protégés.

○ Indices d'affaiblissement

La caractérisation des protecteurs auditifs se fait généralement par l'utilisation d'indices d'affaiblissement qui sont souvent, en vue d'en faciliter leur compréhension et utilisation, des indices à valeur unique (indice composé d'une seule valeur). Par exemple pour l'Amérique du Nord, le *Noise Reduction Rating* *NRR* [42] est utilisé pour l'étiquetage de produits tandis que tout récemment on suggère, dans la norme ANSI S12.68-2007[43], l'utilisation du *Noise level Reduction Statistic*  $NRS_{Ax}$  pour caractériser les protecteurs. Ces indices peuvent alors être utilisés, si on connaît le niveau ambiant (non protégé), pour **estimer** le niveau protégé en dB(A). Lorsque l'indice d'affaiblissement est soustrait du niveau ambiant exprimé en dB(C) pour estimer le niveau protégé en dB(A), on parle alors d'indice de type *C-A*<sup>8</sup>. Les indices *NRR* [42] et  $SNR_x$  [44] sont des exemples d'indice que l'on utilise avec des niveaux ambiants exprimés en dB(C). Dans un même ordre d'idée, lorsque l'indice d'affaiblissement est soustrait du niveau ambiant exprimé en dB(A) pour estimer le niveau protégé en dB(A), on parle alors d'indice sous la forme *A-A'* (l'indice  $NRS_{Ax}$  [43] est un exemple d'un tel indice). La communauté scientifique tend à recommander ce dernier type d'indice, puisqu'il s'utilise avec les niveaux ambiants exprimés en dB(A), une donnée beaucoup plus couramment utilisée que le dB(C).

<sup>8</sup> C réfère ici au niveau ambiant exprimé en dB(C) et A' réfère ici au niveau protégé estimé, exprimé en dB(A).

C'est dans cet esprit que l'on cherche dans ce rapport à définir des indices d'affaiblissement à valeur unique pouvant éventuellement être utilisés pour estimer les niveaux protégés en les soustrayant à des valeurs de niveaux extérieurs exprimés en dB(A) (indice de type  $A-A'$ ). Deux nouveaux indices sont ici développés en s'inspirant de la norme ISO 4869-2 :1994[44] qui définit le  $SNR_x$  (*single-number rating*). Le premier, que l'on note  $IA_{H_3}$  et que l'on considère comme un indice « terrain », est obtenu à l'aide des niveaux non-protégés pondérés A auxquels on soustrait les valeurs d'affaiblissement mesurées  $M_{H_3}$  de la façon suivante<sup>9</sup> :

$$IA_{H_3}(t) = O_{ext}^A(t) - 10 \log \left( \sum_{i=1}^{N_f} 10^{\frac{(L_{ext}^A(t, f_i) - M_{H_3}(t, f_i))}{10}} \right) \quad (8)$$

Le second indice développé ici est construit de façon analogue au  $SNR_x$  en utilisant toutefois les niveaux non-protégés pondérés A (au lieu de la pondération C) auxquels on soustrait les valeurs de  $APV_x$  (*Assumed Protection Value*), valeurs obtenues en laboratoire. Par construction cet indice dit « laboratoire » (par opposition à indice « terrain ») ressemble beaucoup au  $SNR_x$  et est noté ici :

$$SNR_{Ax}(t) = O_{ext}^A(t) - 10 \log \left( \sum_{i=1}^{N_f} 10^{\frac{(L_{ext}^A(t, f_i) - APV_x(f_i))}{10}} \right) \quad (9)$$

où  $APV_x(f)$  (*Assumed Protection Value*) est donnée par :

$$APV_x(f) = m(f) - \alpha(x) s(f) \quad (10)$$

avec  $m(f)$  et  $s(f)$ , respectivement, l'affaiblissement moyen et l'écart-type associés obtenus en laboratoire. La valeur  $\alpha$  est obtenue en fonction du taux  $x$  de protection désiré. Ce taux de protection, exprimé en %, représente le pourcentage de cas pour lesquels un niveau de protection désiré est atteint ou dépassé. Pour le reste du rapport nous utilisons  $x = 80\%$  ( $\alpha = 0.84$ ) et  $x = 20\%$  ( $\alpha = -0.84$ ) pour caractériser les protecteurs, soit les indices  $SNR_{A80}$  et  $SNR_{A20}$ . Un des objectifs est de comparer ces deux derniers indices, basés sur des valeurs obtenus en laboratoire, aux valeurs de l'indice  $IA_{H_3}$  définit précédemment à l'équation(8), indice basé purement sur des valeurs « terrain ».

## 7.4 Facteurs de correction de tube et facteurs de compensations

Avant de procéder à la présentation et l'analyse des résultats il est nécessaire d'introduire deux facteurs à tenir en compte dans le traitement des données qui affectent de façon significative les résultats. Ils sont appelés ici les facteurs de corrections de tube et les facteurs de compensation.

- Facteurs de corrections de tube  $F_{tube}$

<sup>9</sup> Notons que l'on utilise la fonction de transfert  $H_3$  pour définir cet indice.

Le facteur de correction de tube  $F_{tube}$  tient au fait qu'on doit corriger le microphone protégé pour tenir compte de la présence du tube (canal) de mesure placé au bout du microphone lors des tests en usines (voir Figure 6 et Figure 8), ce qui fait apparaître des phénomènes de résonances de tube. Pour estimer le facteur de corrections de tube on suspend, seul, un doublet microphonique muni du tube dans un champ acoustique fourni par un haut-parleur et mesure la fonction de transfert entre les deux microphones. La valeur absolue de la fonction de transfert, exprimée en dB, est le facteur de correction de tube. Le Tableau 3 donne les facteurs de correction de tube obtenus en laboratoire pour le cas des coquilles et des bouchons moulés. On doit noter pour toutes les coquilles, des tubes de même dimensions ont été utilisés ce qui nous donne le même facteur de correction pour tout les protecteurs de type coquilles. La même chose se produit pour les bouchons moulés où le même embout de mesure est utilisé pour tous les bouchons. Le facteur de correction  $F_{tube}$  s'applique à tout indicateur impliquant le microphone protégé (niveaux protégés et affaiblissements sonores).

Tableau 3 : Facteurs de corrections de tube  $F_{tube}$  (exprimés en dB) utilisés pour les doublets microphoniques dans les coquilles et les bouchons moulés

Fréquence (Hz)	125	250	500	1000	2000	3150	4000	6300	8000
$F_{tube}$ (coquilles)	0.8	1.4	1.6	3.0	9.5	14.0	9.1	8.5	-0.3
$F_{tube}$ (bouchons)	0.1	0.7	1.0	2.6	12.9	2.3	-1.9	0.2	2.9

- Facteurs de compensation  $F_{comp}$

Les résultats de niveaux protégés obtenus par la méthode *F-MIRE* ne peuvent être directement comparés à des niveaux de type « réglementaire », niveaux généralement obtenus en champ libre (sans la présence du travailleur) ou par dosimétrie. De façon similaire, comme le démontre bien Voix[5], les résultats d'affaiblissement sonore ne peuvent se comparer directement aux valeurs d'affaiblissements obtenues par la méthode des seuils (*REAT*). Les principales causes de ces différences sont reliées à :

- la fonction de transfert de l'oreille externe, *TFOE* (*Transfer Function of the Outer Ear*), qui correspond à la différence entre le niveau de la pression acoustique au tympan et le niveau de la pression acoustique au centre de la tête en l'absence du travailleur;
- la correction entre la pression mesurée au bout du canal de mesure et la pression tympanique (comprend essentiellement la résonance du conduit auditif occlus);
- le bruit physiologique de masquage présent lors des mesures des seuils audiométriques de l'oreille occluse;

- la correction entre la pression acoustique en champ libre et la pression mesurée par le microphone de non-protégé (comprend essentiellement les termes de diffraction de la tête et du torse);

Pour les bouchons moulés utilisés pour les tests, des valeurs de facteurs de compensation inspirées des travaux de Voix[5] sont utilisées. Ces facteurs de compensation ont été obtenus de façon statistique à l'aide de mesures sur un groupe de sujets. Cette approche représente à l'heure actuelle, selon nous, la meilleure estimation des facteurs de compensation pour les bouchons utilisés dans l'étude.

En ce qui concerne les protecteurs de type « serre-tête », il n'existe pas encore à notre connaissance de travaux portant sur l'estimation des facteurs de compensation. Il devient alors nécessaire de faire une approximation quant à ces facteurs. Selon nous, l'approche la plus simple est d'utiliser la *TFOE* en champ diffus prise à l'entrée de l'oreille ouverte, telle que définie dans la norme ISO 11904-1[45] qui permet dans le cas présent, de passer de niveaux mesurés sous les coquilles à un équivalent champ libre. Cette approximation, bien que grossière, nous semble justifiée, puisque l'on mesure la pression avec le microphone interne dans la coquille et non directement au tympan.

Les valeurs du facteur de compensation utilisées pour corriger les résultats sont données au Tableau 4.

Tableau 4 : Facteurs de compensation  $F_{comp}$  (exprimés en dB) utilisés pour les coquilles et les bouchons moulés

Fréquence (Hz)	125	250	500	1000	2000	3150	4000	6300	8000
$F_{comp}$ (coquilles)	0.2	0.8	1.7	2.9	6.4	5.8	3.0	6.9	5.6
$F_{comp}$ (bouchons)	13.3	9.7	8.6	4.9	7.6	17.8	25.3	25.7	25.9

Tout comme le facteur de correction de tube, le facteur de compensation  $F_{comp}$  s'applique à tout indicateur impliquant le microphone protégé (niveaux protégés et affaiblissements sonores).

Les facteurs de correction de tube  $F_{tube}$  et de compensation  $F_{comp}$  s'additionnent et s'appliquent, schématiquement, de la façon suivante :

$$\begin{aligned}
 L_{int}^W(t, f) &= \tilde{L}_{int}^W(t, f) - (F_{tube}(f) + F_{comp}(f)) \\
 M_{H_n}(t, f) &= \tilde{M}_{H_n}(t, f) + (F_{tube}(f) + F_{comp}(f))
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

où  $\tilde{L}$  et  $\tilde{M}$  sont les valeurs mesurées avant l'application des facteurs de correction. On note à l'équation (11) que les facteurs de correction et de compensation se soustraient aux niveaux protégés, mais s'additionnent aux valeurs d'affaiblissement sonore. Pour le reste du rapport, tous les résultats présentés incluent les facteurs de correction de tube et de compensation.



## 7.5 Valeurs d'affaiblissement des manufacturiers (laboratoire)

Le calcul de l'indice d'affaiblissement  $SNR_{Ax}$  requiert la connaissance des valeurs d'affaiblissement moyen  $m(f)$  et des écarts-types associés  $s(f)$  fournies ou affichées par les manufacturiers. Dans le cas des serre-tête, les données affichées sur les sites Internet des manufacturiers sont utilisées (données obtenues selon la norme ANSI S3.19-1974[46]). Pour les bouchons moulés, des données individuelles pour chaque travailleur ont été fournies par Sonomax Hearing Healthcare Inc. avec la permission des travailleurs et entreprises impliqués. Pour cinq des travailleurs portant des bouchons, aucune donnée d'affaiblissement n'était disponible. Ainsi pour ces cinq travailleurs, tel que noté au Tableau B-1, des données pour un bouchon générique sont utilisées pour le calcul des valeurs de  $APV_x$  (et conséquemment de l'indice d'affaiblissement  $SNR_{Ax}$ ). Ces données, fournies aussi par Sonomax Hearing Healthcare Inc., sont des données d'atténuation obtenues en laboratoire selon la norme ANSI S3.19-1974[46] pour un bouchon moulé de type générique. Toutes ces données d'affaiblissement sont présentées au Tableau G-1. On note de grandes différences inter-individus dans les affaiblissements pour les travailleurs avec bouchons moulés. De même, des différences d'une oreille à l'autre pour un même individu sont observées, notamment pour le travailleur #3.



## 8. ANALYSE DES RÉSULTATS

### 8.1 Résultats des questionnaires

Tel que mentionné précédemment, un questionnaire fut administré à chaque travailleur à la fin de chaque journée de mesures. Les principaux points qui ressortent de l'analyse des résultats des questionnaires sont :

1. Tous les sujets testés sont des habitués de la protection auditive. Il s'agit selon nous d'un certain biais de la présente étude puisque tous les sujets, bien que participant de façon volontaire, ont été choisis, soit par les responsables SST de leur usine ou par leur patron. Nous jugeons donc que les travailleurs testés ne sont pas entièrement représentatifs de l'ensemble des travailleurs, pour ce qui concerne la protection auditive
2. Les travailleurs qui n'ont pas aimé leur journée de mesures ne sont pas des utilisateurs fréquents du protecteur **mesuré** (particulièrement les bouchons moulés - N=3)
3. La très grande majorité des travailleurs testés a trouvé le système de mesures léger, confortable et ne dérangeant pas leur(s) tâche(s) de travail. La majorité nous mentionne avoir « oublié » le système après un certain temps. Seuls certains travailleurs (N=3), qui devaient faire du travail à l'extérieur, ont exprimé avoir ressenti quelquefois un peu de gêne car le système était installé sous un manteau d'hiver, ce qui pouvait engendrer une certaine tension dans les fils des microphones. Un autre travailleur a mentionné que certaines de ses tâches demandaient beaucoup de flexibilité et qu'il s'est accroché dans les appareils de mesures à quelques reprises. Celui-ci spécifie, par contre, qu'avec une journée d'entraînement de plus, il pourrait éviter ces accrocs.

Ces résultats nous suggèrent que le système de mesures développé n'engendre pas d'inconforts et de gênes et n'empêche pas les travailleurs d'effectuer leur tâche régulière. De plus, ils nous indiquent que les travailleurs testés sont tous des utilisateurs réguliers de protecteurs et familiers avec la protection auditive.

### 8.2 Niveaux d'exposition et balance spectrale

Cette section traite des indicateurs portant sur la caractérisation du champ sonore dans lequel les travailleurs évoluent soit : les niveaux d'exposition des travailleurs (niveaux non protégés ou extérieurs) et la balance spectrale. Une approche possible pour examiner les résultats est de tracer ces indicateurs en fonction du temps. Afin d'illustrer la variété des niveaux d'exposition obtenus, la Figure 13 montre trois exemples de niveaux globaux non protégés (exprimés en dB(A)) et de balance spectrale en fonction du temps pour trois travailleurs dans trois usines différentes. Un pas d'observation d'une (1) minute est utilisé pour les trois cas. En (a), on présente un travailleur qui avait à se promener régulièrement d'un endroit à l'autre, souvent à l'extérieur. Les niveaux d'exposition sont essentiellement les mêmes aux deux oreilles et fluctuent beaucoup dans le temps. Des niveaux pouvant aller jusqu'à 110 dB(A) sont observés. La balance spectrale se maintient généralement entre 1 et 3 dB dans les zones où les niveaux de bruit sont importants, balances typique de spectre à large bande. Dans le cas du travailleur en (b), les niveaux sont généralement plus importants et fluctuent beaucoup moins pour se situer la

plupart du temps entre 93 et 98 dB(A). Peu de différences sont observées entre les deux oreilles et la balance spectrale est assez constante (autour de 0 dB), ce qui peut laisser supposer que le travailleur se trouvait la plupart du temps dans un champ sonore assez constant et homogène. Sur la figure (b), on observe bien les deux périodes de pause (à environ 9:30 et 14:30) ainsi que la pause du midi (à environ 12:00). La figure (c) donne plutôt un exemple d'un travailleur soumis de façon régulière à des niveaux importants, pouvant dépasser les 100 dB(A), séparés dans le temps par des zones « moins bruyantes ».

L'Annexe H présente un portrait d'ensemble des résultats de niveaux non protégés et de balances spectrales pour tous les travailleurs et toutes les usines. Les résultats sont présentés sous forme d'histogramme pour lesquels on retrouve, en abscisse, le pourcentage de temps passé et en ordonnée le niveau extérieur (figures de gauche) et la balance spectrale (figures de droite). Pour chaque figure, chaque ligne correspond à un travailleur.

Les résultats de l'Annexe H permettent de constater que les niveaux d'exposition peuvent différer sensiblement d'une usine à l'autre, ce qui est peu surprenant, mais aussi à l'intérieur d'une même usine (voir par exemple l'usine 4 ou encore les travailleurs #10 et #12 à l'usine #5). Pour la plupart des travailleurs, il semble y avoir une certaine symétrie entre les deux oreilles (exposition semblable des deux côtés). Cependant, certains travailleurs ont des expositions différentes aux deux oreilles, du moins pour certaines périodes de temps durant leur quart de travail. Par exemple, une nette différence est observée entre l'oreille gauche et droite pour le travailleur #8 (usine #4), l'oreille droite étant plus longtemps exposée à des niveaux autour de 92 dB(A) et l'oreille gauche, à des niveaux autour de 88 dB(A). La Figure 14 illustre bien ce phénomène. On y voit effectivement que, pour la majorité de la matinée (entre 7:30 et 12:00) l'exposition de l'oreille droite est beaucoup plus importante que celle de gauche, ce qui laisse supposer que le travailleur était à un poste de travail pour lequel il y avait une source de bruit directionnelle. Dans l'après-midi, il semble que le travailleur change de poste de travail<sup>10</sup>, les niveaux devenant similaires aux deux oreilles.

---

<sup>10</sup> Il aurait été intéressant de pouvoir suivre les travailleurs toute la journée afin de faire des observations quant au travail effectué. Pour des raisons logistiques évidentes, de même que pour entraver le moins possible leur routine de travail habituelle, nous avons choisi de ne pas faire de suivi des travailleurs, que ce soit par observations ou encore par tout autre moyen (e.g. séquence vidéo).

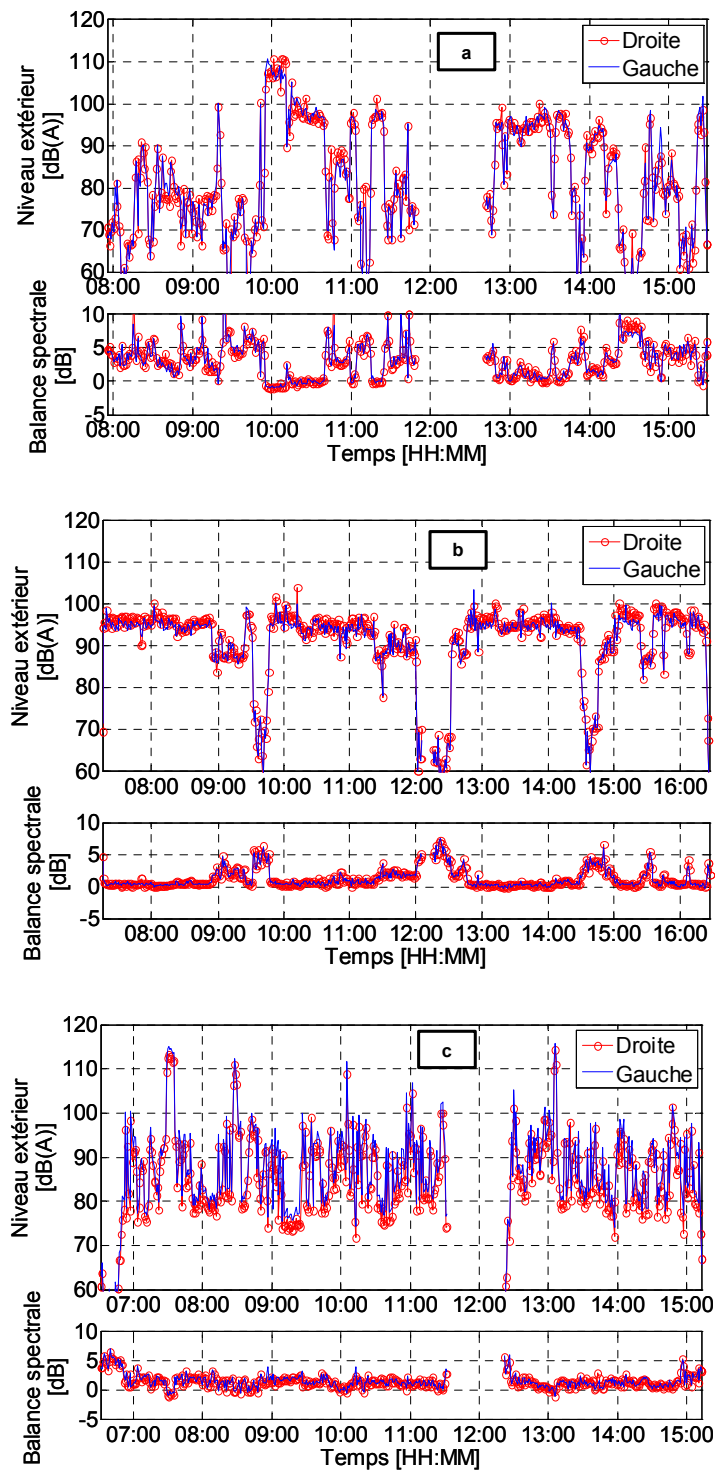


Figure 13 : Exemples de niveaux extérieurs et balance spectrale pour 3 travailleurs dans 3 usines différentes : (a) Usine #2; (b) Usine #6; (c) Usine #7

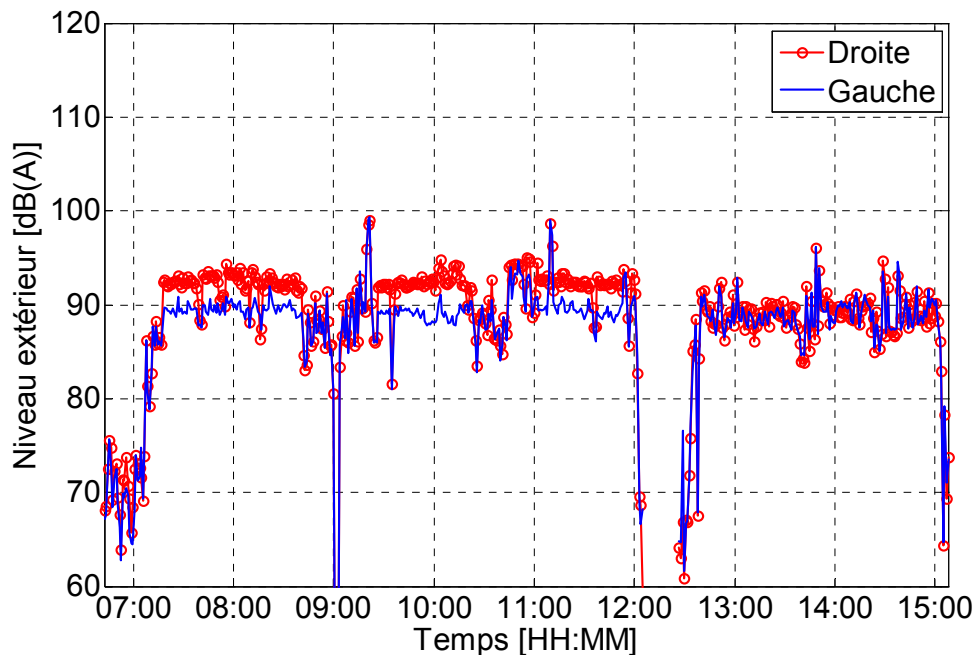


Figure 14 : Niveaux non protégés en fonction du temps pour le travailleur #8 (usine #4)

### 8.3 Indices d'affaiblissement

Cette section présente les résultats d'indices d'affaiblissement en fonction du temps. Compte tenu de la quantité de données disponibles, seuls les résultats jugés les plus intéressants sont montrés. Sur chaque figure choisie, on présente les niveaux extérieurs (non protégés), la balance spectrale (indicateur du contenu fréquentiel) et les indices d'affaiblissement  $IA_{H_3}$ ,  $SNR_{A20}$  et  $SNR_{A80}$ , en fonction du temps pour les deux oreilles<sup>11</sup>.

#### 8.3.1 Usines #6 et #7- Serre-tête Peltor H7A

Dans cette sous-section sont présentés les résultats pour deux usines (#6 et #7) où les mêmes types de serre-tête sont utilisés soit les Peltor H7A. Les Figure 15, Figure 16 et Figure 17 montrent les résultats obtenus pour les trois travailleurs de l'usine 6 (serre-tête Peltor H7A) pour un pas temporel de 1 minute. On y voit clairement par exemple, sur la Figure 15, quand le travailleur prend ses pauses du matin (à ~9:30), midi (à ~12:00) et après-midi (à ~14:30). On peut aussi facilement détecter quand un travailleur sort des zones de bruit important (voir travailleur #2 un peu passé 8:30). En usine, les trois travailleurs sont soumis presque toute la journée à des niveaux importants variant entre 90 et 100 dB(A) dépassant souvent les 95 dB(A). Les balances spectrales sont semblables pour les trois travailleurs avec des valeurs oscillant généralement entre 0 et 1 dB.

<sup>11</sup> Par définition, le  $SNR_{A20}$  est toujours plus élevé que le  $SNR_{A80}$  puisqu'il donne une indication de l'affaiblissement auquel peuvent s'attendre 20% des travailleurs (contrairement à 80% des travailleurs pour le  $NRS_{A80}$ ).

Pour les trois travailleurs de l'usine #6, quelques constats peuvent être faits sur les résultats obtenus :

- Des indices d'affaiblissement  $IA_{H_3}$  supérieurs sont obtenus pour le travailleur #1, valeurs qui dépassent même les valeurs « labo » de  $SNR_{A20}$  et  $SNR_{A80}$ . Pour les travailleurs #2 et #3 les valeurs de  $IA_{H_3}$  se retrouvent sous ou près des valeurs de  $NRS_{A80}$ .
- Bien que les valeurs de  $IA_{H_3}$  soient relativement stables pour les trois travailleurs, on observe tout de même d'appréciables variations dans le temps de l'affaiblissement. De plus, des variations importantes, plus localisées dans le temps (voir par exemple le travailleur #1 entre 8:00 et 8:15), sont aussi observées.
- Des différences sont observées entre l'oreille gauche et l'oreille droite pour les trois travailleurs.
- L'indice  $IA_{H_3}$  diminue généralement quand on augmente la balance spectrale. Ce résultat n'est pas surprenant car une augmentation de la balance spectrale est généralement synonyme d'une augmentation du contenu basse fréquence dans le bruit, domaine fréquentiel où les protecteurs sont communément moins efficaces. Ces variations de l'affaiblissement en fonction de la balance spectrale sont aussi observées sur les valeurs prédites de  $SNR_{A20}$  et  $SNR_{A80}$  mais avec une moindre importance. Afin d'illustrer le phénomène, les résultats obtenus pour le travailleur #3, limité à la portion de 10:00 à 12:00, sont présentés à la Figure 18. Tel qu'illustré par les droites de tendance superposées aux résultats, on observe clairement une diminution de l'indice d'affaiblissement aux deux oreilles, lorsque la balance spectrale augmente. Des diminutions de l'ordre de 5 dB sont obtenues en moyenne pour l'indice d'affaiblissement pour une balance spectrale passant d'environ 0 dB à 2 dB. Même plus localement dans le temps, les variations de l'indice d'affaiblissement suivent les variations de la balance spectrale.

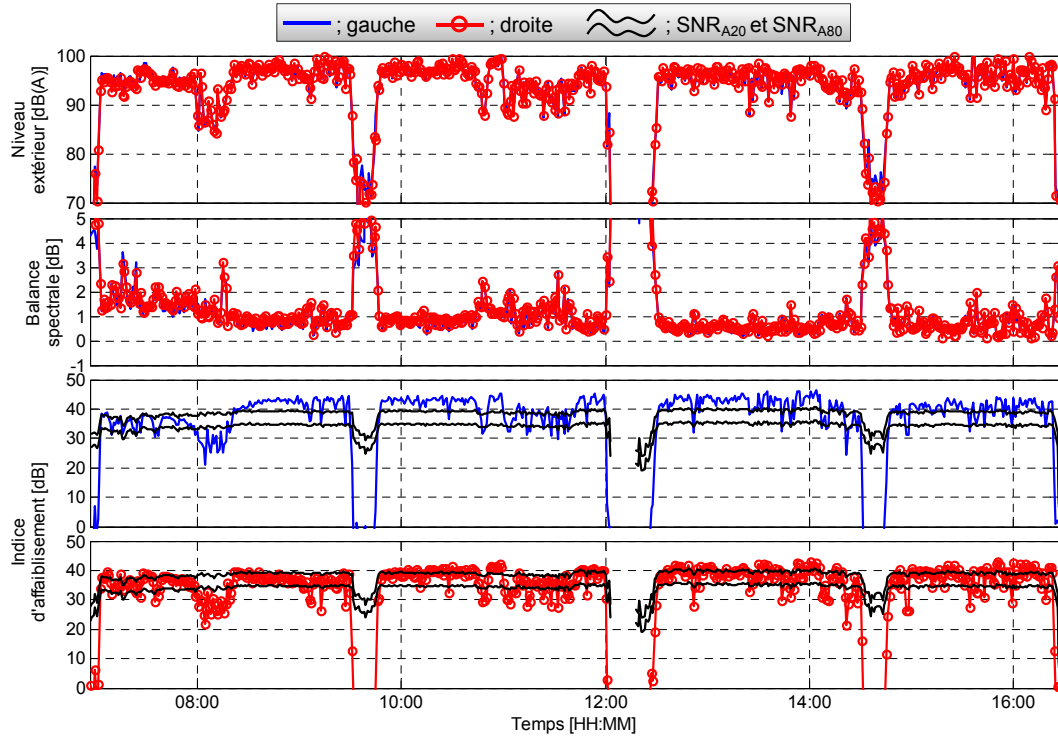


Figure 15 : Indice d'affaiblissement en fonction du temps : travailleur #13 (usine #6)

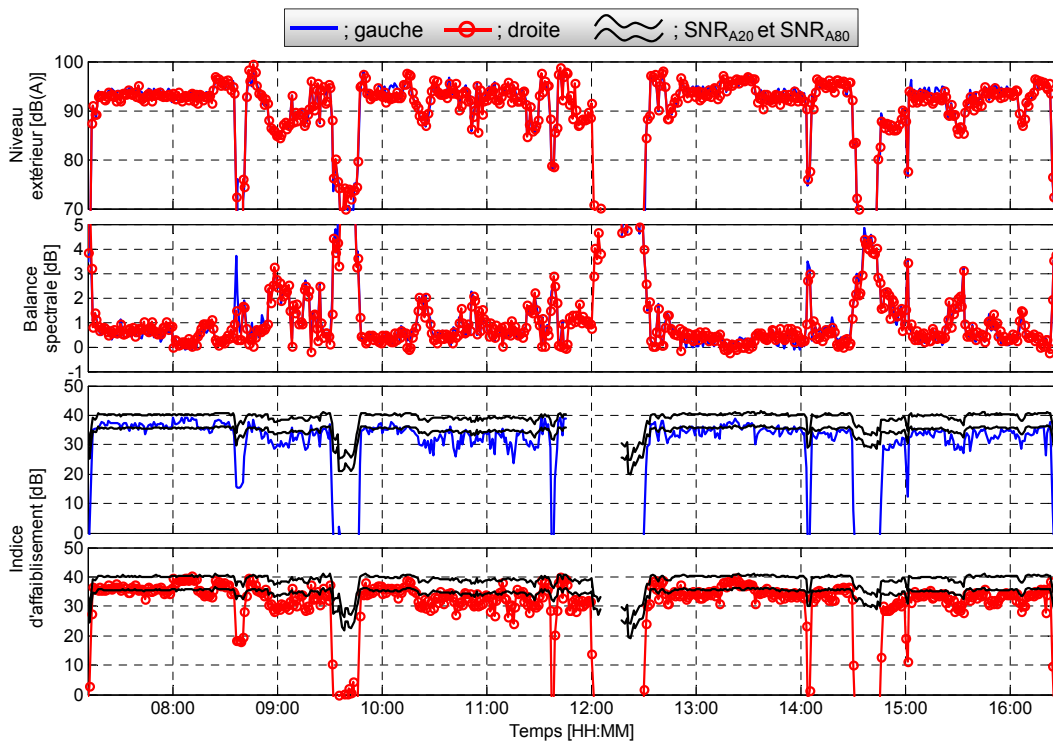


Figure 16 : Indice d'affaiblissement en fonction du temps : travailleur #14 (usine #6)



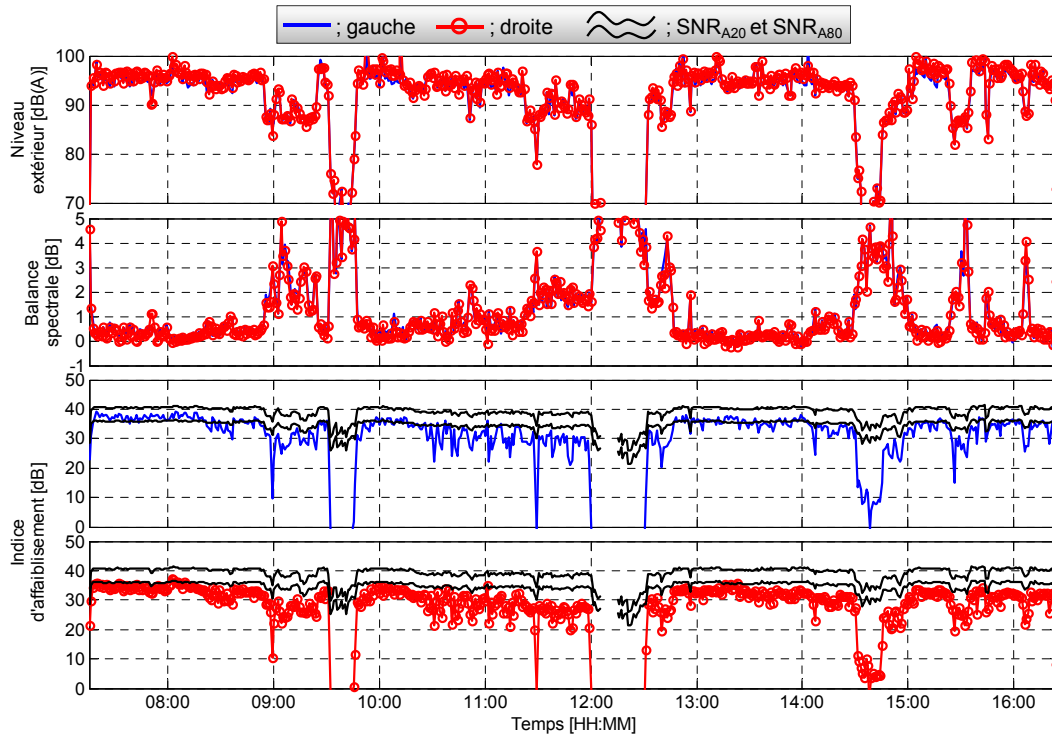


Figure 17 : Indice d'affaiblissement en fonction du temps : travailleur #15 (usine #6)

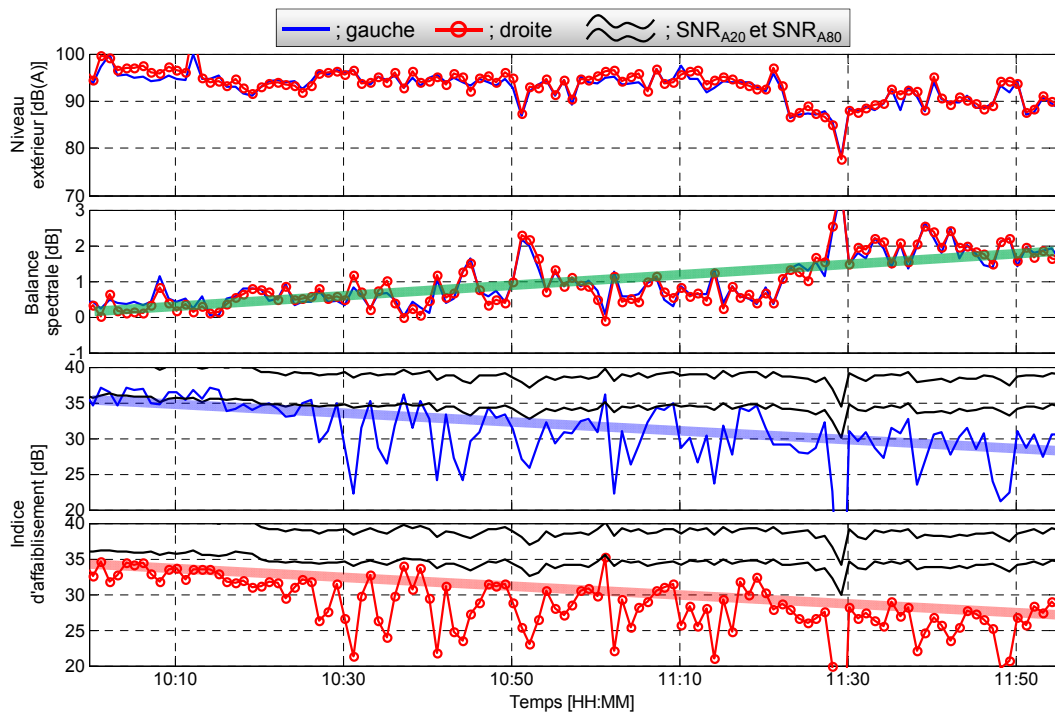


Figure 18 : Portion allant de 10:00 à 12:00 pour le travailleur #15 (usine #6). Des droites illustrant les tendances ont été ajoutées.

Dans la même optique que pour l'usine #6, la Figure 19 présente les résultats (encore une fois à chaque minute) pour le travailleur #2 de l'usine #7. Les travailleurs de cette usine portaient aussi des serre-tête Peltor H7A. Cette fois, par contre, le bruit en usine est très variable, les niveaux variant significativement entre 75 et plus de 100 dB(A). Contrairement à l'usine #6, les valeurs de  $IA_{H_3}$  obtenues, différentes pour les deux oreilles, sont généralement en dessous des valeurs de  $SNR_A$ . De plus, on observe de nombreuses petites plages de temps où l'indice d'affaiblissement chute de façon significative. Après écoute des signaux sonores, on se rend compte que ces plages correspondent majoritairement à des périodes où le travailleur enlève ses protecteurs pour parler à un collègue. L'indice d'affaiblissement chute alors et il devient aussi difficile de savoir si les niveaux extérieurs sont produits par le bruit ambiant dans l'usine ou par la voix des travailleurs se parlant. Des travaux sont en cours afin de développer des procédures pour détecter automatiquement tout événement particulier (parole, temps de non-port, toussotements, bâillements, etc.) pouvant avoir une influence sur l'affaiblissement. Ces travaux devraient notamment permettre de mieux comprendre comment sont portés les protecteurs et comment mieux analyser et interpréter les résultats.

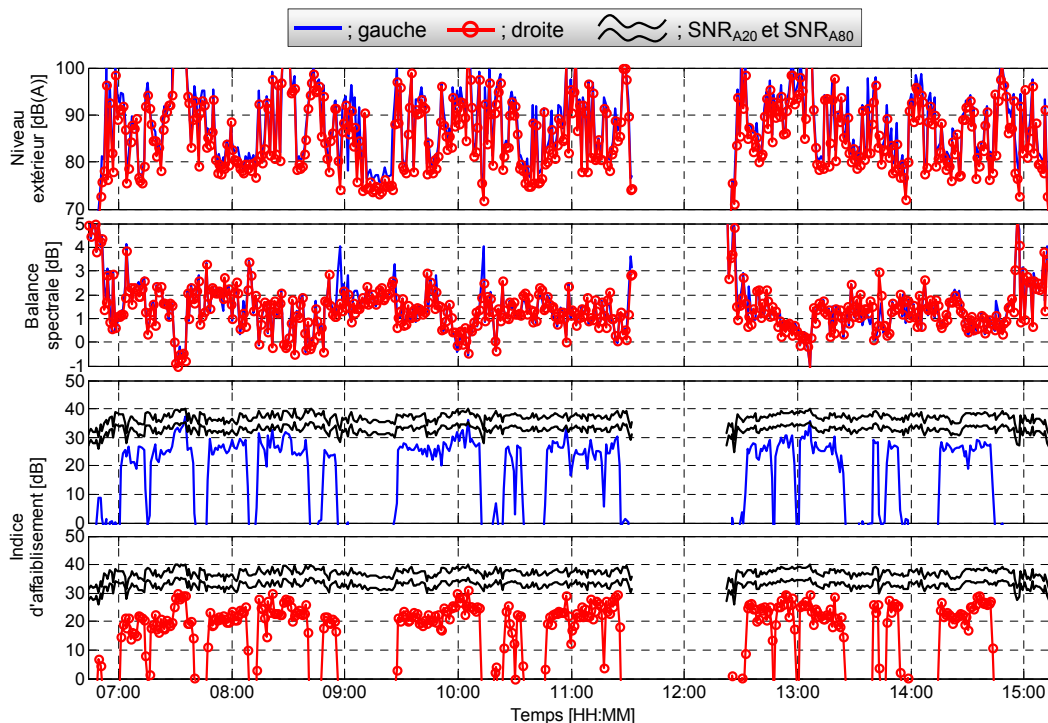


Figure 19 : Indice d'affaiblissement en fonction du temps : travailleur #17 (usine #7)

### 8.3.2 Niveaux d'exposition moins élevés – Usines #2 et #3

Dans cette sous-section, sont présentés des résultats pour les usines #2 et #3, usines pour lesquelles les niveaux d'exposition sont généralement les moins élevés. Les Figure 20 et Figure 21 montrent les résultats obtenus pour les deux travailleurs de l'usine 3 (serre-tête Otis Mustang) pour un pas temporel de 1 minute. Ces deux cas sont caractérisés par des niveaux ambiants situés principalement entre 80 et 90 dB(A). Il est à noter que le temps de mesures fut limité à ~3:30 heures pour les deux travailleurs. Une pause a été prise par les deux travailleurs (l'un vers 9:40 et

l'autre vers 10:00). Pour les deux travailleurs, les valeurs de l'indice  $IA_{H_3}$  obtenues sont généralement soit autour ou sous les valeurs de  $SNR_{A80}$ . Tout comme pour les résultats présentés précédemment, les indices d'affaiblissement fluctuent sensiblement avec la balance spectrale, les valeurs les plus élevées (et les plus stables) se trouvant pour les périodes pour lesquelles la balance spectrale est négative (ce qui est particulièrement plus en évidence pour le travailleur #2 à la Figure 21). Les résultats pour ces deux travailleurs semblent indiquer, sans surprise, que les valeurs d'affaiblissement dépendent plus du contenu fréquentiel du bruit ambiant que de son niveau.

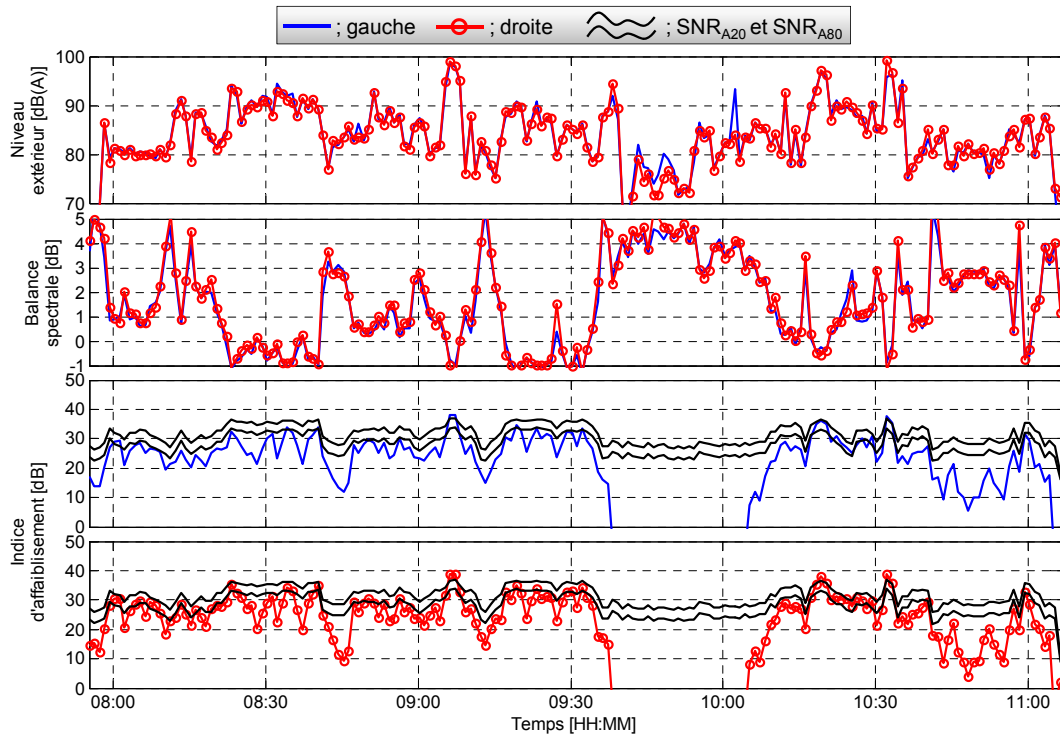


Figure 20 : Indice d'affaiblissement en fonction du temps : travailleur #5 (usine #3)

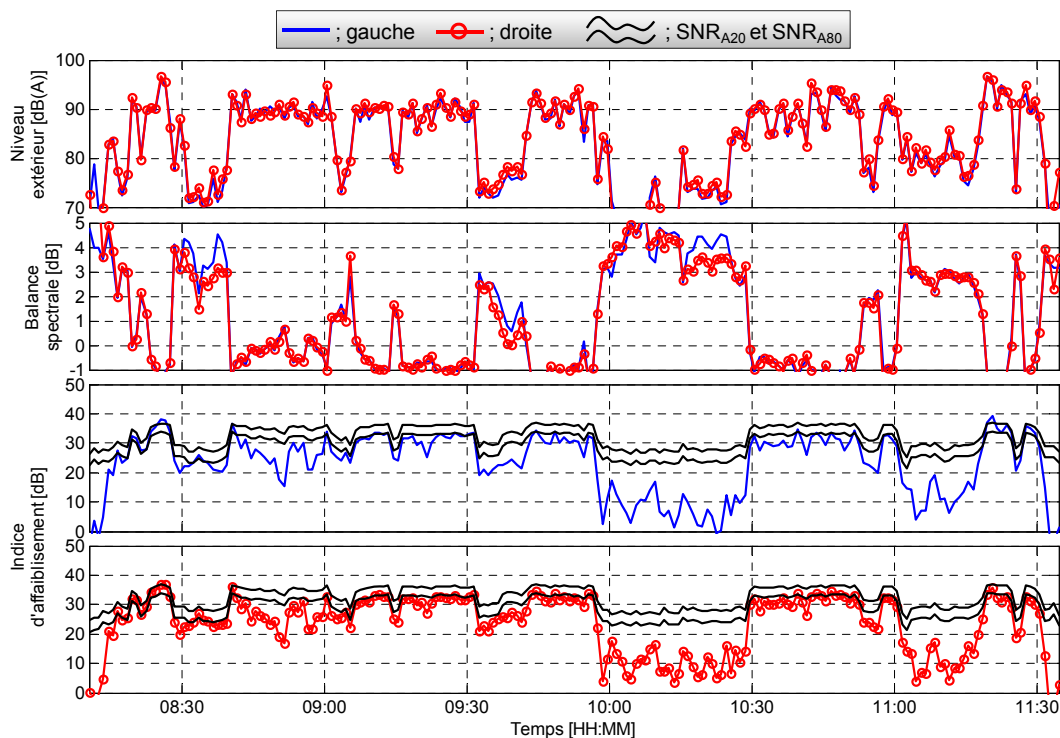


Figure 21 : Indice d'affaiblissement en fonction du temps : travailleur #6 (usine #3)

La Figure 22 (travailleur #2 de l'usine #2, pas temporel de 1 minute) présente un cas similaire à l'usine #3 où les niveaux d'exposition fluctuent beaucoup et sont parfois peu élevés. Dans ce cas, le travailleur porte des bouchons moulés. Dans cet environnement, le travailleur se déplaçait beaucoup, souvent à l'extérieur d'où la grande variation des niveaux de bruit ambiants. Il apparaît tout de suite que l'oreille droite est peu, ou pas du tout, protégée et ce, pendant toute la journée. On ne peut que supposer que le bouchon est mal inséré pour cette oreille. Pour l'oreille gauche, on observe des indices d'affaiblissement plus importants, indices qui fluctuent aussi de façon importante en fonction de la balance spectrale. Encore une fois, les valeurs maximales atteintes sont généralement trouvées pour des valeurs de balances spectrales plus faibles que 1 dB. Les valeurs d'affaiblissement sont cependant en tout temps sous les valeurs de  $SNR_{A80}$ .

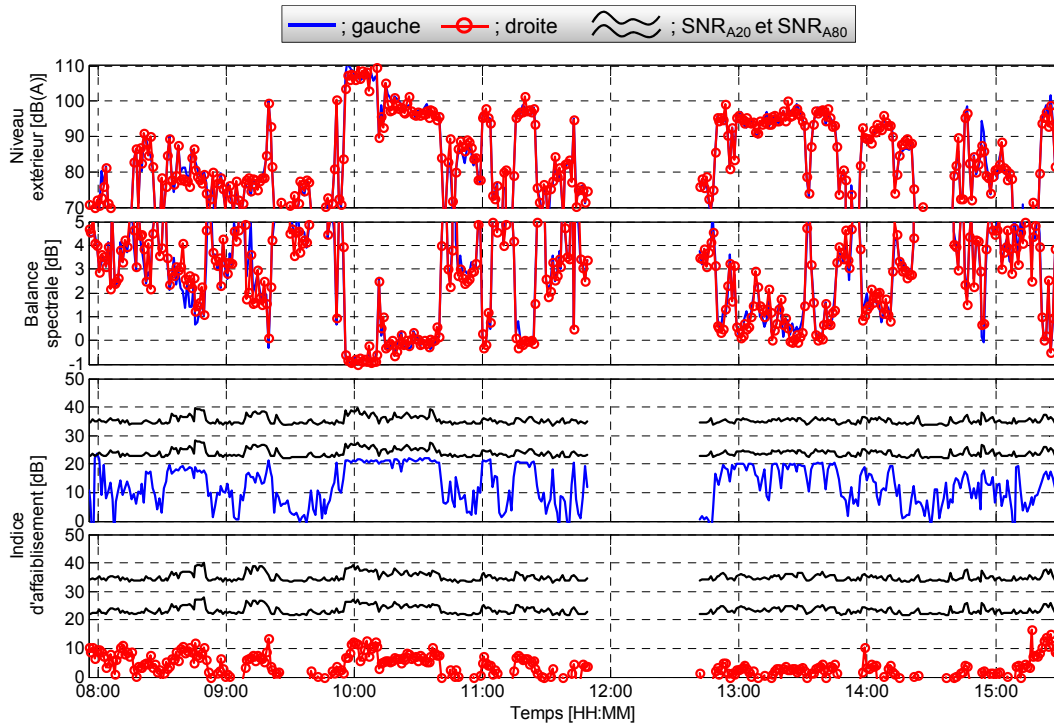


Figure 22 : Indice d'affaiblissement en fonction du temps : travailleur #4 (usine #2)

### 8.3.3 Usines #4 et #5 – Bouchons moulés

Cette sous-section présente des résultats typiques obtenus dans les usines #4 et #5, usines pour lesquelles les travailleurs portent des bouchons moulés et sont soumis à des niveaux de bruit assez importants. La Figure 23 présente les résultats de l'indice d'affaiblissement pour le travailleur #2 de l'usine #4 (pas temporel de 1 minute). Les constats suivants peuvent être faits :

- Les niveaux de bruit extérieurs sont généralement au dessus de 90 dB(A). Pour une bonne portion de la matinée (de 7:00 à 12:00), l'oreille droite est soumise à des niveaux plus élevés que l'oreille gauche. Parallèlement, durant cette même période, la balance spectrale à l'oreille droite est plus faible qu'à gauche. Ces résultats laissent penser que le travailleur œuvrait près d'une machine ou source de bruit montrant un caractère directionnel. Pour la partie enregistrée en après-midi, les niveaux et la balance spectrale aux deux oreilles sont semblables ce qui laisse croire que le travailleur travaillait à un autre endroit (ou que la source de bruit était différente).
- Les valeurs de balance spectrale sont plus élevées en après-midi (autour de 1 dB) qu'en matinée (entre -1 et 0 dB).
- Des différences significatives sont observées entre les deux oreilles pour les indices d'affaiblissement  $IA_{H_3}$ . Pour l'oreille gauche, bien que des valeurs légèrement sous les valeurs de  $SNR_{A80}$  soient obtenues, des tendances très semblables sont observées pour le  $SNR_A$  et le  $IA_{H_3}$ . Pour l'oreille droite, de faibles valeurs d'indice d'affaiblissement sont

obtenues le matin pour augmenter presque du double en après-midi, ce qui suggère fortement une mauvaise insertion du bouchon, du moins en matinée. Tant pour l'oreille gauche que la droite, les indices d'affaiblissement obtenus semblent légèrement supérieurs au début de la période de port qu'à la fin et ce, tant en matinée qu'en après-midi.

- Tout comme pour les cas présentés auparavant, les indices d'affaiblissement fluctuent avec la balance spectrale. Dans le cas de ce travailleur, les fluctuations de l'indice sont tout de même plus faibles que celles observées précédemment pour d'autres travailleurs.

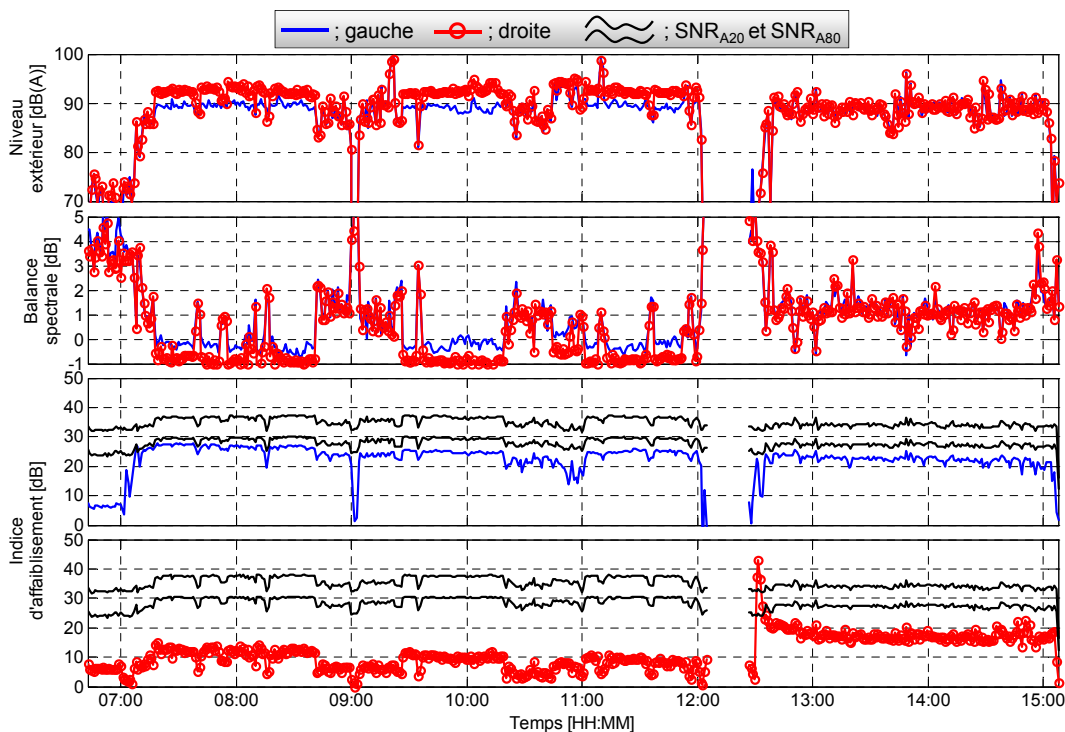


Figure 23 : Indice d'affaiblissement en fonction du temps : travailleur #8 (usine #4)

La Figure 24 présente les résultats d'affaiblissement pour un autre travailleur portant des bouchons moulés, soit le travailleur #3 de l'usine #5 (pas temporel de 1 minute). Trois périodes de « pause » sont constatées : vers 10:00, 12:00 et 14:00. Il est intéressant de noter que, pour ce travailleur, de bonnes valeurs d'affaiblissement sont obtenues même si la balance spectrale est relativement élevée (régulièrement supérieure à 2 dB). Des fluctuations importantes de l'indice en fonction du temps sont toutefois observées mais aussi des fluctuations importantes des niveaux de bruit ambiant et de la balance spectrale. Certains creux sont observés dans l'indice d'affaiblissement (par exemple autour de 8:30 et autour de 11:25), sans qu'on puisse fournir d'explications simples. Il serait alors intéressant d'écouter les signaux temporels, afin d'évaluer si une situation spécifique se produit. Une procédure automatisée de détection de telles anomalies pourrait permettre de mieux comprendre ce qui se passe et de mieux analyser et interpréter les résultats. Des travaux sont présentement en cours afin d'évaluer différentes procédures de détection (détection de la parole, chute de l'affaiblissement, bruits internes, etc.).



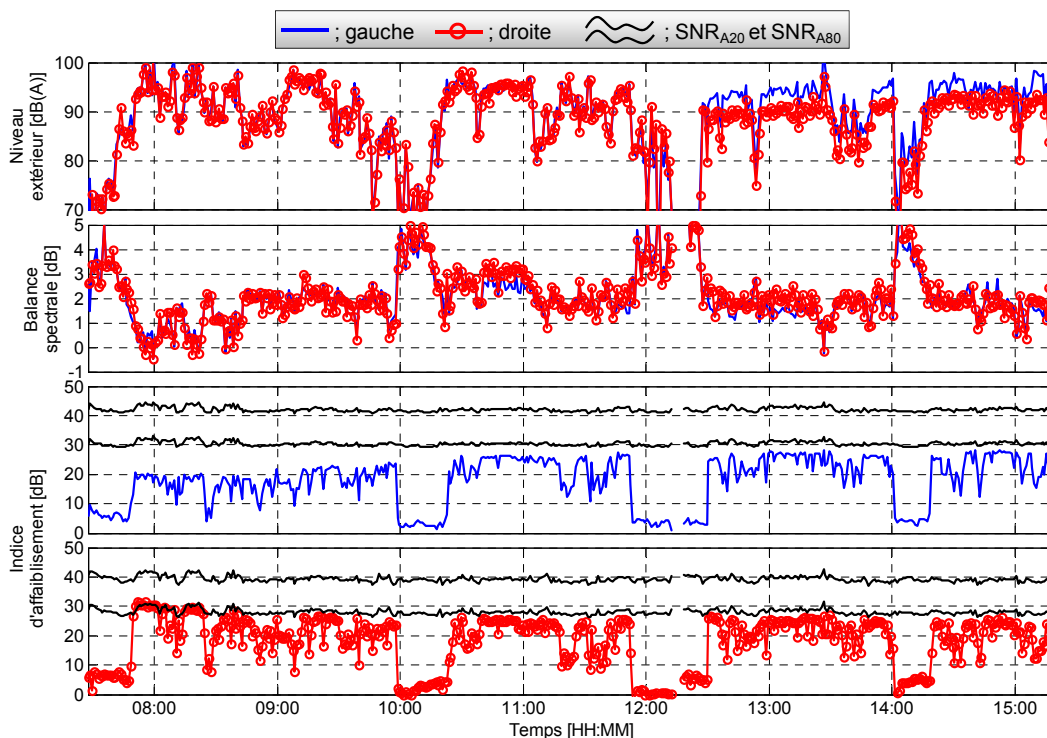


Figure 24 : Indice d'affaiblissement en fonction du temps : travailleur #12 (usine #5)

### 8.3.4 Usine #8 – Niveaux de bruit très élevés

Cette sous-section présente des résultats pour l'usine #8. Cette usine possède la particularité de présenter des niveaux de bruit ambiants très importants. Les résultats sous forme d'histogrammes présentés à l'Annexe H montrent des niveaux globaux de bruit ambiant situés principalement entre 110 et 115 dB(A). Règle générale, les travailleurs de cette usine portent la double protection (bouchons moulés + coquilles). Par contre, les bouchons moulés utilisés, d'un autre type que ceux proposés par Sonomax, ne pouvaient pas être équipés de l'instrumentation développée dans ce projet. Ainsi, pour les besoins de l'étude, seuls des essais sur des coquilles ont été réalisés sur des périodes d'environ 30 minutes par travailleur. Contrairement aux autres usines, l'équipe de recherche était presque en tout temps présente durant les mesures et a pu prendre en note certains faits et gestes des travailleurs.

Les Figure 25 et Figure 26 illustrent les résultats d'indice d'affaiblissement obtenus pour les travailleurs #19 et #20. Puisque la période de mesure n'est que d'une trentaine de minutes, les résultats sont présentés avec un pas temporel de 5 secondes. On constate premièrement que des indices d'affaiblissement « terrain » comparables à ceux dits « labo » sont généralement obtenus (le travailleur #19 ayant des indices un peu plus faibles). Conformément aux notes prises par l'équipe, on remarque aussi que le travailleur #19 est sorti de la zone de bruit important pour environ une minute (vers 19:43). Une consigne d'enlever les lunettes de protection a été donnée aux deux travailleurs à peu près au même moment (19:47:28 pour le travailleur #19 et 19:47:58 pour le travailleur #20). Il est intéressant de noter que l'effet des lunettes de protection apparaît clairement pour le travailleur #19. Dans son cas, des augmentations de l'indice d'affaiblissement de plus de 5 dB à l'oreille gauche et d'environ 3 dB à droite sont observées dès le moment où les

lunettes sont enlevées. De plus, on observe de plus grandes fluctuations dans le temps lorsque les lunettes sont portées. Pour le travailleur #20, les indices d'affaiblissement obtenus sont plus élevés que pour son collègue et on n'observe pas d'effet dû aux lunettes dans son cas. Il est intéressant de noter que les deux travailleurs portaient des protecteurs neufs, des lunettes de types et marques différents et, de façon anecdotique, que le travailleur #20 avait le crâne rasé.

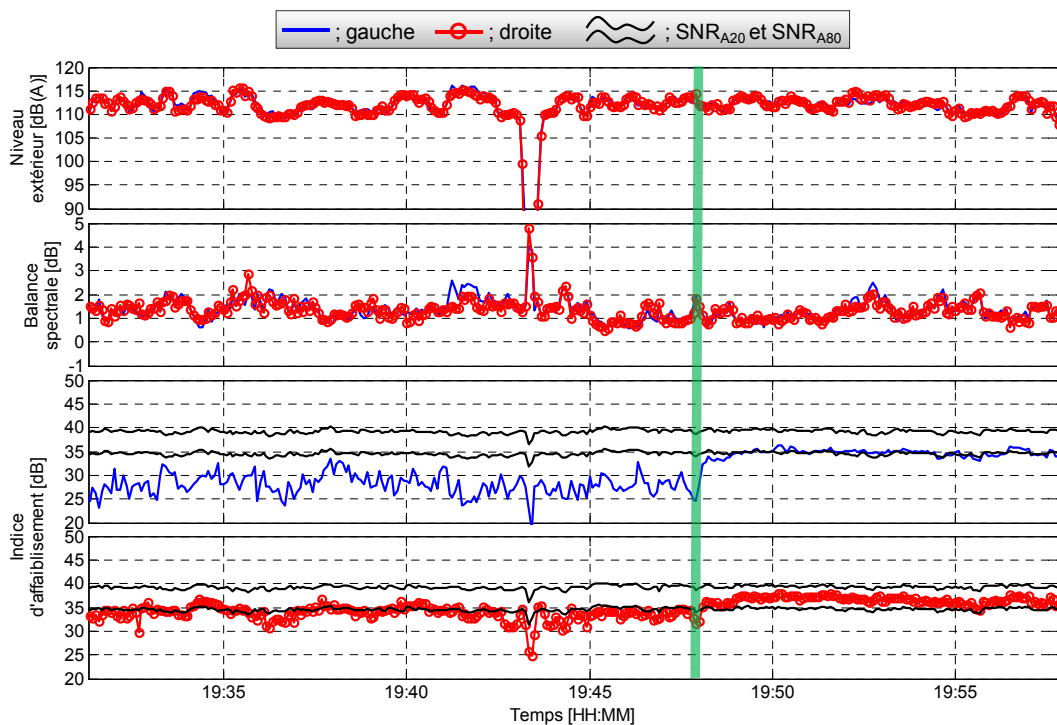


Figure 25 : Indice d'affaiblissement en fonction du temps : travailleur #19 (usine #8). La ligne verticale indique quand il a été demandé au travailleur d'enlever ses lunettes de protection.



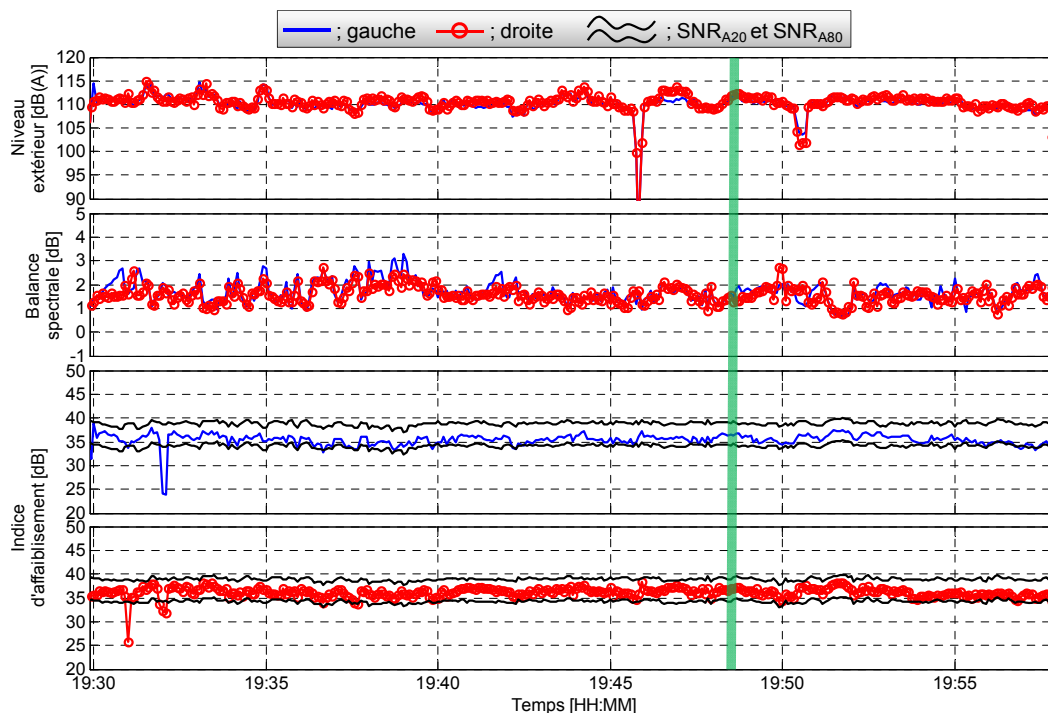


Figure 26 : Indice d'affaiblissement en fonction du temps : travailleur #20 (usine #8). La ligne verticale indique quand il a été demandé au travailleur d'enlever ses lunettes de protection.

Les Figure 27, Figure 28, Figure 29 montrent les résultats obtenus pour le même travailleur (#23) portant la même paire de coquilles installée de trois façons différentes : avec arceau et montée sur deux casques de sécurité différents (casque I et casque II). La photo à la Figure 10 montre un exemple de coquilles installées sur un casque de sécurité. Tout comme pour les deux travailleurs présentés juste auparavant, la consigne d'enlever les lunettes de protection avait été donnée dans le cas des coquilles montées sur arceau (Figure 27), ce qui apparaît clairement sur l'indice d'affaiblissement autour de 20:17. Dans ce cas, les valeurs de l'indice d'affaiblissement sont différentes entre l'oreille gauche et la droite avec les lunettes pour ensuite devenir semblables et plus élevées (un peu plus bas que le  $SNR_{A80}$ ) une fois les lunettes enlevées. Pour les coquilles montées sur casque, les valeurs de l'indice d'affaiblissement chutent par rapport aux serre-tête, tel que prédit par les valeurs de  $SNR_A$ . Toutefois, des différences appréciables sont observées entre les deux casques. Des valeurs d'indice d'affaiblissement beaucoup plus faibles et montrant plus de variations dans le temps sont mesurées pour le casque I par rapport au casque II, où des valeurs assez stables concordant bien avec les valeurs de  $SNR_A$  sont observées. Malheureusement, il nous a été impossible d'inspecter plus en détails les casques, de même que de garder ceux-ci pour faire des mesures supplémentaires.

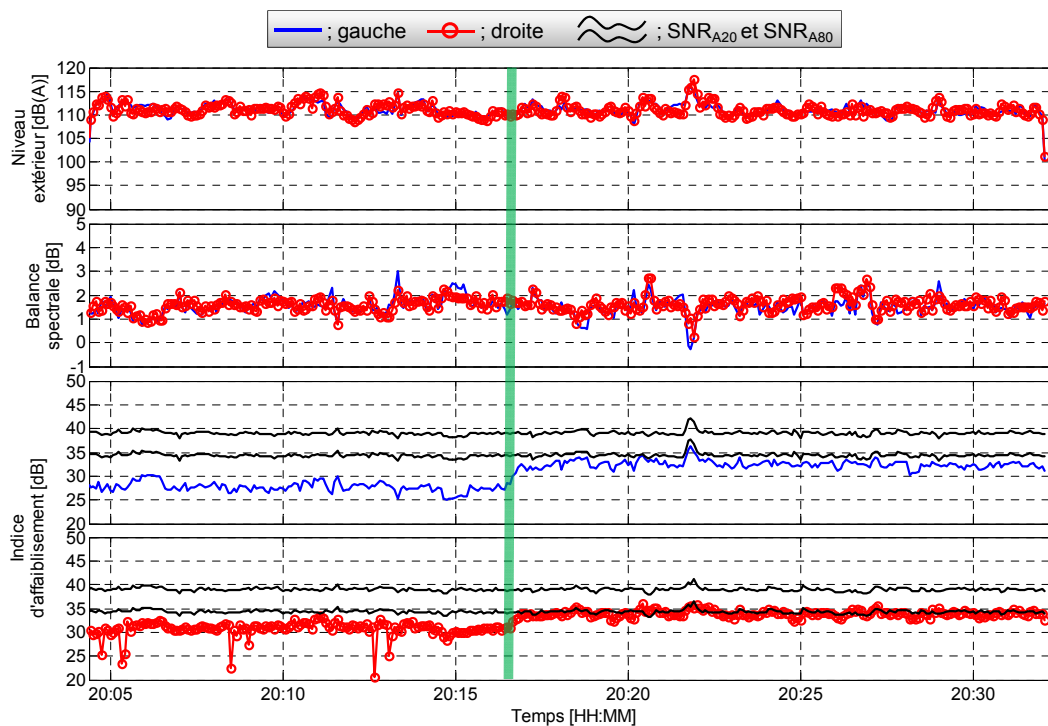


Figure 27 : Indice d'affaiblissement en fonction du temps : travailleur #23 avec serre-tête

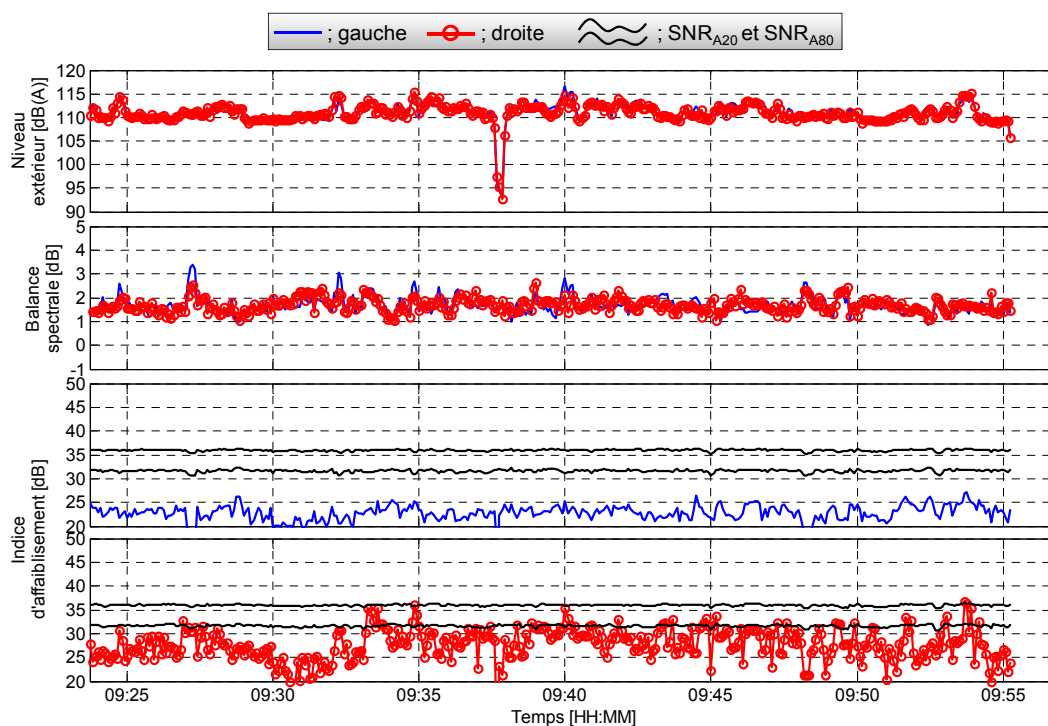


Figure 28 : Indice d'affaiblissement en fonction du temps : travailleur #23 avec casque I

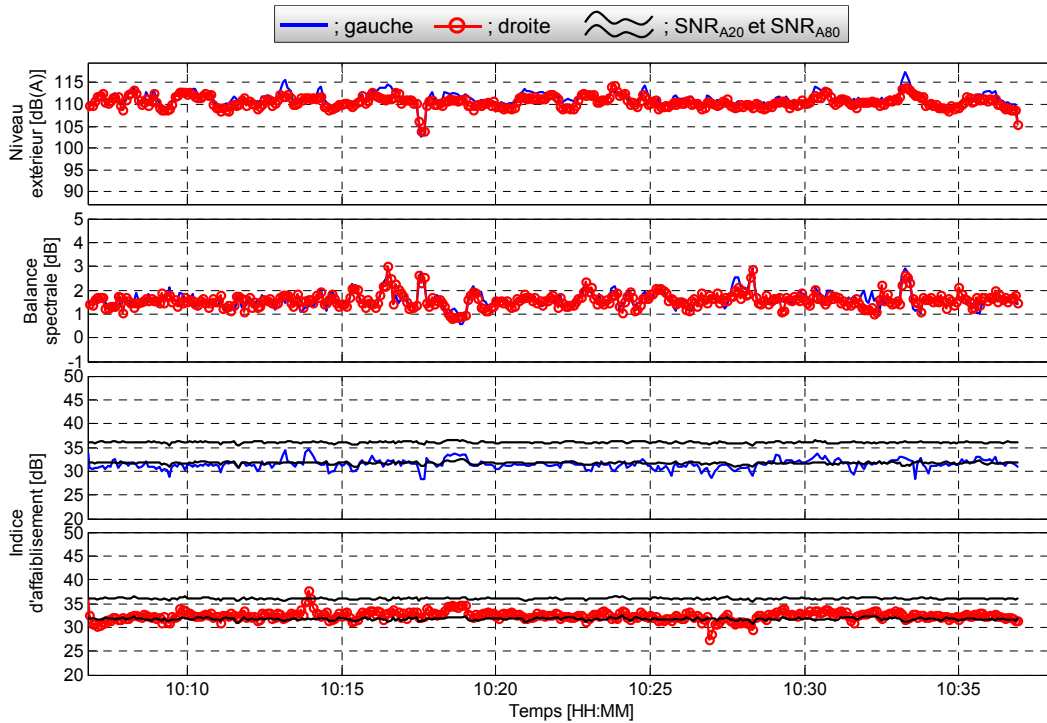


Figure 29 : Indice d'affaiblissement en fonction du temps : travailleur #23 avec casque II

### 8.4 Valeurs d'affaiblissement en fonction de la fréquence

Les résultats de la section précédente permettent de dresser un portrait de l'évolution temporelle de l'affaiblissement apportée par les protecteurs, mais donnent peu d'indication sur le comportement fréquentiel des protecteurs étudiés (si ce n'est que par l'intermédiaire de la balance spectrale). Dans la même optique que pour le calcul des indices globaux d'affaiblissement  $IA_{H_3}$ ,  $SNR_{A80}$  et  $SNR_{A20}$ , on propose ici de comparer les valeurs mesurées de  $M_{H_3}$  aux valeurs de  $APV_{20}$  et  $APV_{80}$ . Les valeurs de  $IA_{H_3}$  dépendant à la fois du temps et de la fréquence, tandis que les valeurs de  $APV_x$ , calculées à partir des données de laboratoire, ne dépendent que de la fréquence. L'intérêt de comparer les valeurs de  $M_{H_3}$  aux valeurs de  $APV_x$  réside dans le fait que ces types de données sont tous deux, de façon similaire, soustraits des niveaux non protégés pondérés A<sup>12</sup> tel qu'illustré à la Figure 11.

L'approche suivante est proposée afin d'évaluer le comportement en fréquence des affaiblissements mesurés en comparaison avec les valeurs de  $APV_x$  :

1. Pour chaque tranche de temps, on trace les spectres d'affaiblissement mesurés  $M_{H_3}$  en fonction de la fréquence.

<sup>12</sup> Par opposition à certains calculs où les niveaux non protégés pondérés C sont utilisés (e.g. calcul du *NRR-Noise Reduction Rating*).

2. On répète la même procédure qu'au point 1 en ne retenant que les spectres d'affaiblissement, pour lesquels le niveau extérieur est supérieur à un seuil donné (pour ce qui suit le seuil est fixé à 85 dB(A)).
3. À l'aide des spectres retenus au point 2, on calcule, pour chaque bande de fréquences, l'affaiblissement moyen et l'écart-type associé. On trace ensuite ces données en fonction de la fréquence sur le même graphique que les données de  $APV_{80}$  et  $APV_{20}$ .
4. La procédure décrite est effectuée pour chaque oreille.

### 8.4.1 Travailleurs #13 et #15 – usine #6

Les Figure 30 et Figure 31 montrent les résultats obtenus par cette procédure pour les travailleurs #13 et #15 (usine #6, protecteur de type « serre-tête »). Ces résultats sont complémentaires aux résultats présentés aux Figure 15 et Figure 17. La première rangée (à partir du haut) montre les affaiblissements en fonction de la fréquence<sup>13</sup> obtenus pour chaque tranche de temps (ici une minute). On retrouve donc une courbe pour chaque tranche d'une minute. On constate un grand nombre de périodes de temps où les affaiblissements sont faibles. Ces affaiblissements correspondent généralement à des périodes où le travailleur a enlevé ses protecteurs (pauses, discussion avec ses collègues, etc.). Ils correspondent aussi souvent à des périodes où l'exposition est inférieure à une certaine valeur seuil, tel qu'illustré à la seconde rangée. Pour cette rangée seuls les affaiblissements pour un seuil d'exposition de 85 dB(A) sont conservés. On observe alors des affaiblissements beaucoup plus stables et élevés. Malgré tout, on trouve tout de même quelques courbes où l'affaiblissement est plus faible, ce qui peut suggérer que le travailleur a retiré ses protecteurs lors d'expositions supérieures à 85 dB(A). La troisième rangée (celle du bas) présente les moyennes de l'affaiblissement avec  $\pm$  un écart-type. Les calculs de la moyenne et de l'écart-type sont effectués sur toute la période d'exposition (avec seuil à 85 dB(A)). On y présente aussi les valeurs de  $APV_{20}$  et  $APV_{80}$  calculées en utilisant les données des manufacturiers (soit des données obtenues en laboratoire).

On constate une assez bonne concordance entre les valeurs obtenues en usine et les valeurs de APV pour le travailleur #13. Des affaiblissements plus importants à l'oreille gauche qu'à celle de droite sont observés. De plus des écarts appréciables, encore inexpliqués, entre mesures et APV sont obtenus à 2000 Hz. Contrairement aux cas des bouchons, l'estimation des facteurs de compensation utilisés pour les coquilles, tirés directement de la norme ISO 11904-1[45], n'a pas été validée en laboratoire. On soupçonne donc qu'une part de l'explication de ces écarts est attribuable à ces approximations. Ces facteurs sont assez sensibles aux fréquences supérieures à 1500 Hz, gamme de fréquences pour laquelle on voit apparaître des effets de résonance de tube et de canal auditif. Pour le travailleur #15, on obtient des affaiblissements inférieurs à ceux prédits par les valeurs d'APV pour des fréquences inférieures à 1000 Hz. Bien que les affaiblissements mesurés soient plus élevés pour l'oreille gauche, on observe quand même des écarts variant de 5 à 8 dB avec les valeurs d'APV. Comme on le verra plus loin, ces différences à basses fréquences sont observées pour presque tous les travailleurs. Bien qu'elles puissent être associées à de réelles faiblesses des protecteurs dans cette gamme de fréquence, il importe de mentionner que la méthode subjective du REAT, de laquelle sont extraites les données du

<sup>13</sup> Il est à noter que les affaiblissements sont présentés en dB en ordre croissant vers le bas.

manufacturier, tend à surestimer les valeurs d'atténuation à cause des effets du bruit physiologique (voir par exemple Berger[47] ou Schroeter et Poesselt[48]). À plus haute fréquence, une bonne concordance mesures/APV est obtenue. Sans surprise, les résultats pour les deux travailleurs sont en adéquation avec les comparaisons des indices d'affaiblissement  $IA$  et  $SNR$  présentées précédemment.

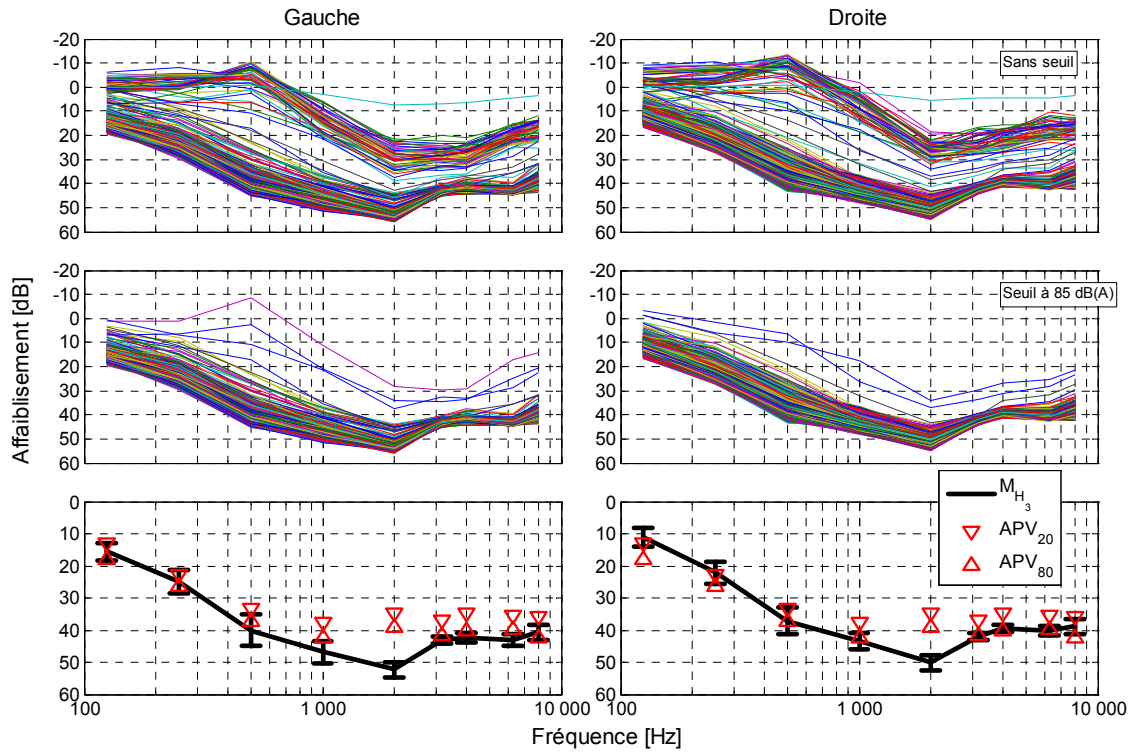


Figure 30 : Affaiblissements en fonction de la fréquence : travailleur #13 (usine #6)

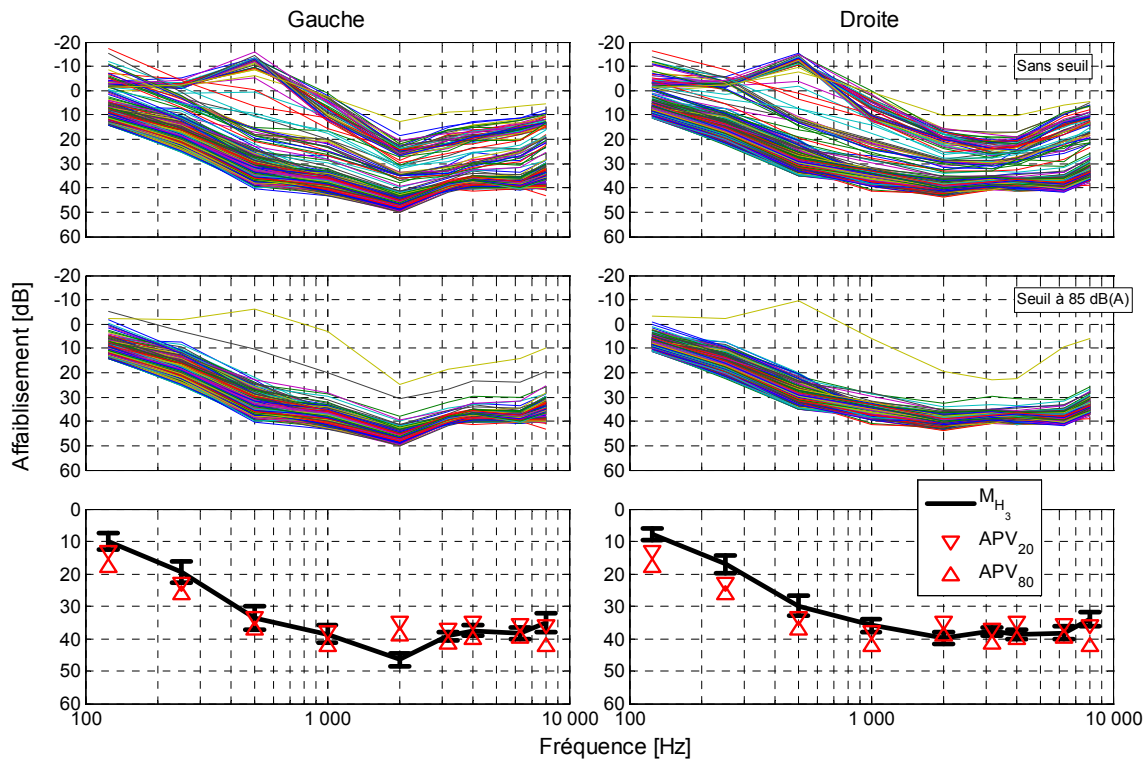


Figure 31 : Affaiblissements en fonction de la fréquence : travailleur #15 (usine #6)

#### 8.4.2 Travailleurs #16 et #17 – usine #7

La Figure 32 (à analyser conjointement avec la Figure 19) présente les résultats pour le travailleur #17 (usine #7, protecteur de type « serre-tête »). Les résultats avec seuil à 85 dB(A) font bien ressortir que le travailleur enlevait souvent ses protecteurs, même si les niveaux étaient supérieurs à 85 dB(A). En effet, on observe globalement deux groupes de courbes : un premier pour lequel les affaiblissements sont faibles (que l'on associe au non-port ou mauvais port des protecteurs) et un deuxième pour lequel les valeurs d'affaiblissement sont plus importantes. En ne regardant que ce deuxième groupe, on trouve des valeurs tout de même inférieures aux valeurs prédites par le *APV*, du moins pour les bandes de fréquences de 125 à 1000 Hz. Des résultats similaires sont obtenus pour un autre travailleur (#18) de cette même usine.

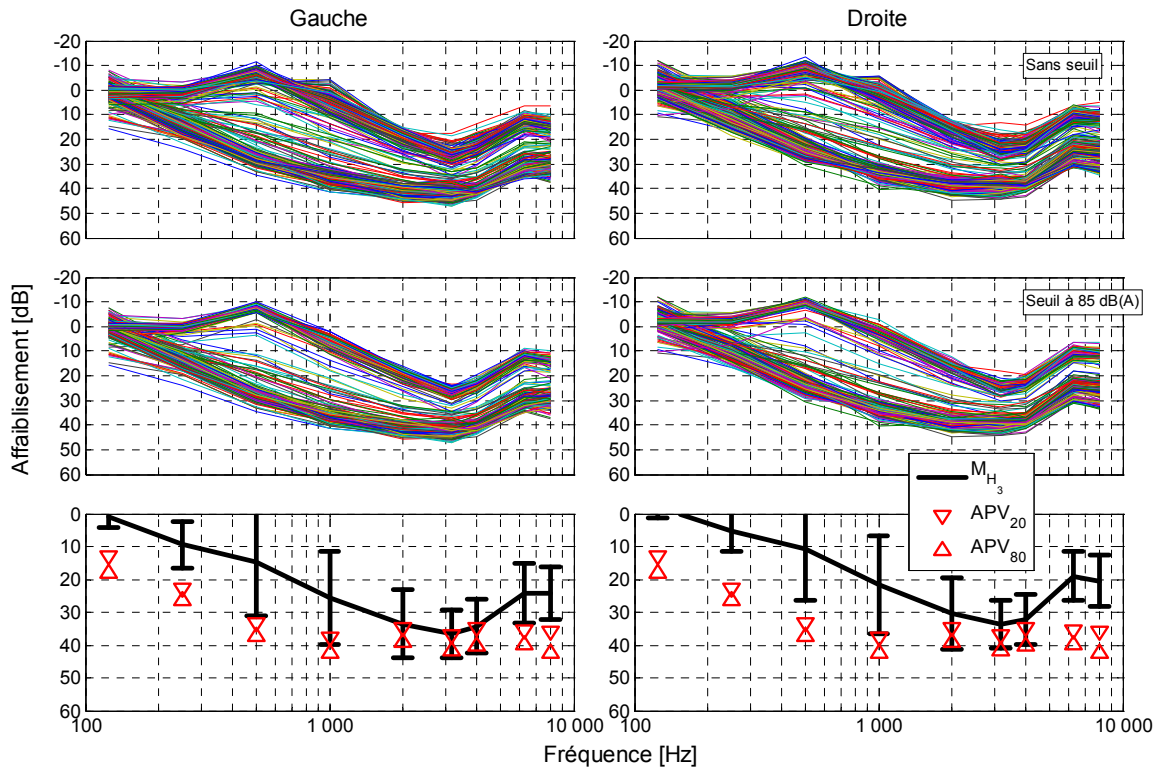


Figure 32 : Affaiblissements en fonction de la fréquence : travailleur #17 (usine #7)

Toujours pour l'usine #7, les Figure 33 et Figure 34 présentent les résultats pour le travailleur #16. Cette fois-ci on observe plutôt beaucoup de variations dans les affaiblissements, en particulier pour l'oreille droite et des valeurs inférieures aux *APV* et ce, pour toute la gamme fréquentielle. Il faut noter que pour ce travailleur, les niveaux extérieurs se situent principalement entre 85 et 90 dB(A) et que la balance spectrale passe souvent au-dessus de 1.5-2 dB (contenu basses fréquences plus important) et fluctue beaucoup.



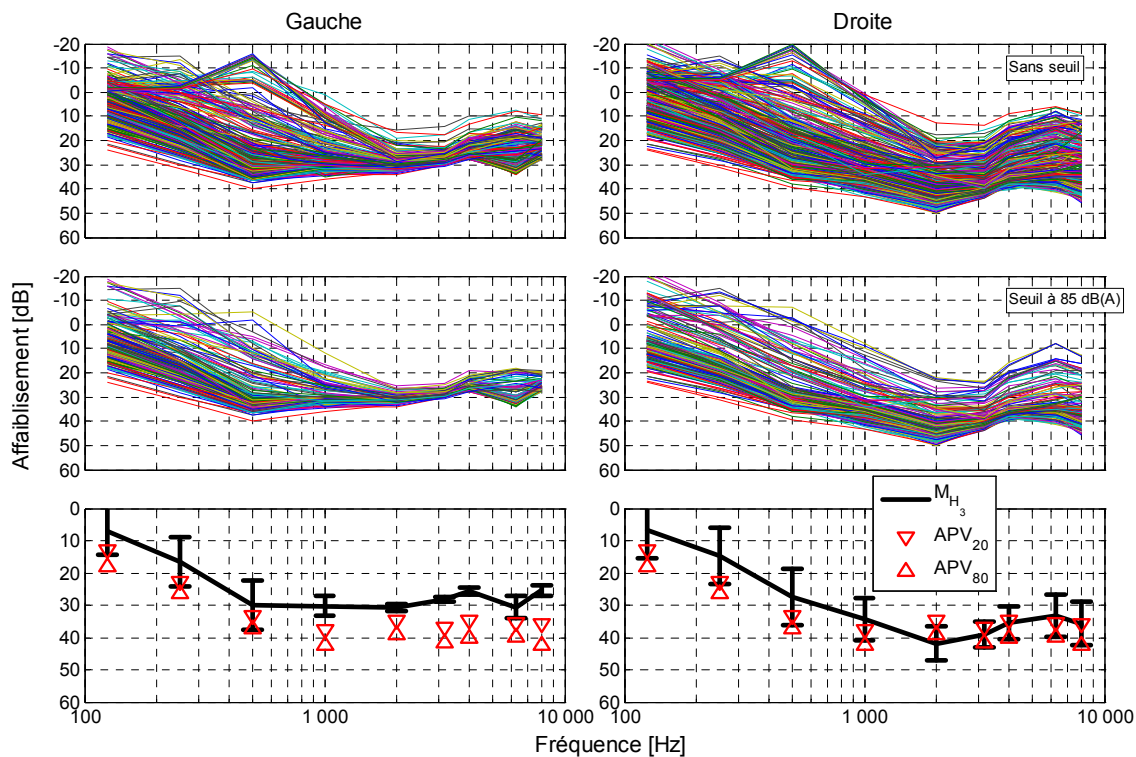


Figure 33 : Affaiblissements en fonction de la fréquence : travailleur #16 (usine #7)

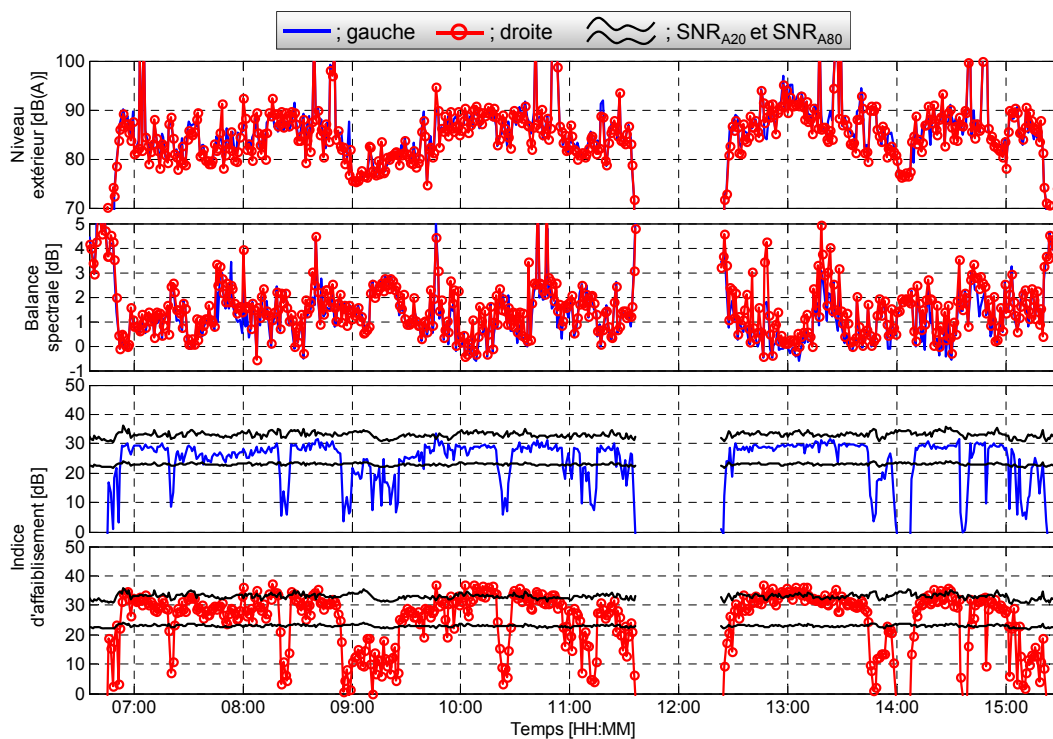


Figure 34 : Indice d'affaiblissement en fonction du temps : travailleur #16 (usine #7)



### 8.4.3 Travailleurs avec bouchons moulés

La Figure 35 montre les résultats pour le travailleur #4 (usine #2, bouchons moulés). Telles qu'observées aussi sur les indices d'affaiblissement montrés à la Figure 22, des différences importantes sont obtenues entre les valeurs obtenues aux deux oreilles, les affaiblissements pour l'oreille droite étant très faibles. Pour l'oreille gauche, les affaiblissements varient beaucoup et sont sensiblement plus faibles que les prédictions de l'APV, même si la tendance globale semble maintenue. Il est intéressant de noter pour l'oreille gauche, en regardant les valeurs à chaque intervalle de temps à la 2<sup>ème</sup> rangée, deux groupes de comportement distincts (apparaissant plus clairement au-dessus de 2000 Hz). Un tel comportement peut être dû au fait que le bouchon n'a pas été inséré (ou réinséré) de la même façon d'une fois à l'autre. Ce phénomène (plus que plausible) n'est pas aussi facilement détectable, pour ce travailleur du moins, si on ne regarde que l'indice d'affaiblissement en fonction du temps (Figure 22).

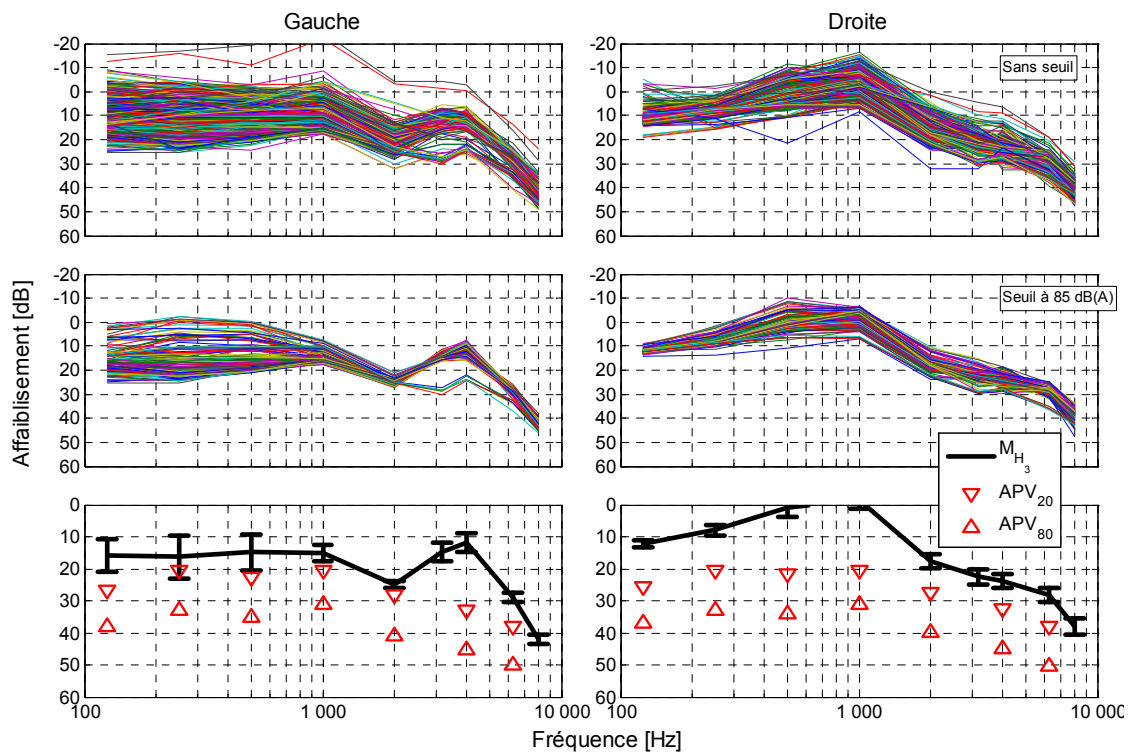


Figure 35 : Affaiblissements en fonction de la fréquence : travailleur #4 (usine #2)

À la Figure 36, on présente les résultats pour le travailleur #8 (usine #4, bouchons moulés). Encore une fois, de grandes différences entre les valeurs aux deux oreilles sont observées bien que globalement les affaiblissements soient plus importants dans le cas de ce travailleur. On remarque notamment que, pour l'oreille gauche, les valeurs obtenues sont très similaires à celles prédites par les APV<sup>14</sup>. Les résultats (avec seuil à 85 dB(A)) pour l'oreille droite montrent une claire démarcation entre deux groupes de courbes d'affaiblissement. Ils correspondent, conformément à ce qui a été observé sur la Figure 23 qui lui est associée, aux affaiblissements

<sup>14</sup> Il faut toutefois mentionner que pour ce travailleur, les valeurs du bouchon générique ont été utilisées pour calculer les APV.

obtenus en matinée (les valeurs les plus faibles) et en après-midi. Ces résultats nous indiquent, pour ce travailleur, qu'un bouchon moins bien inséré (résultats de la matinée) donne des affaiblissements plus faibles sur presque toute la gamme de fréquences. Pour la partie mesurée en après-midi, les affaiblissements sont plus importants et se comparent à ceux obtenus pour l'oreille gauche à partir d'environ 500 Hz. Sous cette fréquence, les valeurs sont plus faibles, ce qui explique probablement les valeurs d'indices  $IA$  plus faibles obtenues à l'oreille droite par rapport à la gauche.

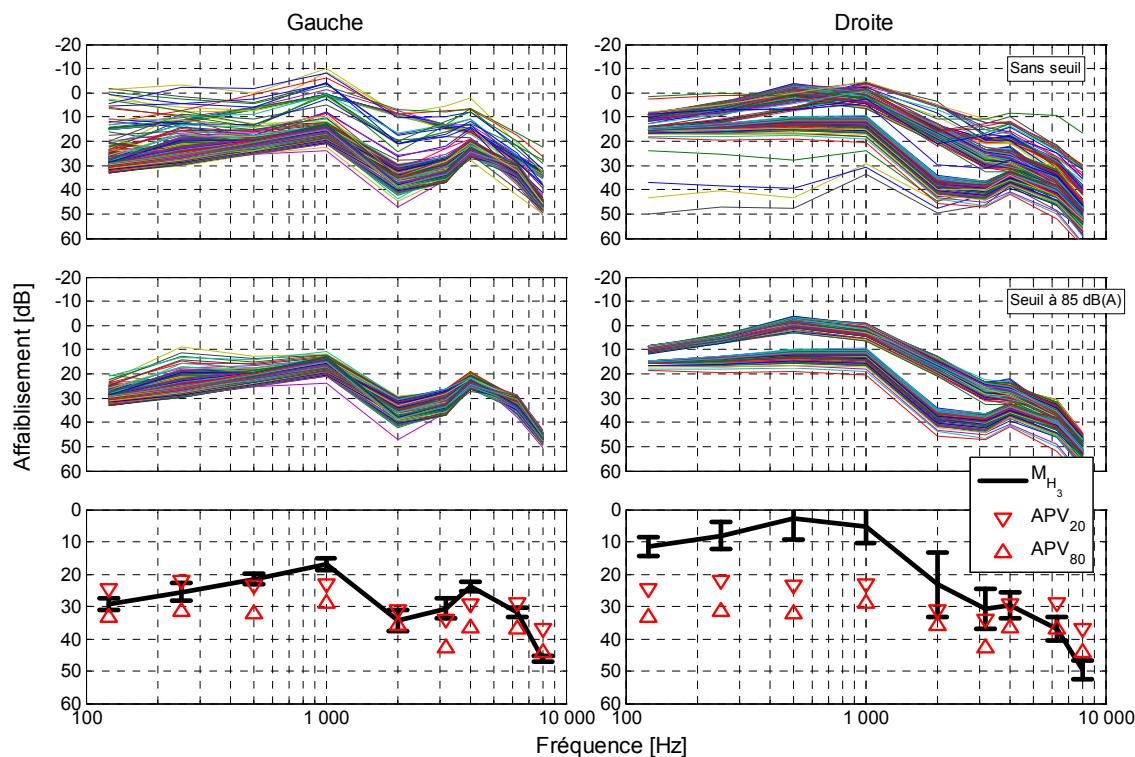


Figure 36 : Affaiblissements en fonction de la fréquence : travailleur #8 (usine #4)

La Figure 37 présente les résultats pour le travailleur #12 de l'usine #5 (voir aussi Figure 24). Pour ce travailleur, on observe des affaiblissements semblables pour les deux oreilles, sous les valeurs de APV. Par contre, on observe beaucoup plus de variations (écarts-types plus grands) dans les affaiblissements que pour les deux travailleurs présentés précédemment (voir Figure 35 et Figure 36). On note aussi deux groupes de courbes distincts dans les affaiblissements (plus visible au-dessus de 2000 Hz) pour l'oreille gauche, ce qui mène à des écarts-types plus importants pour cette oreille. Suite à un examen plus détaillé des résultats, il a pu être établi que les courbes d'affaiblissement les plus faibles sont associées à ce qui se passe entre 8:00 et 10:00 (indice  $IA$  aussi plus faible), soit juste avant la pause du matin. On peut donc supposer que le bouchon de l'oreille gauche a été mieux inséré au retour de la pause.

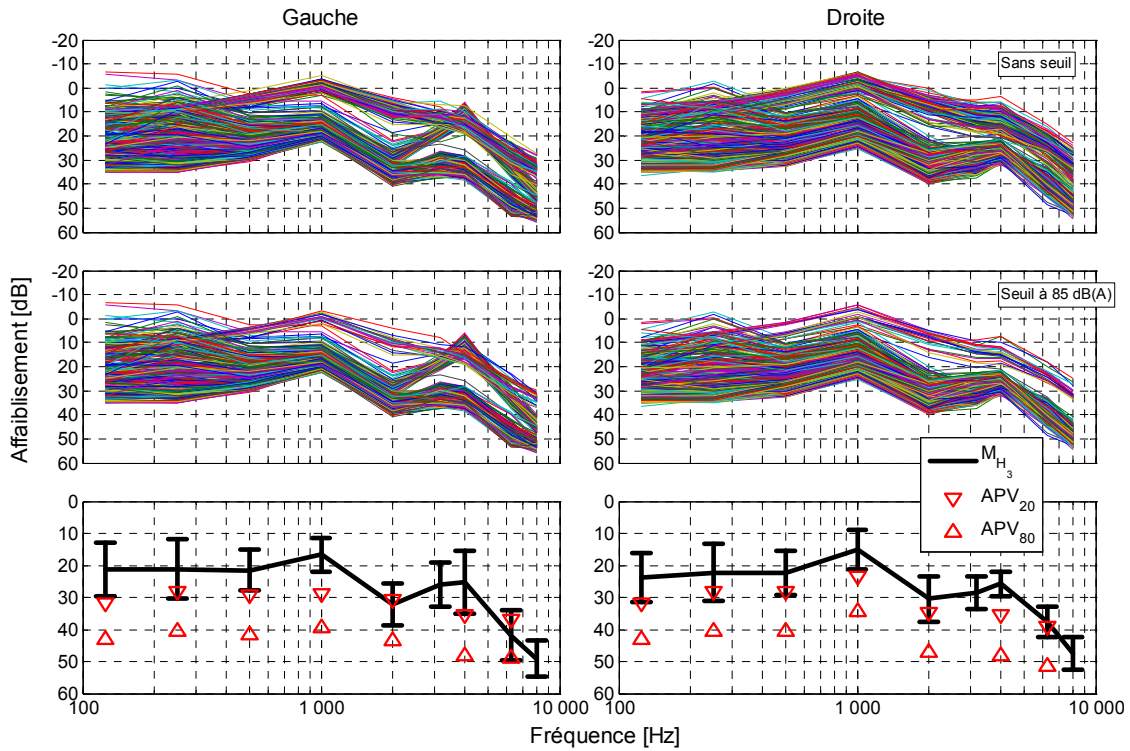


Figure 37 : Affaiblissements en fonction de la fréquence : travailleur #12 (usine #5)

#### 8.4.4 Travailleurs de l'usine #8 – niveaux ambiants élevés

Les Figure 38 et Figure 39 montrent les résultats pour deux travailleurs de l'usine #8, usine pour laquelle les niveaux ambiants sont très élevés. Chaque courbe d'affaiblissement représente maintenant le résultat pour un pas de 5 secondes. La première figure présente le cas du travailleur pour qui l'effet des lunettes était important (voir Figure 25), tandis que la deuxième montre les résultats pour celui où l'effet des lunettes n'était pas perceptible (voir Figure 26). On observe principalement l'effet des lunettes à basses fréquences (<500 Hz). Malgré tout, même si l'effet des lunettes est facilement observable, peu de variations (écarts-types faibles) sont obtenues pour les deux travailleurs et les valeurs d'affaiblissement s'approchent de la fourchette de valeurs de  $APV_{80}$  et  $APV_{20}$ .

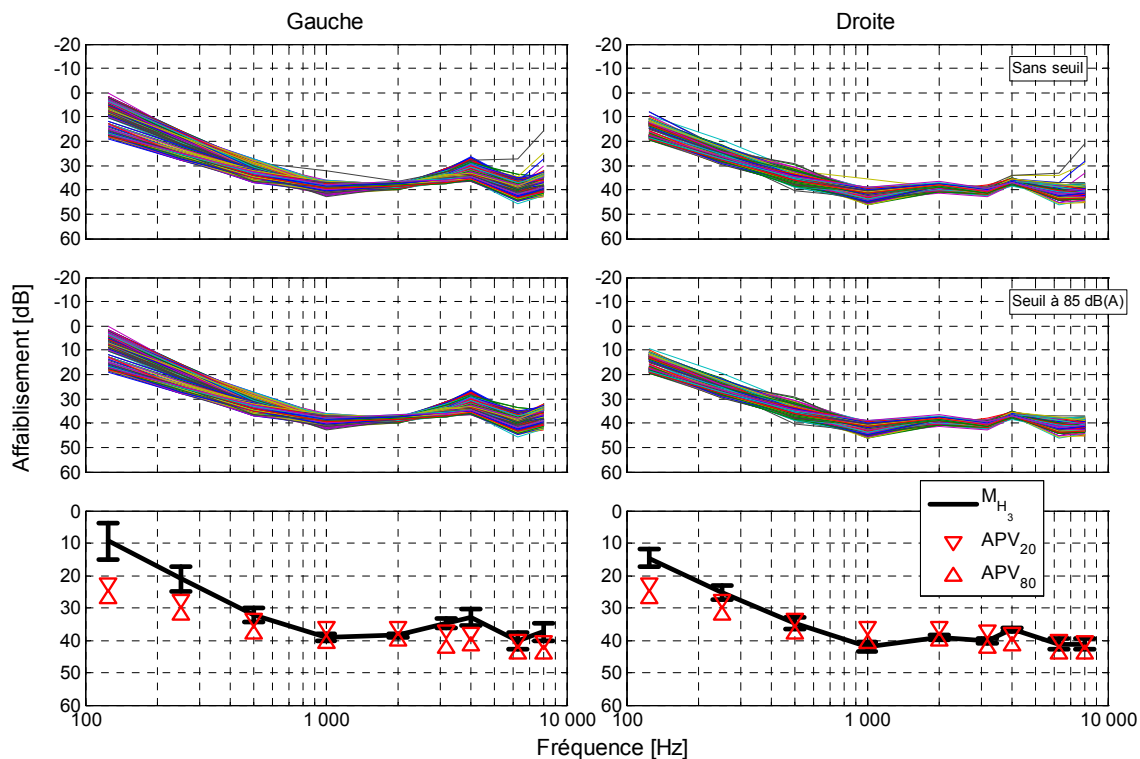


Figure 38 : Affaiblissements en fonction de la fréquence : travailleur #19 (usine #8)

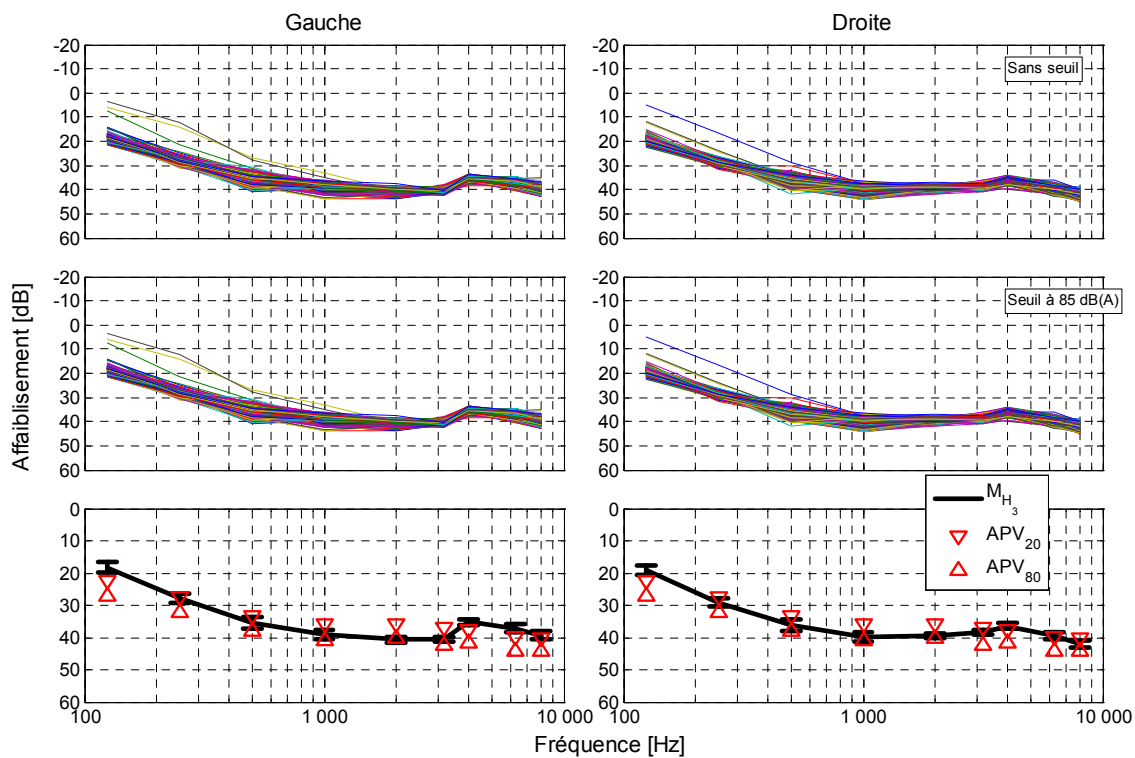


Figure 39 : Affaiblissements en fonction de la fréquence : travailleur #20 (usine #8)

Enfin, les Figure 40 et Figure 41 présentent les résultats pour le travailleur #23 avec une paire de coquilles installée sur deux casques différents. Pour le casque I, des affaiblissements peu élevés sont obtenus pour les bandes de 125 et 250 Hz et ce, particulièrement pour l'oreille gauche. L'oreille droite voit ses affaiblissements plus élevés, mais de plus grandes variations sont obtenues. De plus, pour les deux oreilles, on observe une diminution de l'affaiblissement autour de 4000-5000 Hz. Les résultats sont toutefois différents pour le casque II. Pour ce casque, on trouve des variations beaucoup moins importantes et des valeurs d'affaiblissement plus importantes, comparables aux valeurs de APV. De ces résultats, il est impossible de tirer des conclusions générales, quant à l'effet du port du casque sur les niveaux de protection. On ne peut que constater qu'une même paire de coquilles installée sur deux casques différents (et sur un même travailleur) a donné des résultats tout à fait différents.

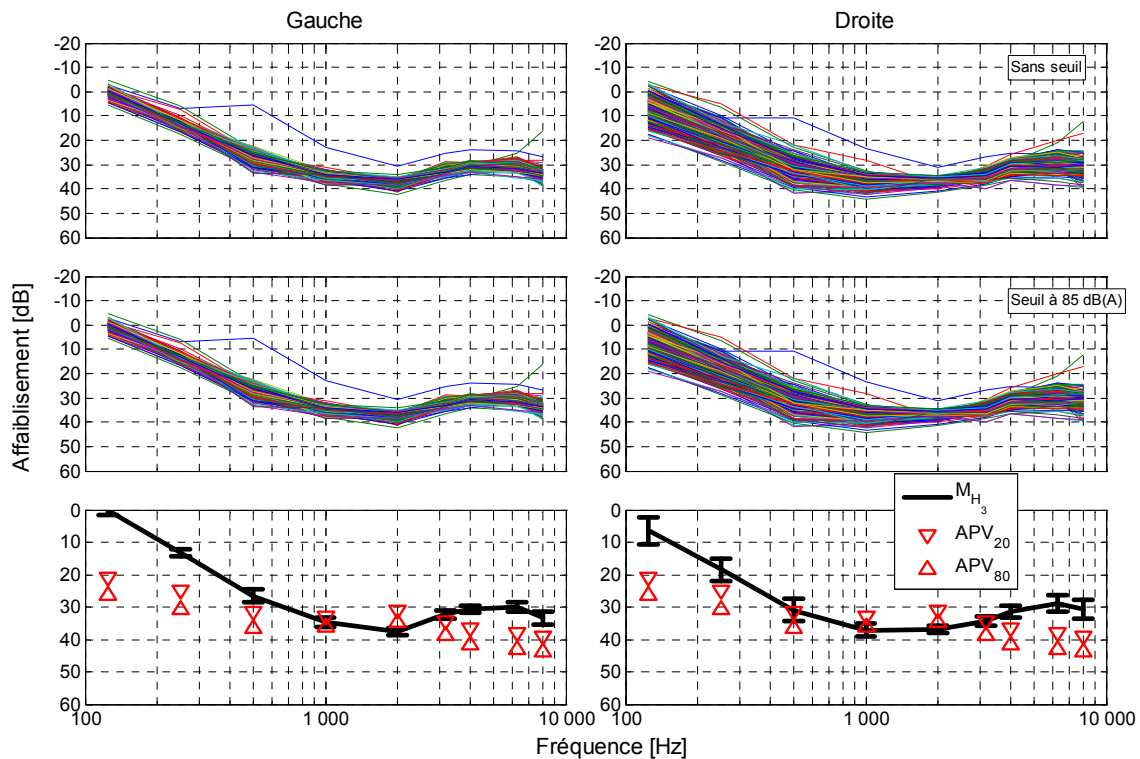


Figure 40 : Affaiblissements en fonction de la fréquence : travailleur #23 casque I (usine #8)

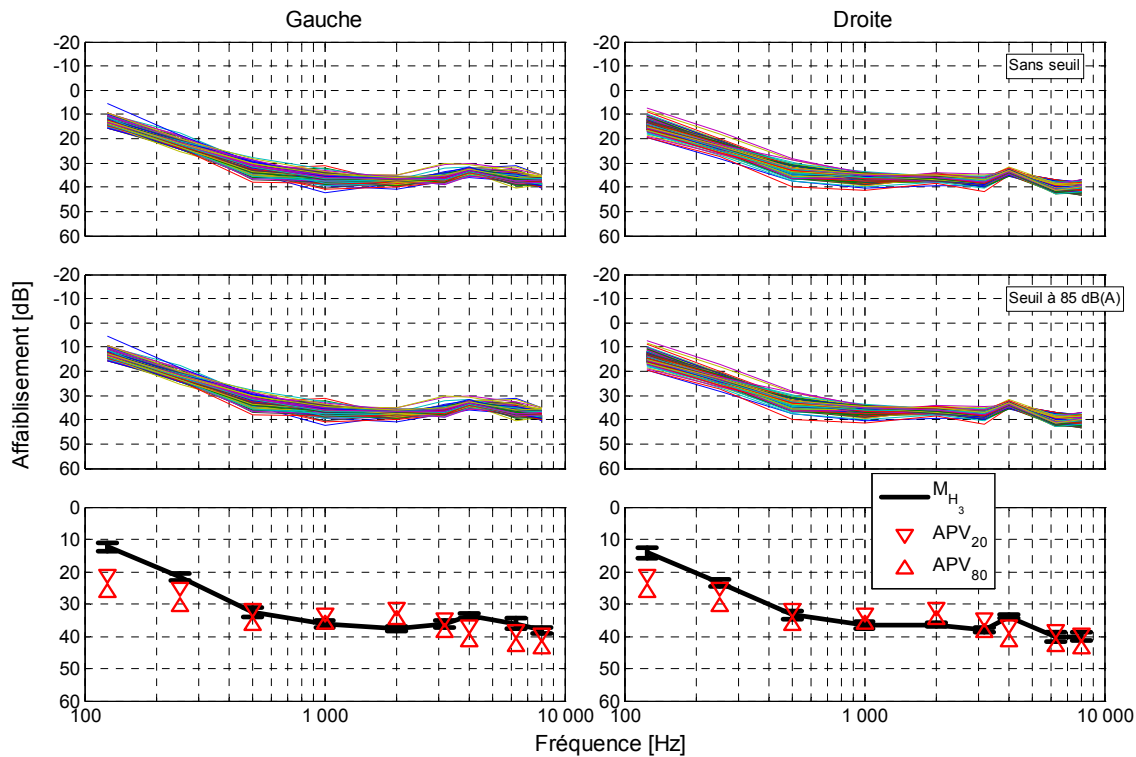


Figure 41 : Affaiblissements en fonction de la fréquence : travailleur #23 casque II (usine #8)

## 8.5 Portrait d'ensemble pour tous les travailleurs

Cette section présente une vue d'ensemble pour tous les travailleurs. Pour ce faire on présente, dans le Tableau 5 les valeurs moyennées des niveaux globaux non-protégés (en dB(A)), niveaux globaux protégés (en dB(A)) et de l'indice d'affaiblissement (en dB) pour chaque travailleur. Pour chaque quantité, quatre moyennes (avec leur écart-type associé entre parenthèses) sont présentées. La première ligne montre les moyennes (écarts-types) prises sur les valeurs en dB sur l'ensemble de la période de mesures avec, dans la dernière colonne, la durée totale de cette période. La deuxième ligne présente les moyennes (écarts-types) prises maintenant sur les valeurs durant lesquelles le niveau protégé est supérieur à 85 dB(A), ce qui correspond en gros à ne considérer que les valeurs moyennes quand le travailleur est soumis à un bruit important. La dernière colonne présente le temps passé (pour chaque oreille) dans un tel bruit. Les travailleurs sont groupés par usine (alternance des fonds gris et blanc dans le tableau).

Les résultats du Tableau 5 permettent de faire ressortir plus globalement ce qui a été présenté individuellement pour certains travailleurs dans les sections précédentes. Plus spécifiquement :

- Les indices d'affaiblissement moyens peuvent varier beaucoup d'un travailleur à l'autre, mais aussi d'une oreille à l'autre. Des écarts-types plus importants sont observés pour les bouchons moulés que pour les coquilles.
- Pour un même produit (ici Peltor H7A) utilisé par plusieurs travailleurs dans deux usines différentes (travailleurs 13 à 18), on observe d'importantes différences dans les indices



d'affaiblissement moyens. Par contre, il est intéressant de noter que les travailleurs œuvrant dans l'environnement le plus bruyant (usine #6) montrent des indices d'affaiblissement plus élevés.

- Certains travailleurs présentent des indices d'affaiblissement moyens assez faibles et ce, particulièrement pour les bouchons moulés. Cependant, il appert que ceux-ci évoluaient dans un environnement où les niveaux non protégés sont relativement faibles (ou du moins, ils passaient relativement peu de temps en milieu très bruyant).
- En assumant que les facteurs de correction et de compensation qui permettent de passer d'un niveau mesuré sous les coquilles à un niveau équivalent champ libre soient réalistes (voir section 7.4), on constate que la majorité des travailleurs ont des niveaux protégés moyens sous les 85 dB(A). Certains présentent même des niveaux protégés suffisamment faibles pour qu'on puisse parler de surprotection<sup>15</sup>. Par contre, on observe aussi des travailleurs pour lesquels la protection pourrait être jugée insuffisante<sup>15</sup> (au sens de la norme CSA Z94.2-02[49]).

Tableau 5 : Sommaire des résultats pour l'ensemble des travailleurs

<sup>a</sup> : information non disponible pour l'oreille gauche en après-midi dû à des problèmes techniques; <sup>b</sup> : information non disponible pour l'oreille droite dû à des problèmes techniques; <sup>c</sup> : information non disponible pour l'oreille gauche dû à des problèmes techniques)

Travailleur		Niveau non protégé		Niveau protégé		Indice d'affaiblissement		Temps	
		G	D	G	D	G	D	G	D
1	-	88.0 (7.1)	88.1 (7.1)	75.0 (10.2)	81.7 (10.1)	13.1 (8.9)	6.4 (7.0)	7:04:55	
	> 85 dB(A)	90.6 (2.3)	90.6 (2.4)	76.6 (9.6)	84.1 (8.3)	14.0 (8.9)	6.4 (7.0)	5:50:55	6:00:05
2	-	86.9 (12.2)	86.9 (12.1)	69.0 (11.7)	70.4 (10.7)	13.1 (8.9)	16.4 (8.4)	6:56:40	
	> 85 dB(A)	93.4 (2.8)	93.3 (2.8)	73.7 (7.6)	74.6 (6.7)	19.7 (7.3)	18.7 (6.3)	5:13:50	5:13:20
3	-	73.8 (14.9)	74.2 (15.2)	69.8 (15.2)	69.1 (15.2)	4.0 (5.8)	5.1 (4.8)	6:24:45	
	> 85 dB(A)	93.3 (4.3)	94.1 (4.5)	88.3 (6.7)	87.9 (6.5)	5.1 (5.5)	6.2 (5.2)	1:42:10	1:43:15
4	-	79.6 (15.0)	79.4 (15.0)	67.1 (12.1)	77.2 (14.0)	12.5 (8.4)	2.2 (5.7)	6:43:35	
	> 85 dB(A)	95.6 (5.6)	95.2 (5.5)	77.8 (5.7)	91.1 (4.8)	17.7 (5.8)	4.0 (4.8)	2:36:10	2:38:55
5	-	81.3 (8.5)	81.2 (8.5)	63.1 (12.2)	62.5 (12.4)	18.1 (14.5)	18.6 (14.7)	3:11:35	
	> 85 dB(A)	89.9 (3.9)	89.9 (4.1)	64.5 (10.9)	64.0 (11.2)	25.3 (11.5)	26.0 (11.7)	1:04:45	1:02:45
6	-	80.9 (9.7)	81.4 (9.6)	59.2 (8.8)	59.3 (8.6)	21.7 (11.8)	22.1 (11.2)	3:24:55	
	> 85 dB(A)	90.0 (3.6)	90.1 (3.5)	60.4 (7.3)	60.8 (7.0)	29.7 (7.9)	29.4 (7.2)	1:23:40	1:29:15
7	-	85.8 (6.9)	86.0 (7.0)	83.2 (8.4)	78.5 (7.4)	2.6 (3.0)	7.5 (3.7)	8:05:20	
	> 85 dB(A)	89.6 (3.3)	89.5 (3.4)	87.5 (5.1)	81.5 (4.6)	2.0 (3.0)	8.0 (3.8)	6:41:55	6:44:20
8	-	86.5 (7.6)	87.7 (8.1)	64.1 (5.6)	76.2 (9.3)	22.4 (5.8)	11.4 (6.0)	8:04:45	
	> 85 dB(A)	89.1 (2.2)	90.5 (2.9)	65.3 (3.6)	78.5 (5.9)	23.8 (2.8)	12.0 (5.0)	6:41:55	6:44:20
9 <sup>a</sup>	-	90.1 (5.8)	87.6 (8.2)	80.1 (6.3)	67.3 (6.9)	10.0 (4.5)	20.3 (5.7)	3:28:25	7:35:05
	> 85 dB(A)	91.9 (2.7)	91.3 (2.6)	81.4 (4.7)	69.8 (4.2)	10.4 (4.4)	21.6 (3.3)	3:02:25	5:47:55
10 <sup>b</sup>	-	81.2 (7.1)	ND	81.3 (8.2)	ND	-0.1 (2.7)	ND	7:38:55	
	> 85 dB(A)	88.2 (2.6)	ND	88.8 (3.2)	ND	-0.6 (2.9)	ND	2:26:35	ND
11 <sup>c</sup>	-	ND	81.0 (7.3)	ND	81.0 (8.7)	ND	0.1 (2.6)	7:39:10	
	> 85 dB(A)	ND	88.3 (1.4)	ND	89.0 (2.0)	ND	-0.7 (1.7)	ND	2:42:40
12	-	86.7 (10.3)	85.5 (10.2)	69.2 (9.5)	67.7 (10.0)	17.7 (9.0)	17.8 (10.0)	7:49:50	
	> 85 dB(A)	93.0 (3.7)	91.5 (3.7)	72.7 (8.0)	71.1 (8.7)	20.3 (7.6)	20.5 (8.4)	5:05:35	4:59:00
13	-	91.3 (9.2)	91.3 (9.4)	56.7 (7.3)	59.7 (7.1)	34.6 (13.5)	31.5 (13.7)	09:17:05	

<sup>15</sup> La norme CSA Z94.2-02 parle de surprotection lorsque les niveaux sous le protecteur sont inférieurs à 70 dB(A). On y parle aussi de protection insuffisante lorsque les niveaux sous le protecteur sont supérieurs à 85 dB(A).

	> 85 dB(A)	94.0 (4.4)	94.0 (4.4)	55.4 (5.3)	58.4 (5.1)	38.6 (6.6)	35.6 (6.4)	8:11:45	8:12:00
14	-	88.9 (10.5)	88.5 (10.5)	60.9 (6.7)	60.4 (6.7)	27.9 (13.3)	28.1 (12.8)	08:46:45	
	> 85 dB(A)	92.6 (3.4)	92.3 (3.4)	60.0 (4.1)	59.7 (4.1)	32.6 (4.6)	32.6 (4.6)	7:28:25	7:44:05
15	-	89.6 (10.0)	90.1 (10.2)	61.4 (5.8)	64.4 (5.4)	28.3 (12.0)	25.8 (11.3)	9:02:55	
	> 85 dB(A)	93.0 (3.7)	93.5 (4.0)	61.0 (4.8)	64.2 (4.4)	32.0 (5.5)	29.3 (5.0)	7:52:40	7:53:35
16	-	82.8 (7.9)	82.5 (7.8)	60.9 (9.5)	60.3 (11.1)	22.0 (11.0)	22.2 (13.2)	8:09:35	
	> 85 dB(A)	89.5 (4.6)	89.6 (4.3)	64.1 (9.6)	61.9 (12.2)	25.4 (9.0)	27.7 (12.3)	2:58:40	2:50:20
17	-	83.7 (10.6)	81.8 (10.6)	70.8 (15.0)	71.9 (14.7)	12.9 (14.4)	9.9 (13.7)	7:53:45	
	> 85 dB(A)	94.1 (7.6)	94.0 (7.1)	78.3 (15.2)	82.0 (13.8)	15.8 (14.1)	12.0 (13.1)	2:47:05	2:17:35
18	-	83.8 (8.0)	86.3 (7.8)	66.4 (11.3)	62.9 (12.3)	17.5 (12.4)	23.4 (13.6)	07:51:30	
	> 85 dB(A)	89.9 (3.7)	91.1 (4.0)	69.2 (10.8)	64.3 (11.9)	20.7 (10.6)	26.7 (11.5)	3:51:15	4:46:35
19	-	111.6 (4.9)	111.6 (4.9)	82.2 (5.7)	77.9 (4.4)	29.4 (3.9)	33.7 (2.0)	0:26:40	
	> 85 dB(A)	112.1 (2.1)	112.1 (2.1)	82.6 (4.4)	78.3 (2.6)	29.5 (3.8)	33.8 (1.8)	0:26:20	0:26:20
20	-	110.1 (2.2)	110.4 (2.4)	75.6 (2.4)	75.0 (2.5)	34.5 (1.3)	35.4 (1.1)	0:28:05	
	> 85 dB(A)	110.1 (1.6)	110.5 (1.8)	75.9 (1.9)	75.1 (1.9)	34.5 (1.3)	35.4 (1.1)	0:28:00	0:28:00
21	-	111.6 (6.8)	111 (7.2)	85.8 (5.4)	79.2 (4.4)	25.7 (2.4)	31.9 (3.8)	00:28:10	
	> 85 dB(A)	112.7 (2.0)	112.2 (2.0)	86.7 (2.5)	79.8 (2.5)	26.0 (1.5)	32.4 (1.6)	0:27:20	0:27:20
22	-	112.2 (1.5)	112.2 (1.5)	81.3 (2.3)	78.0 (2.5)	30.9 (1.9)	34.2 (2.0)	0:23:35	
	> 85 dB(A)	112.2 (1.5)	112.2 (1.5)	81.3 (2.3)	78.0 (2.5)	30.9 (1.9)	34.2 (2.0)	0:23:35	0:23:35
23	-	111.0 (1.5)	111.0 (1.5)	81.7 (3.0)	79.5 (2.6)	29.3 (2.7)	31.6 (2.2)	0:27:50	
	> 85 dB(A)	111.0 (1.5)	111.0 (1.5)	81.7 (3.0)	79.5 (2.6)	29.3 (2.7)	31.6 (2.2)	0:27:50	0:27:50
24	-	108.5 (9.9)	108.2 (10.1)	84.8 (8.5)	77.5 (7.3)	23.6 (2.5)	30.7 (4.6)	0:27:45	
	> 85 dB(A)	110.8 (2.9)	110.7 (3.0)	86.8 (3.1)	79.0 (3.6)	24.1 (1.4)	31.6 (2.1)	0:26:05	0:26:05
25	-	110.9 (1.1)	111.5 (1.2)	82.8 (3.8)	84.6 (1.1)	28.2 (3.4)	26.9 (0.8)	0:31:35	
	> 85 dB(A)	110.9 (1.1)	111.5 (1.2)	82.7 (3.8)	84.6 (1.1)	28.2 (3.4)	26.9 (0.8)	0:31:35	0:31:35
26	-	111.0 (2.1)	110.9 (2.0)	89.5 (2.1)	84.5 (3.0)	21.5 (1.7)	26.5 (3.4)	0:31:40	
	> 85 dB(A)	111.0 (2.1)	110.9 (2.0)	89.5 (2.1)	84.5 (3.0)	21.5 (1.7)	26.5 (3.4)	0:31:40	0:31:40
27	-	111.3 (1.5)	110.6 (1.3)	80.9 (1.4)	79.2 (1.4)	30.3 (1.0)	31.4 (1.0)	00:30:15	
	> 85 dB(A)	111.3 (1.5)	110.6 (1.3)	80.9 (1.4)	79.2 (1.4)	30.3 (1.0)	31.4 (1.0)	0:30:15	0:30:15



## 9. CONCLUSION

Le présent projet a permis de montrer qu'il est possible de faire la mesure de la performance de protecteurs auditifs (de même que la mesure des niveaux protégés) en milieu de travail et ce, en continu durant un quart de travail complet. Une méthodologie de mesures basée sur la méthode F-MIRE a été développée et a mené à l'élaboration d'un dispositif léger, robuste et portable. Ce dispositif a été utilisé dans différents environnements de travail, ainsi que sur plusieurs travailleurs portant des protecteurs de type serre-tête ou bouchons moulés. Au total, huit (8) entreprises ont été visitées et vingt-quatre (24) travailleurs ont été testés.

### 9.1 Constats

L'analyse des résultats obtenus pour les vingt-quatre travailleurs examinés a permis de mettre en évidence plusieurs points importants (sans ordre d'importance précis):

1. Pour presque tout les cas étudiés, les indices d'atténuation obtenus varient de façon significative en fonction du temps sur de longues périodes de temps. Des variations plus importantes sont obtenues pour les bouchons moulés que pour les serre-tête.
2. Pour un travailleur donné, des différences souvent importantes entre les valeurs mesurées pour les deux oreilles (différences droite/gauche) sont observées. Encore une fois, ces différences sont plus accentuées pour les travailleurs portant des bouchons moulés.
3. Pour un même modèle de protecteur, des indices d'affaiblissement différents sont souvent obtenus d'un travailleur à l'autre.
4. Les comparaisons des spectres d'atténuation obtenues par les mesures avec les valeurs affichées par les manufacturiers (obtenues en laboratoire) permettent de mettre en relief les résultats suivants :
  - a. les valeurs « terrain » sont inférieures à celles dites « laboratoire ». Ces résultats sont en accord avec les données bien connues de la littérature sur les indices d'atténuation, données qui ont montré que les indices d'atténuation « laboratoire » surestiment les valeurs « terrain ». Les valeurs « terrain » obtenues pour les bouchons sont plus éloignées des valeurs « laboratoire » que les valeurs obtenues pour les coquilles.
  - b. Les comparaisons « terrain/laboratoire » pour les valeurs d'atténuation des serre-tête semblent indiquer que les approximations utilisées pour les facteurs de compensation sont réalistes.
  - c. Pour les cas où les valeurs d'atténuation « terrain » concordent assez bien avec les valeurs « laboratoire », des atténuations « terrain » plus faibles sont particulièrement notées à basses fréquences (125, 250 et 500 Hz). Ces écarts peuvent être dus à une réelle faiblesse du protecteur ou encore aux effets du bruit

physiologique, effet connu qui tend à donner des valeurs d'atténuation plus élevées avec la méthode du *REAT* en laboratoire

5. Sans réelle surprise, les résultats d'indice d'atténuation, mis en rapport avec la balance spectrale, montrent que la performance est fortement influencée par le contenu fréquentiel du bruit ambiant. Cela démontre donc l'importance de bien connaître le contenu spectral du bruit auquel est exposé un travailleur, lorsque vient le temps de faire une sélection adéquate d'un protecteur.
6. Les résultats d'atténuation et d'indices d'affaiblissement ont permis de constater (ou plutôt de confirmer) que le port de lunettes ou d'un casque de sécurité peut avoir un impact important sur la performance des protecteurs. Cependant, aucune généralisation ne peut être énoncée, puisque des cas où la performance n'a pas été sensiblement modifiée ont été aussi observés.
7. Bien que l'analyse des signaux temporels puisse encore être bonifiée pour faire la détection de certains événements dans le temps, il a été montré que l'approche développée dans le projet renferme tout le potentiel pour l'accomplir. L'effet important du port de lunettes de sécurité sur la performance des protecteurs, notamment discuté au point précédent, en est un exemple probant.
8. Compte tenu des différences gauche/droite, des différences inter-sujets et des variations importantes dans le temps observées pour les sujets testés dans le cadre de ce projet, il nous apparaît que l'utilisation d'indicateurs d'atténuation personnalisés (par opposition à un indicateur unique moyen pour un protecteur donné) serait plus appropriée. De même, bien que leurs utilisations soient répandues et qu'ils soient simples à mettre en œuvre, les procédures de décote<sup>16</sup> (*derating*) ne semblent pas en corrélation avec les résultats obtenus dans ce projet.

## 9.2 Perspectives

Ce projet a permis de montrer le potentiel de l'approche développée pour faire non seulement la mesure en continu de la performance de protecteurs auditifs, mais aussi de faire la mesure des niveaux protégés. Pour terminer ce rapport, nous faisons ressortir les principaux points qui demanderaient à être plus approfondis dans le futur.

**Facteurs de compensation.** Les facteurs de compensation permettent en principe de ramener les résultats d'atténuation obtenus par l'approche proposée à ceux obtenus par la méthode subjective du *REAT* ou encore celle objective du *IL* (*Insertion Loss*). Ces deux dernières sont les approches reconnues dans les différentes normes sur les protecteurs auditifs. Il devient donc important de bien caractériser les facteurs de compensation afin que notre approche permette des

---

<sup>16</sup> La décote consiste, afin de refléter le fait que les données « terrain » sont plus faibles que les données « laboratoire », à réduire l'indice d'atténuation affichée par le fabricant par un certain pourcentage. Ce pourcentage dépend en général du type de protecteur et la décote s'applique lors de l'estimation des niveaux protégés pour des fins réglementaires. Différentes procédures de décote sont proposées, selon les pays et réglementations.

comparaisons avec des valeurs « normalisées » ou réglementaires. Lors du présent projet, des facteurs de correction de groupe tirés de travaux de la littérature ont été utilisés pour les bouchons, tandis qu'une approximation assez rudimentaire a été utilisée pour les coquilles. Des travaux sont nécessaires afin d'étudier plus en détail cet aspect pour mieux définir les facteurs à utiliser et explorer s'il est envisageable d'avoir des facteurs individualisés.

**Niveaux protégés.** D'un point de vue santé et sécurité pour les travailleurs, il est généralement plus important de connaître les niveaux protégés (sous le protecteur) que les atténuations ou indices d'atténuation des protecteurs eux-mêmes. De plus, ce sont généralement les niveaux protégés qui font l'objet de réglementation dans divers organismes, juridictions ou pays. Bien qu'il nous était possible de présenter les résultats de niveaux protégés dans ce projet, le choix a été fait de se concentrer seulement sur la performance des protecteurs. Il serait toutefois intéressant de pousser plus loin l'analyse sur les niveaux protégés.

**Traitement de signal et détection d'événements dans le temps** L'approche, qui consiste à enregistrer directement les signaux temporels permet une grande flexibilité, car elle ouvre la voie à des analyses en fréquence plus fine ou encore à du traitement de signal plus sophistiqué que ce qui a été réalisé dans le projet jusqu'à maintenant. Par exemple, on peut imaginer faire la détection automatique et l'analyse d'événements dans le temps (voix et parole, signaux d'alarme, non-utilisation du protecteur, entrave à la communication, etc.) par différentes approches de traitement de signal plus ciblées. De tels traitements pourraient mener à une meilleure compréhension des phénomènes en jeu, de même qu'à des calculs plus précis de différents indicateurs tels les doses de bruit, le temps de non-port ou l'indice d'atténuation ou encore permettraient le calcul de différentes statistiques.

**Échantillons plus grands** Bien que les mesures faites au cours du projet constituent une quantité importante d'information, il serait bénéfique de faire le même genre de mesures sur un plus grand nombre de sujets, de même que sur un plus grand nombre et une plus grande variété de protecteurs.

**Autres types de protecteurs** Le projet n'a porté que sur deux types de protecteurs classiques, soit des coquilles standard et des bouchons moulés. Il serait intéressant d'appliquer la méthode (en l'adaptant au besoin) sur d'autres types de protecteurs : i) bouchons de types différents (mousse, pré-moulés, etc.) ; ii) protecteurs avec systèmes de communication intégrés ; iii) protecteurs avec système de contrôle actif (électronique embarquée) ; iv) protecteurs passifs avec filtres (filtres passifs, protection dépendant du niveau, bouchon pour musiciens, etc.).

**Analyse des mesures en temps réel.** Le système de mesures développé permet la mesure de fichiers temporels. Ceux-ci sont par la suite traités en différé pour obtenir les résultats. Il est possible, en laboratoire avec des systèmes de mesures et d'analyse plus lourds, de faire le suivi des données en temps réel. Il devient alors possible de faire une observation fine et très instructive de la performance en temps réel des protecteurs, en fonction des activités et mouvements du sujet les portant. On peut facilement observer en direct, par exemple, l'effet de la force de serrage pour des coquilles, de l'insertion d'un bouchon, ou encore de différents mouvements de la tête et du corps sur la performance. On peut ainsi imaginer à long terme qu'avec le développement de technologies sans fil, il serait envisageable d'obtenir à distance, en

milieu de travail, les signaux des microphones et d'en faire l'analyse en temps réel et ainsi, de suivre en continu le comportement des protecteurs.

**Appareillage de mesure de type « commercial ».** Une meilleure caractérisation des facteurs de compensation, des travaux avec des groupes de normalisation et des développements au niveau des microphones et systèmes d'acquisition permettent d'envisager à plus ou moins long terme le développement d'un dispositif de mesures (ou du moins un prototype), qui pourrait être utilisé par un plus large public et éventuellement, être commercialisé si l'intérêt se manifeste.

## 10. BIBLIOGRAPHIE

- [1] J.P. Vigneault, "Pour un meilleur support de la recherche au plan d'action 2006-2008 du réseau de santé publique en santé au travail," *Colloque IRSST: La recherche sur le bruit en milieu de travail*, IRSST: (2007) .
- [2] E. Patton, "Ergonomic hearing protectors," *Ergonomics in Design*, **8** (4) , p. 25-28, (2000) .
- [3] M.S. Sanders et E.J. McCormick, *Human Factors in Engineering and Design*, New York: McGraw-Hill, (1987) .
- [4] B. Witt, "Involving Employees in their Hearing Conservation Programs," *Noise at work*, Lille, France: (2007) , p. 377-382.
- [5] J. Voix, *Mise au point d'un bouchon d'oreille "intelligent"*, Thèse de doctorat, École de Technologie Supérieure, (2006) .
- [6] E.H. Berger, "Hearing Protection Device Utilization Around the World," *Spectrum*, **17** (Suppl. 1) , p. 18, (2000) .
- [7] S.L. Lusk, M.J. Kerr, et S.A. Kauffman, "Use of hearing protection and perceptions of noise exposure and hearing loss among construction workers," *American Industrial Hygiene Association Journal*, **59**, p. 466-470, (1998) .
- [8] T.C. Morata et al., "Factors affecting the use of hearing protectors in a population of printing workers," *Noise & Health*, **4** (13) , p. 25-32, (2001) .
- [9] G.W. Hughson, R.E. Mulholland, et H.A. Cowie, *Behavioural studies of people's attitudes to wearing hearing protection and how these might be changed*, Edinburgh, UK: Institute of Occupational Medicine, (2002) .
- [10] Y. Hsu, C. Huang, C. Yoa, C. Chen, et C. Lien, "Comfort evaluation of hearing protection," *International Journal of Industrial Ergonomics*, **33**, p. 543-551, (2004) .
- [11] M. Gaudreau, F. Laville, J. Voix, et H. Nélisse, "État de l'art et perspectives sur la mesure des performances effectives des protecteurs auditifs en milieu de travail," *Revue internationale sur l'ingénierie des risques industriels (JI-IRI)*, **1** (2) , p. 65-85, (2008) .
- [12] E. Berger, "Review and tutorial - methods of measuring the attenuation of hearing protection devices," *Journal of the Acoustical Society of America*, **79** (6) , p. 1655-1687, (1986) .
- [13] E. Berger, J. Voix, et R. Kieper, "Methods of Developing and Validating a Field-MIRE Approach for Measuring Hearing Protector Attenuation," *Hearing Conservation Conference 2007*, Savannah, GA: (2007) .
- [14] L. Hager, "New technologies are emerging that will provide easy individual fit testing of HPDs," *Occupational Health & Safety*, (2006) .
- [15] A. Kusy, "Affaiblissement acoustique in situ des protecteurs individuels contre le bruit - Étude bibliographique," *Cahier de notes documentaires INRS*, **212** (08) , p. 43-59, (2008) .
- [16] J. Franks, W. Murphy, D. Harris, J. Johnson, et P. Shaw, "Alternative Field Methods for Measuring Hearing Protector Performance," *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, **64** (4) , p. 501-509, (2003) .
- [17] R. Neitzel, S. Somers, et N. Seixas, "Variability of real-world hearing protector attenuation measurements," *Ann. Occup. Hyg.*, **50** (7) , p. 679-691, (2006) .
- [18] W. Murphy, J. Franks, et D. Harris, "Evaluation of a FitCheck Hearing Protector Test System," *Journal of the Acoustical Society of America*, **106** (4, Part 2) , p. 2263, (1999) .
- [19] S. Soli, A. Vermiglio, et V. Larson, "A System for Assessing the Fit of Hearing Protectors in the Field," *Spectrum*, **22** (SUpl 1) , p. 25, (2005) .

- [20] J. Voix et F. Laville, "The objective measurement of individual earplug field performance.," *Journal of the Acoustical Society of America*, **125** (6) , p. 3722-3732, (2009) .
- [21] D. Knaus, A. Dietz, et F. Musiek, "An Objective Method for Measuring the Attenuation of Hearing Protection Devices Using Otoacoustic Emissions," *Journal of the Acoustical Society of America*, **116** (4 Pt.2) , p. 2596, (2004) .
- [22] G. Wilde et L. Humes, "Measurement of the Attenuation Characteristics of Nonlinear Hearing Protective Devices Using the auditory Brain Stem Response," *Journal of the Acoustical Society of America*, **81**, p. 730-733, (1987) .
- [23] J. Zera, K. Kochanek, A. Pilka, et R. Mlynski, "Attenuation of hearing protectors assessed by auditory brainstem response," *Noise at Work 2007.*, Lille, France: (2007) .
- [24] G. Durkt, *Field Evaluations of Hearing Protection Devices at Surface Mining Environments*, Pittsburgh, PA, USA: U. S. Dept. of Labor, Mine Safety and Health Admin, (1993) .
- [25] H. Néglise, M. Gaudreau, J. Voix, et F. Laville, "A preliminary study on the measurement of effective hearing protection device attenuation during a work shift," *Noise at Work 2007*, Lille, France: (2007) .
- [26] D. Chung, R. Hardie, et R. Gannon, "The Performance of Circumaural Hearing Protectors by Dosimetry," *J. Occup. Med.*, **15** (9) , p. 679-682, (1983) .
- [27] R. Goff et W. Blank, "A Field Evaluation of Muff-Type Hearing Protection Devices," *Sound and Vibration*, **18** (10) , p. 16-22, (1984) .
- [28] J. Burks et K. Michael, "A New Best Practice for Hearing Conservation: The Exposure Smart Protector (ESP)," *Proceedings of Noise-Con 2003*, Washington D.C., USA: D. K. Holger and G. C. Maling, Jr., (2003) .
- [29] C. Dixon-Ernst, "Alcoa - Hearing Conservation Program Metrics," *American Industrial Hygiene Conference & Exposition*, Philadelphia, PA, USA: (2007) .
- [30] D. Giardano et G. Durkt, "Evaluation of muff-type hearing protectors as used in a working environment," *AIHA journal*, **57** (3) , p. 264-271, (1996) .
- [31] E. Kotarbinska, E. Kozlowski, et W. Barwicz, "Evaluation of individual exposure to noise when ear-muffs are worn," *Noise at Work 2007*, Lille, France: (2007) .
- [32] E.H. Berger, "Hearing Protector Performance: How They Work - and - What Goes Wrong in the Real World," *E-A-RLog Series of Technical Monographs on Hearing and Hearing Protection*, **5**, p. 1-4, (1980) .
- [33] A. Damongeot, M. Tiserand, G. Krawsky, P. Grosdemange, et D. Lievin, "Evaluation of the comfort of personal hearing protection.," *Personal Hearing Protection in Industry*, New-York: Alberti PW, Raven Press, (1982) , p. 151-162.
- [34] P.M. Arezes et A.S. Miguel, "Hearing protectors acceptability in noisy environments," *Ann. Occup. Hyg.*, **46** (6) , p. 531-536, (2002) .
- [35] J.G. Casali et M.-. Park, "Effects of work conditions simulated in a laboratory environment and wearer fit on attenuation of slow-recovery foam earplugs," *Journal of Sound and Vibration*, **143** (1) , p. 153—165, (1990) .
- [36] J.G. Casali et M. Park, "Attenuation of Four Hearing Protectors Under Dynamic Movement and Different User Fitting Conditions," *Human factors*, **32** (1) , p. 9-25, (1990) .
- [37] W. Williams, "Is it reasonable to expect individuals to wear ear muffs for extended periods ?," *Noise at Work 2007*, Lille, France: (2007) , p. 1317-1322.
- [38] R. Neitzel et N. Seixas, "The Effectiveness of Hearing Protection Among Construction

- Workers,” *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, **2**, p. 227–238, (2005) .
- [39] “Sonomax Hearing Healthcare Inc.”; <http://sonomax.com/>.
- [40] “Matlab: The MathWorks”; <http://www.mathworks.com/>.
- [41] J.S. Bendat et A.G. Piersol, *Random data - Analysis and Measurement Procedures*, Wiley & Sons, (1986) .
- [42] E.H. Berger, “Single number measure of hearing protector noise reduction,” *E-A-RLog Series of Technical Monographs on Hearing and Hearing Protection*, **2**, p. 1-4, (1979) .
- [43] ANSI, “Methods of Estimating Effective A-Weighted Sound Pressure Levels When Hearing Protectors are Worn,” *ANSI S12.68*, (2007) .
- [44] ISO, “Acoustics - Hearing protectors - Part 2: Estimation of effective A-weighted sound pressure levels when hearing protectors are worn,” *ISO 4869-2*, (1994) .
- [45] “Acoustics - Determination of sound immisions from sound sources placed closed to the ears - Part 1: Technique using microphones in real ears (MIRE-technique),” *ISO/DIS 11904-1*, (2000) .
- [46] ANSI, “Standard for the Measurement of Real-Ear Hearing Protector Attenuation and Physical Attenuation of Earmuffs,” *ANSI S3.19*, (1974) .
- [47] E. Berger, “Review and tutorial - methods of measuring the attenuation of hearing protection devices,” *Journal of the Acoustical Society of America*, **79** (6) , p. 1655-1687, (1986) .
- [48] J. Schroeter et C. Poesselt, “The use of acoustical test fixtures for the measurement of hearing protector attenuation. Part II: Modeling the external ear, simulating bone conduction, and comparing test fixture and real-ear data,” *Journal of the Acoustical Society of America*, **79** (4) , p. 505-527, (1986) .
- [49] CSA, “Hearing Protection Devices, Performance, Selection, Care and Use,” *CSA Z94.2-02*, (2002) .

## ANNEXE A. SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES DES ÉQUIPEMENTS UTILISÉS

### ***Doublet microphonique***

Adaptation et assemblage du doublet microphonique : *Sonomax Hearing Healthcare Inc*

Fabricant des microphones : *Knowles Electronics*

Type de microphones : *Condensateur à électret, omnidirectionnel*

Modèle des microphones : *FG3652 (microphone interne)*  
*FG3742 (microphone externe)*

Sensibilité typique : *FG3652: 22mV/Pa ( $\pm 3$ dB)*  
*FG3742: 7mV/Pa ( $\pm 3$ dB)*

Niveau pression maximale (réf. 20 $\mu$ Pa) à un TDH < 3% : *FG3652: 118 dB<sub>crête</sub>*  
*FG3742: 128 dB<sub>crête</sub> (estimé)*

Niveau de bruit de fond : *FG3652: 25 dBA*  
*FG3742: 35 dBA*

Impédance de sortie @ 1kHz: *2,8k $\Omega$  à 6,8k $\Omega$ , typiquement: 4,4k $\Omega$*

Alimentation électrique : *0,9 à 1,6 VDC, 24 $\mu$ A à 50 $\mu$ A*  
*Variation de la sensibilité de 1,5 à 1,2 VDC : -0,2dB*

Coefficient d'humidité (sans condensation) : *FG3652: 0,06dB/%HR*  
*FG3742: 0,16dB/%HR (estimé)*

Effet des vibrations @ 1G, 1kHz : *FG3652: 55dB SPL*  
*FG3742: 65dB SPL (estimé)*

Température d'opération : *-17°C à 63°C*

TDH : taux de distorsion harmonique  
HR : Humidité Relative

### ***Enregistreur numérique***

Fabricant : *EDIROL, modèle R-09*

Traitement des signaux : *convertisseur A/N et N/A: 44,1kHz/48kHz, 24 bits*

Nombre de canaux disponibles : *2 (stéréo)*

Nombre de canaux utilisés : *2 (stéréo)*

Échantillonnage disponible : *44,1kHz/48kHz, 16bits/24 bits*

Échantillonnage utilisé : *44,1kHz, 16bits*

Format de fichier disponible : *WAV (sans compression), MP3*

Format de fichier utilisé : *WAV (sans compression)*

Autonomie de fonctionnement : *6 h30 (2 piles AA, NiMH, 2600mAh)*



Capacité d'enregistrement avec carte SDHC de 4Go : 6h15

Réponse en fréquence : 10Hz-20kHz (-3dB)

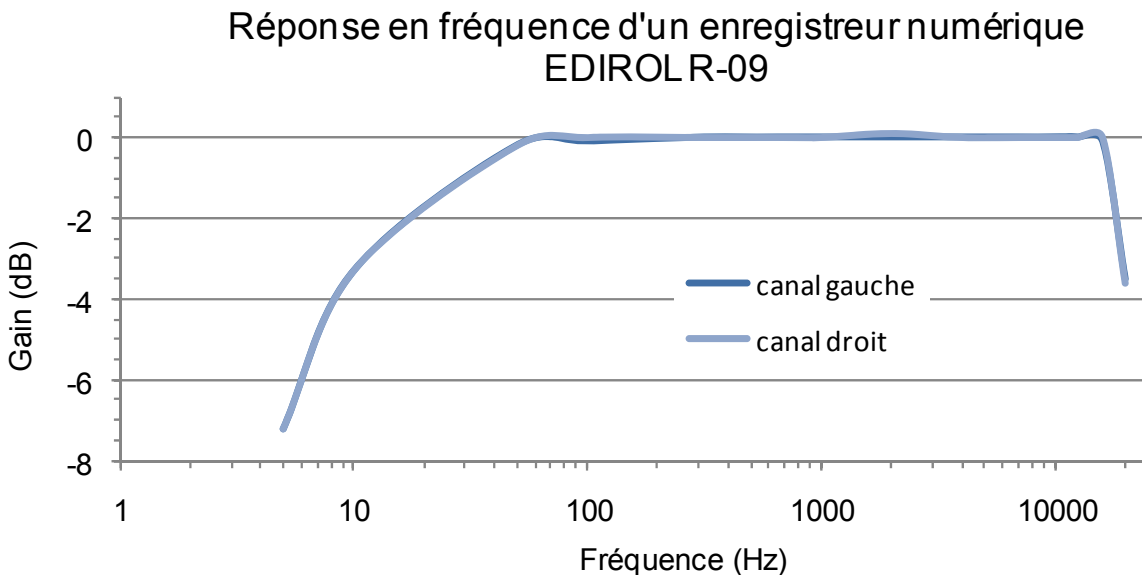
Branchement du doublet microphonique : «Line input»

Impédance d'entrée de «Line input» : 20 k $\Omega$

Port de communication : USB 2.0/1.1 (Mini-B type)

Dimension : 62,6mm de largeur x 102mm de profondeur x 29,1mm de hauteur

Poids : 146 gr



## Source sonore d'étalonnage

Fabricant: Brüel & Kjaer type 4231

Conformité aux normes : EN/IEC 60942 (2003), Class LS and 1, Sound Calibrators  
ANSI S1.40-1984, Specification for Acoustic Calibrators

Niveau sonore : 94,0 dB +0,02 dB réf. 20 $\mu$ Pa

114,0 dB +0,02 dB réf. 20 $\mu$ Pa

Conditions de référence : 23°C  $\pm$ 3°C, 101kPa  $\pm$ 4kPa, 40%HR à 65%HR

Distorsion: < 1%

Stabilité du niveau sonore : cour terme : <0,02 dB

long terme : <0,05 dB

Temps de stabilisation : <5s

Coefficient de température :  $\pm$  0,0015dB/°C

Coefficient de pression :  $8 \times 10^{-4}$  dB/kPa

Coefficient d'humidité : 0,001dB/%RH

Autonomie de fonctionnement : *200h avec piles alcalines*

Dimension : *40mm hauteur x 72 mm largeur x 72mm profondeur*

Poids : *150gr avec piles*

## ANNEXE B. LISTE DES SUJETS AYANT PARTICIPÉ AUX MESURES TERRAIN

Tableau B-1 : Liste des travailleurs ayant participé aux études terrain (deux travailleurs (#21 et #23) ont participé à plus d'un essai)

#	Entreprise	Âge (année)	Sexe	Type de protecteur	Note
1	1	45-50	F	Bouchons moulés	Atténuations du manufacturier non disponibles
2	1	40-45	M	Bouchons moulés	Atténuations du manufacturier non disponibles
3	2	55-60	M	Bouchons moulés	Refus de répondre au questionnaire
4	2	55-60	M	Bouchons moulés	
5	3	30-35	M	Serre-tête	
6	3	35-40	M	Serre-tête	
7	4	55-60	M	Bouchons moulés	
8	4	25-30	F	Bouchons moulés	Atténuations du manufacturier non disponibles
9	4	25-30	F	Bouchons moulés	Atténuations du manufacturier non disponibles
10	5	45-50	M	Bouchons moulés	
11	5	45-50	M	Bouchons moulés	Pas un utilisateur régulier des bouchons moulés Atténuations du manufacturier non disponibles
12	5	45-50	M	Bouchons moulés	Pas un utilisateur régulier des bouchons moulés
13	6	20-25	M	Serre-tête	
14	6	25-30	F	Serre-tête	
15	6	25-30	M	Serre-tête	
16	7	45-50	M	Serre-tête	
17	7	35-40	M	Serre-tête	
18	7	25-30	M	Serre-tête	
19	8		M	Serre-tête	
20	8		M	Serre-tête	
21	8		M	Serre-tête	#21 & 22: même travailleur
22	8		M	Serre-tête	Serre-tête sur casque
23	8		F	Serre-tête	#23, 26 & 27: même travailleur
24	8		M	Serre-tête	
25	8		M	Serre-tête	
26	8		F	Serre-tête	Serre-tête sur casque I
27	8		F	Serre-tête	Serre-tête sur casque II

## ANNEXE C. QUESTIONNAIRE PROPOSÉ AU TRAVAILLEUR À LA FIN DES MESURES

Voici un court questionnaire afin de nous aider à voir si le système d'enregistrement développé pour cette recherche sera suffisamment confortable pour être porté, en situation de travail, pendant une durée de 8 heures.

# du sujet : \_\_\_\_\_ Age : \_\_\_\_\_ Sexe : \_\_\_\_\_

Indiquer votre réponse en cochant la case appropriée	TOUT À FAIT EN ACCORD - 1 -	EN ACCORD - 2 -	EN DÉSACCORD - 3 -	TOUT À FAIT EN DÉSACCORD - 4 -
1. J'ai aimé ma journée de travail aujourd'hui	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2. J'ai trouvé que ma journée s'est déroulée comme une journée de travail normale	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3. Aujourd'hui, j'ai effectué des tâches qui ressemblent à ce que je fais normalement durant une journée de travail	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4. J'ai porté mes protecteurs auditifs durant toute la journée	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5. J'ai porté des protecteurs auditifs plusieurs fois avant aujourd'hui	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6. J'aime porter mes protecteurs auditifs pendant une longue période	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7. J'ai le goût de porter mes protecteurs auditifs durant une longue période	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8. J'ai trouvé que les équipements d'enregistrements ne m'ont pas trop dérangé	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9. En temps normal, je sens que mes protecteurs auditifs se déplacent facilement	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10. J'ai souvent l'impression que j'entends mal les conversations quand je porte mes protecteurs auditifs	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

	TOUT À FAIT EN ACCORD - 1 -	EN ACCORD - 2 -	EN DÉSACCORD - 3 -	TOUT À FAIT EN DÉSACCORD - 4 -
11. Aujourd'hui, j'ai trouvé qu'à cause des équipements d'enregistrement, mes protecteurs se déplaçaient plus souvent	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12. Plusieurs fois aujourd'hui, j'ai enlevé mes protecteurs pour entendre quelqu'un qui me parlait	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
13. Le système accroché à ma taille est assez confortable	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
14. Le système attaché à ma taille est dérangerant	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
15. Je me suis accroché souvent dans le système attaché à ma taille	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
16. Je me suis accroché dans les fils et ça a déplacé mon protecteur auditif	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
17. Globalement, je trouve le système d'enregistrement bien adapté et confortable	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Commentaires : \_\_\_\_\_

---



---



---



---



---



---



---



---



---



---

## ANNEXE D. PROCÉDURES DE CALCUL DES FONCTIONS DE DENSITÉ D'AUTOSPECTRE ET DE SPECTRE CROISÉE

On présente ici la procédure qui permet d'obtenir les fonctions de densité d'autospectre et de spectre croisée nécessaires pour le calcul des niveaux de pression et des fonctions de transfert en bandes tiers d'octave. La procédure est tirée de Bendat et Piersol[41].

On considère deux signaux  $x(t)$  et  $y(t)$  de durée  $T$ .

1. Calcul de la fonction de densité d'autospectre
  - a. Filtrage fréquentiel du signal  $x(t)$  par un filtre passe-bande de largeur  $\Delta f$  centré en  $f_c$  pour obtenir  $x(f_c, \Delta f, t)$ .
  - b. Élévation au carré du signal filtré  $x(f_c, \Delta f, t)$ .
  - c. Moyenne du carré du signal filtré sur la durée  $T$  du signal.
  - d. Division de la valeur moyenne par la largeur de bande  $\Delta f$

La fonction de densité d'autospectre s'écrit donc :

$$G_{xx}(f_c) = \frac{1}{\Delta f T} \int_0^T x^2(f_c, \Delta f, t) dt$$

L'intégrale sur le temps peut se faire facilement de façon numérique pour un signal discrétisé (signal échantillonné).

2. Calcul de la fonction de densité de spectre croisée
  - a. Filtrage fréquentiel des signaux  $x(t)$  et  $y(t)$  par un filtre passe-bande de largeur  $\Delta f$  centré en  $f_c$  pour obtenir  $x(f_c, \Delta f, t)$  et  $y(f_c, \Delta f, t)$ .
  - b. Multiplication des deux signaux filtrés  $x(f_c, \Delta f, t)$  et  $y(f_c, \Delta f, t)$ .
  - c. Multiplication du signal filtré  $x(f_c, \Delta f, t)$  par le signal filtré  $y(f_c, \Delta f, t)$  cette fois déphasé de  $90^\circ$  (noté  $y^0(f_c, \Delta f, t)$ ).
  - d. Moyenne des résultats des étapes b. et c. sur la durée  $T$  du signal.
  - e. Division des valeurs moyennes par la largeur de bande  $\Delta f$

La fonction de densité de spectre croisée s'écrit donc :

$$G_{xy}(f_c) = C_{xy}(f_c) - jQ_{xy}(f_c)$$

avec

$$C_{xy}(f_c) = \frac{1}{\Delta f T} \int_0^T x(f_c, \Delta f, t) y(f_c, \Delta f, t) dt$$

et

$$Q_{xy}(f_c) = \frac{1}{\Delta f T} \int_0^T x(f_c, \Delta f, t) y^0(f_c, \Delta f, t) dt$$

Les intégrales sur le temps peuvent se faire facilement de façon numérique pour des signaux discrétisés (signaux échantillonnés).

## ANNEXE E. LISTE DES INDICATEURS UTILISÉS

On suppose ici que le signal  $x(t)$  réfère, pour une oreille donnée, au signal extérieur (non protégé) et  $y(t)$  au signal intérieur (protégé). Dans le tableau, la fonction  $W(f)$  fait référence à la fonction de pondération fréquentielle désirée, telle que donnée à l'Annexe F (dans le cas où on ne désire pas de pondération, on pose  $W(f) = 1$ ).

Tableau E-1 : Liste des indicateurs acoustiques développés

Appellation	Type	Définition
Niveau extérieur (non protégé)	Spectre	$L_{ext}^W(t, f) = 10 \log_{10} \left( \frac{G_{xx}(t, f) W(f) \Delta f}{4 \times 10^{-10}} \right)$
	Global	$O_{ext}^W(t) = 10 \log_{10} \left( \sum_{i=1}^{N_f} 10^{L_{ext}^W(t, f_i)/10} \right)$
	Balance spectrale	$B(t) = O_{ext}^C(t) - O_{ext}^A(t)$
Niveau intérieur (protégé)	Spectre	$L_{int}^W(t, f) = 10 \log_{10} \left( \frac{G_{yy}(t, f) W(f) \Delta f}{4 \times 10^{-10}} \right)$
	Global	$O_{int}^W(t) = 10 \log_{10} \left( \sum_{i=1}^{N_f} 10^{L_{int}^W(t, f_i)/10} \right)$
Fonctions de transfert	Spectres (valeurs complexes)	$H_0(t, f) = \sqrt{\frac{G_{yy}(t, f)}{G_{xx}(t, f)}}$ $H_1(t, f) = \frac{G_{xy}(t, f)}{G_{xx}(t, f)}$ $H_2(t, f) = \frac{G_{yy}(t, f)}{G_{xy}^*(t, f)}$ $H_3(t, f) = \frac{1}{2}(H_1(t, f) + H_2(t, f))$
Affaiblissement (atténuation) sonore	Réduction sonore ( <i>noise reduction</i> ) Basé sur $H_n$ ( $n=1-3$ )	$NR(t, f) = M_{H_0}(t, f) = -20 \log_{10} ( H_0(t, f) )$ $M_{H_n}(t, f) = -20 \log_{10} ( H_n(t, f) )$



Indices d'affaiblissement	Tiré des affaiblissements mesurés <i>in-situ</i>	$IA_{H_3}(t) = O_{ext}^A(t) - 10 \log \left( \sum_{i=1}^{N_f} 10^{\frac{(L_{ext}^A(t, f_i) - M_{H_3}(t, f_i))}{10}} \right)$
	Tiré des affaiblissements mesurés en laboratoire	$SNR_{Ax}(t) = O_{ext}^A(t) - 10 \log \left( \sum_{i=1}^{N_f} 10^{\frac{(L_{ext}^A(t, f_i) - APV_x(f_i))}{10}} \right)$ $APV_x(f) = m(f) - \alpha(x) s(f)$

## ANNEXE F. FONCTIONS DE PONDÉRATION FRÉQUENTIELLE

Cette annexe donne la procédure pour le calcul de la fonction de pondération fréquentielle  $W(f)$  utilisée pour l'estimation des niveaux globaux.

- Pondération A ( $W(f) = A(f)$ )

$$R_A(f) = \frac{12200^2 f^4}{(f^2 + 20.6^2)(f^2 + 12200^2) \sqrt{(f^2 + 107.7^2)(f^2 + 737.9^2)}}$$

$$A(f) = 10^{\frac{2 + 20 \log_{10}(R_A(f))}{10}}$$

- Pondération C ( $W(f) = C(f)$ )

$$R_C(f) = \frac{12200^2 f^2}{(f^2 + 20.6^2)(f^2 + 12200^2)}$$

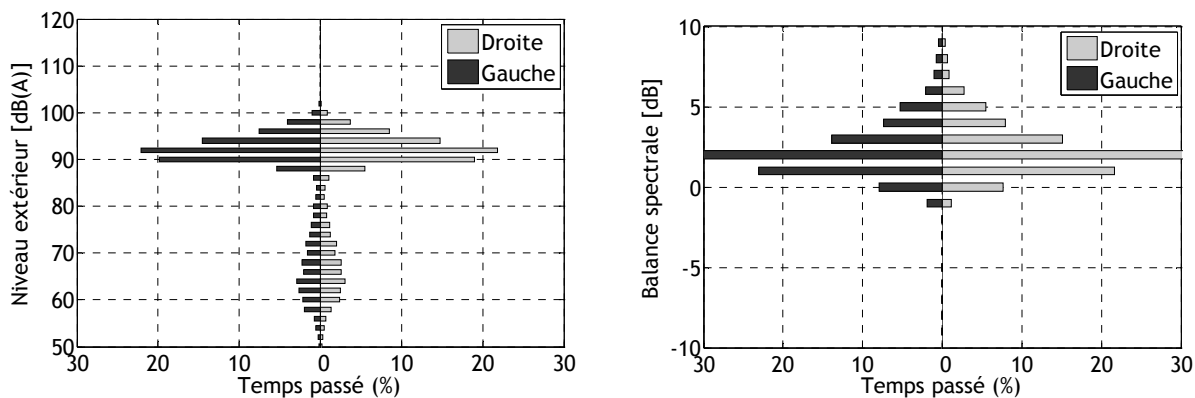
$$C(f) = 10^{\frac{0.06 + 20 \log_{10}(R_C(f))}{10}}$$

## ANNEXE G. DONNÉES D'AFFAIBLISSEMENTS MOYENS FOURNIES PAR LES MANUFACTURIERS

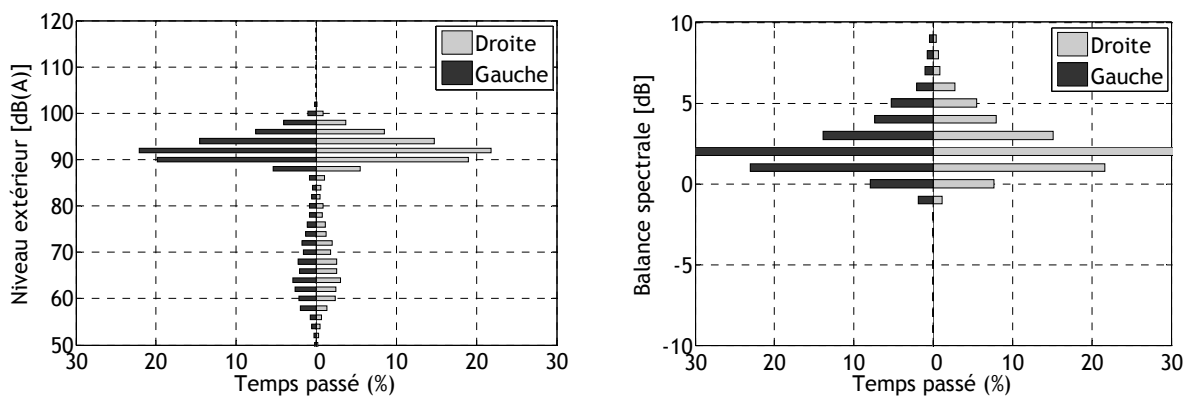
Tableau G-1 : Données d'affaiblissements, telles qu'obtenues des manufacturiers (certaines valeurs ne sont pas disponibles pour les bandes de fréquences de 3150 et 6300 Hz)

Fréquence (Hz)		125	250	500	1000	2000	3150	4000	6300	8000	
Bouchon générique	m	<b>28.9</b>	<b>26.8</b>	<b>27.8</b>	<b>26.0</b>	<b>33.4</b>	<b>38.2</b>	<b>32.9</b>	<b>32.9</b>	<b>40.5</b>	
	$\sigma$	5.3	5.7	5.3	3.6	2.9	5.2	4.3	4.7	4.2	
Travailleur #3	G	m	<b>25.1</b>	<b>23.3</b>	<b>21.9</b>	<b>26.6</b>	<b>22.7</b>		<b>32.6</b>		<b>49.9</b>
		$\sigma$	6.8	7.3	7.2	6.3	7.4		7.5		6.8
	D	m	<b>34</b>	<b>33</b>	<b>33</b>	<b>38.6</b>	<b>38</b>		<b>39</b>		<b>50.7</b>
		$\sigma$	6.8	7.3	7.2	6.3	7.4		7.5		6.8
Travailleur #4	G	m	<b>32.3</b>	<b>26.9</b>	<b>28.9</b>	<b>25.8</b>	<b>34.6</b>		<b>39.1</b>		<b>47.9</b>
		$\sigma$	6.8	7.3	7.2	6.3	7.4		7.5		6.8
	D	m	<b>31.2</b>	<b>26.6</b>	<b>27.9</b>	<b>25.8</b>	<b>33.7</b>		<b>38.7</b>		<b>48.3</b>
		$\sigma$	6.8	7.3	7.2	6.3	7.4		7.5		6.8
Travailleur #7	G	m	<b>32.5</b>	<b>28.4</b>	<b>29.2</b>	<b>28.6</b>	<b>34.7</b>		<b>39.6</b>		<b>45.2</b>
		$\sigma$	6.8	7.3	7.2	6.3	7.4		7.5		6.8
	D	m	<b>31.3</b>	<b>28.3</b>	<b>28.4</b>	<b>27.8</b>	<b>29.9</b>		<b>40.4</b>		<b>44.6</b>
		$\sigma$	6.8	7.3	7.2	6.3	7.4		7.5		6.8
Travailleur #10	G	m	<b>23.9</b>	<b>20.3</b>	<b>21.8</b>	<b>22.5</b>	<b>30.8</b>		<b>46.5</b>		<b>39.0</b>
		$\sigma$	9.2	9.2	8.2	6.4	7.6		8.9		9.6
	D	m	<b>24.9</b>	<b>21.4</b>	<b>23.8</b>	<b>21.1</b>	<b>30.4</b>		<b>47.4</b>		<b>41.6</b>
		$\sigma$	9.2	9.2	8.2	6.4	7.6		8.9		9.6
Travailleur #12	G	m	<b>37.4</b>	<b>34.2</b>	<b>35.5</b>	<b>34.2</b>	<b>37.1</b>		<b>41.8</b>		<b>43.7</b>
		$\sigma$	6.8	7.3	7.2	6.3	7.4		7.5		6.8
	D	m	<b>37.5</b>	<b>34.2</b>	<b>34.3</b>	<b>28.9</b>	<b>41.0</b>		<b>41.9</b>		<b>47.7</b>
		$\sigma$	6.8	7.3	7.2	6.3	7.4		7.5		6.8
Oris Mustang EM-4155	m	<b>16.4</b>	<b>18.4</b>	<b>26.2</b>	<b>35.9</b>	<b>35.2</b>	<b>35.5</b>	<b>36.5</b>	<b>35.3</b>	<b>34.4</b>	
	$\sigma$	2.5	2.3	2.2	3	1.7	1.6	1.5	1.9	2.4	
Peltor H7A	m	<b>15.5</b>	<b>24.5</b>	<b>35.3</b>	<b>40</b>	<b>36.9</b>	<b>39.3</b>	<b>37.5</b>	<b>37.7</b>	<b>39.1</b>	
	$\sigma$	3	2	2.4	2.8	2.6	2.8	3.2	2.7	3.9	
Bilsom Thunder T3	m	<b>24.7</b>	<b>29.8</b>	<b>35.5</b>	<b>38.5</b>	<b>37.9</b>	<b>39.6</b>	<b>39.6</b>	<b>41.9</b>	<b>42.3</b>	
	$\sigma$	2.8	2.7	2.8	3	2.5	3.1	2.4	2.6	2.4	
Bilsom Thunder T3H	m	<b>23.6</b>	<b>27.7</b>	<b>34.1</b>	<b>34.5</b>	<b>32.9</b>	<b>36.4</b>	<b>39.1</b>	<b>40.6</b>	<b>41.4</b>	
	$\sigma$	3.3	3.4	3.1	1.8	2	2.6	3	3.1	2.8	

## ANNEXE H. HISTOGRAMMES DES NIVEAUX NON PROTÉGÉS ET DES BALANCES SPECTRALES

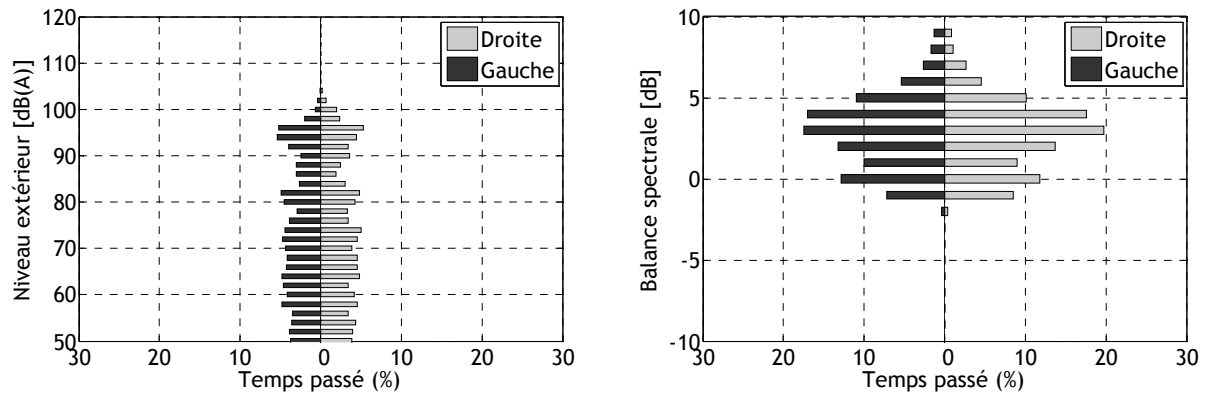


(a)

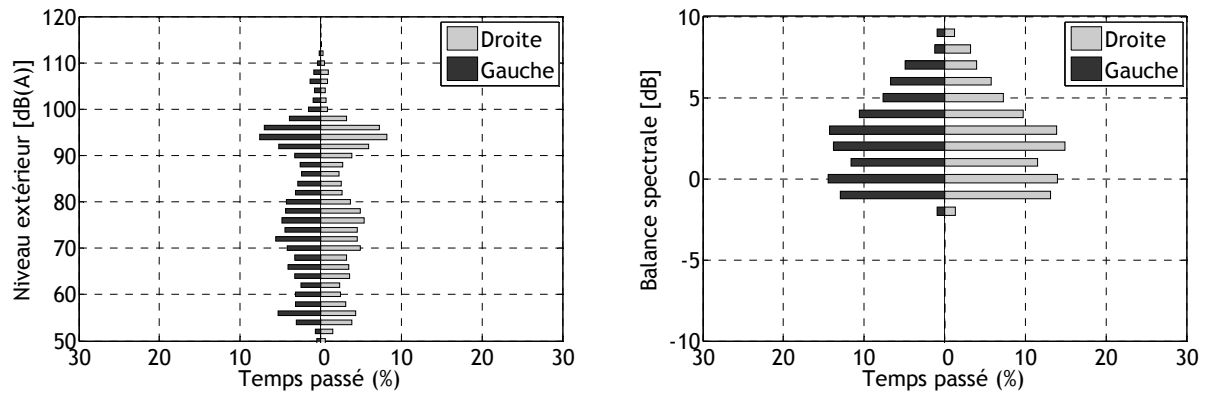


(b)

Figure H-1 : Niveaux non protégés et balances spectrales pour l'usine 1 ((a) : travailleur #1; (b) : travailleur #2)

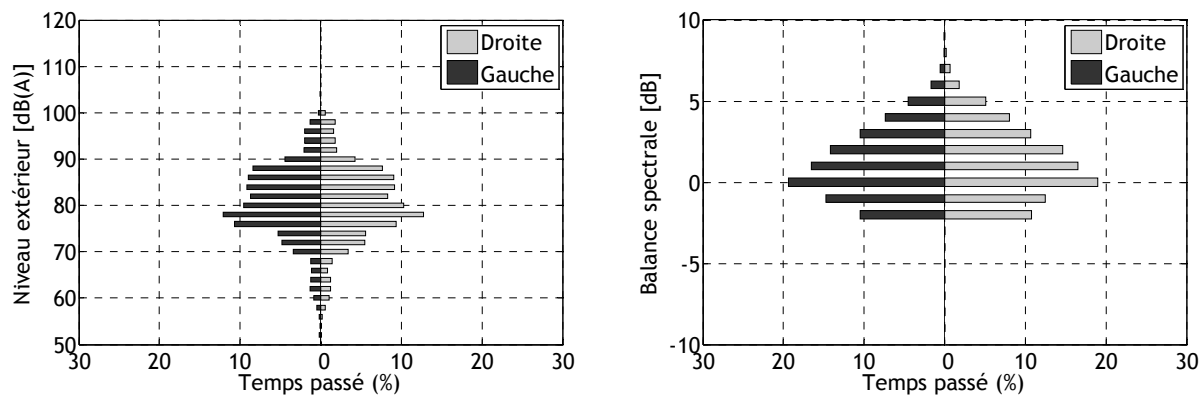


(a)

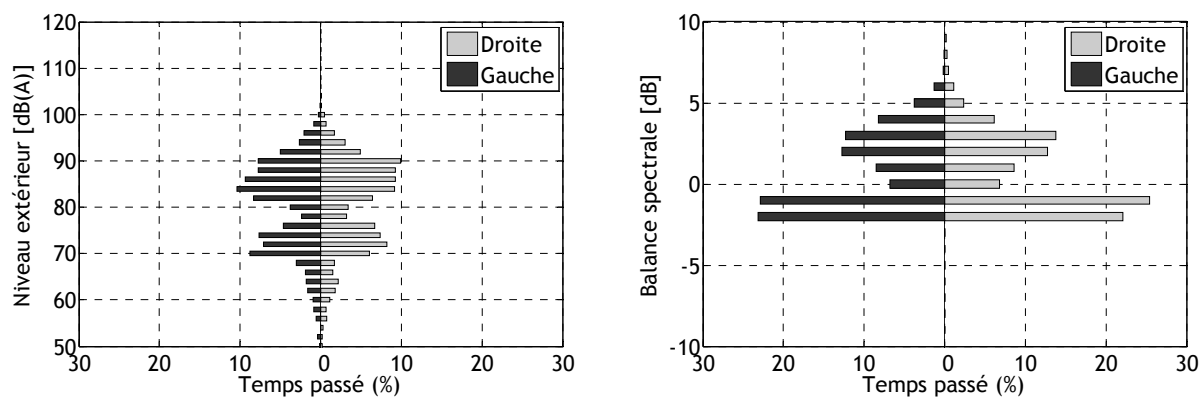


(b)

Figure H-2: Niveaux non protégés et balances spectrales pour l'usine 2 ((a) : travailleur #3; (b) : travailleur #4)

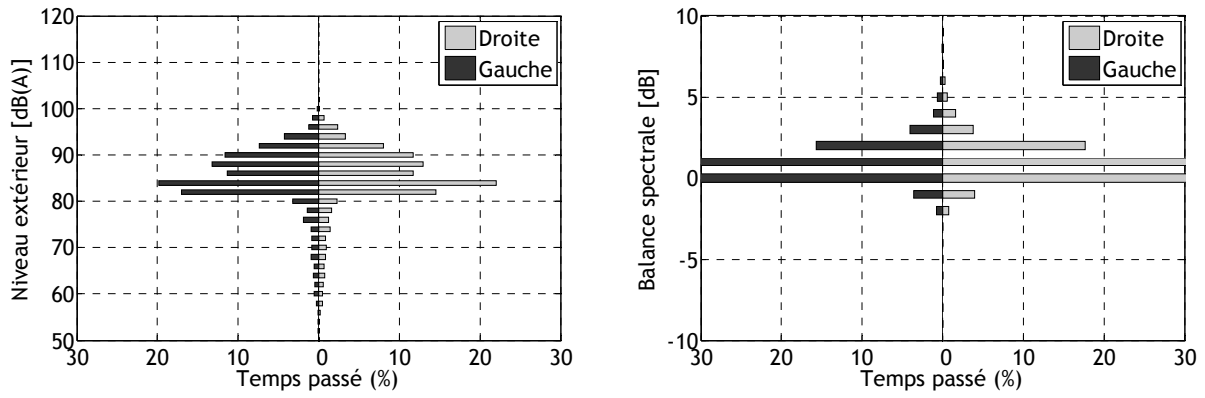


(a)

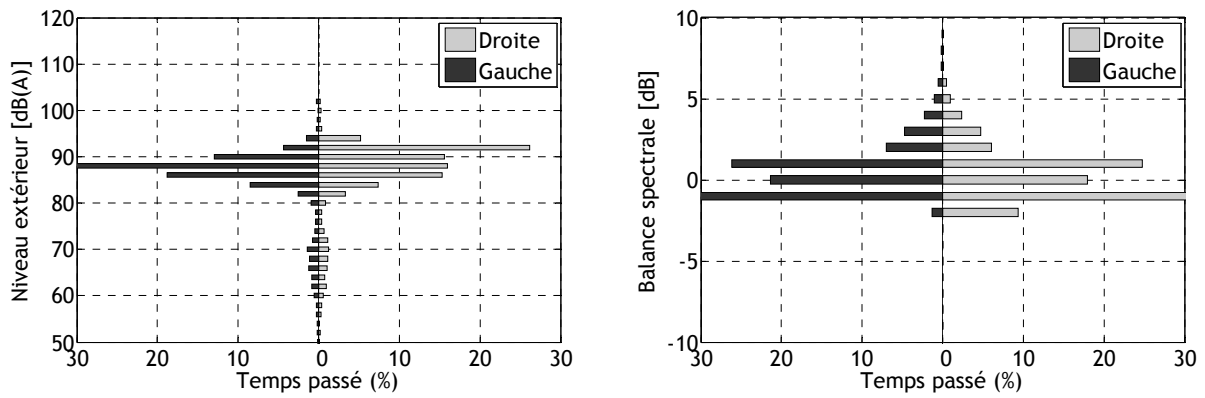


(b)

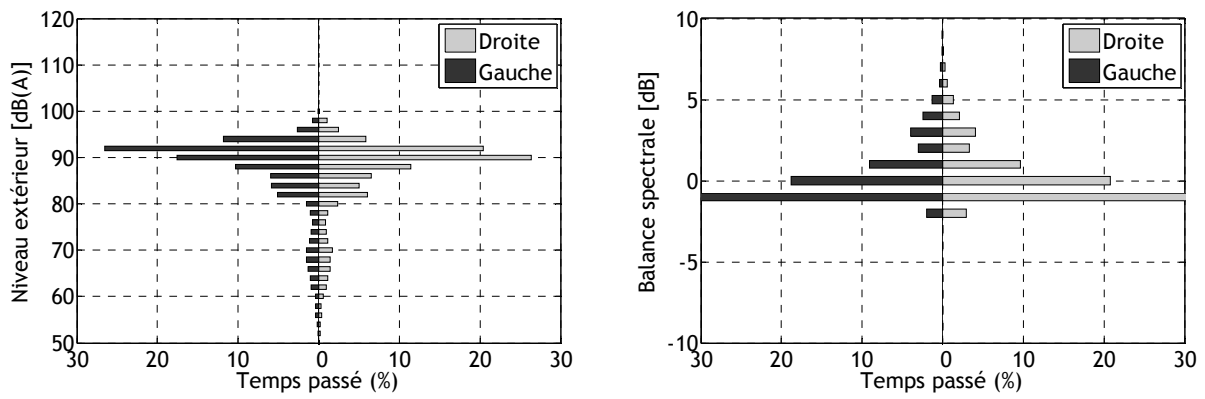
Figure H-3 : Niveaux non protégés et balances spectrales pour l'usine 3 ((a) : travailleur #5; (b) : travailleur #6)



(a)

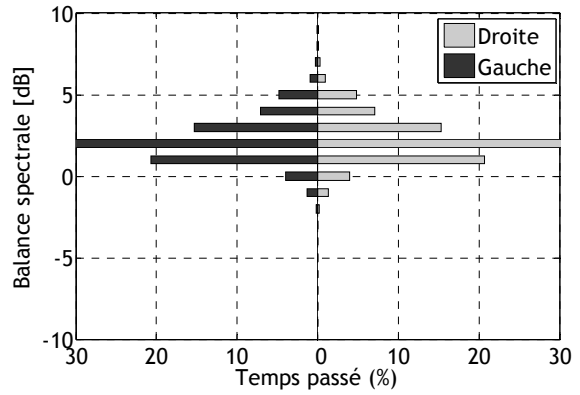
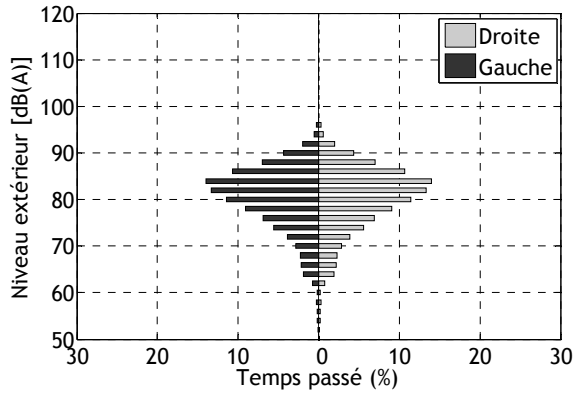


(b)

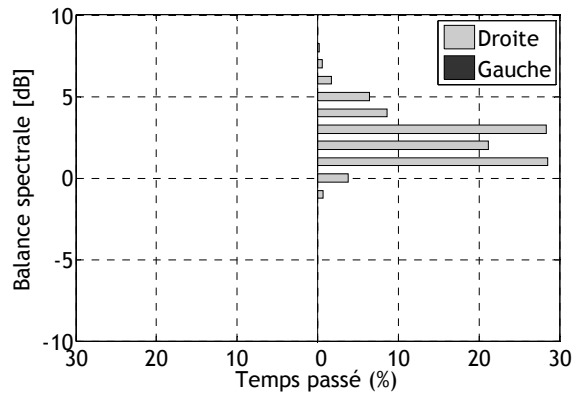
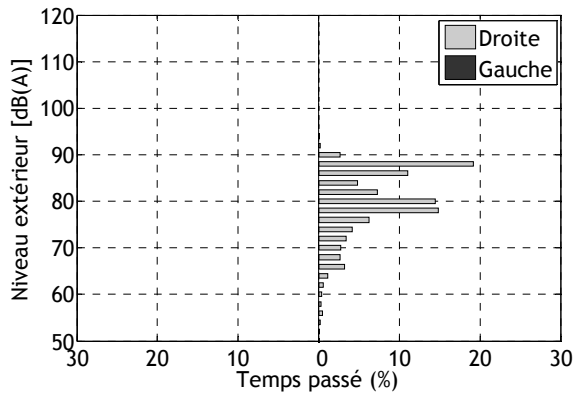


(c)

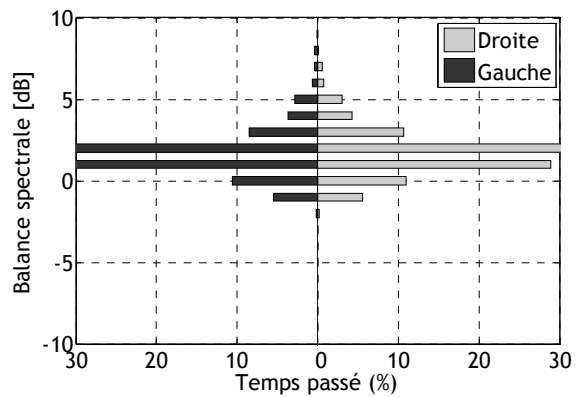
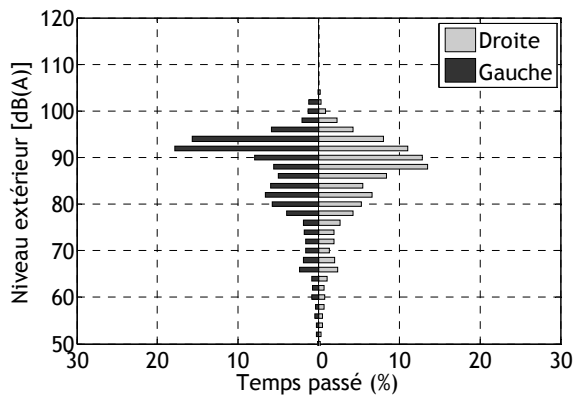
Figure H-4 : Niveaux non protégés et balances spectrales pour l'usine 4 ((a) : travailleur #7; (b) : travailleur #8; (c) : travailleur #9)



(a)



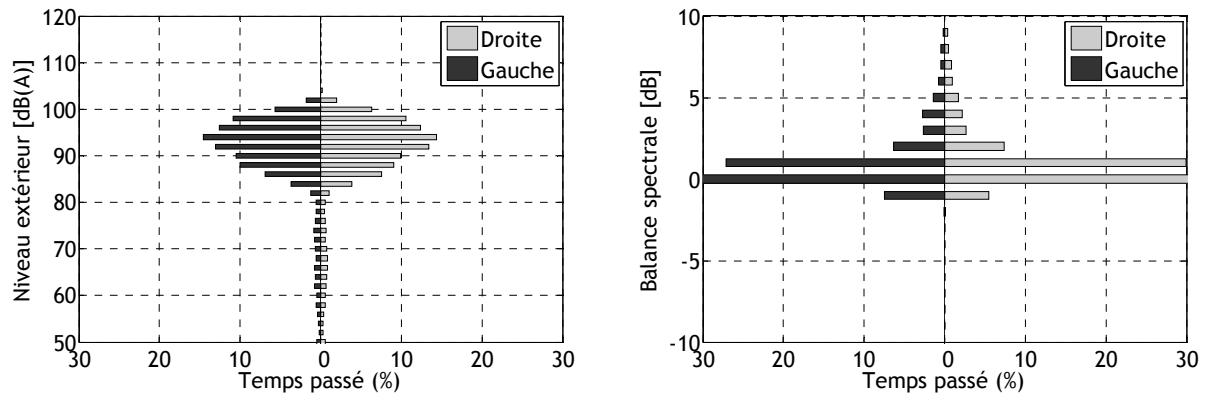
(b)



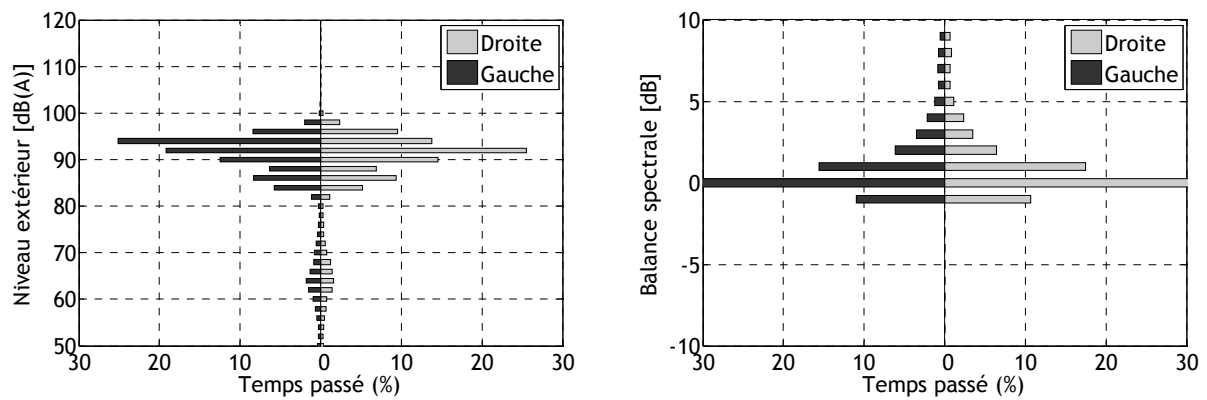
(c)

Figure H-5 : Niveaux non protégés et balances spectrales pour l'usine 5 ((a) : travailleur #10; (b) : travailleur #11; (c) : travailleur #12)

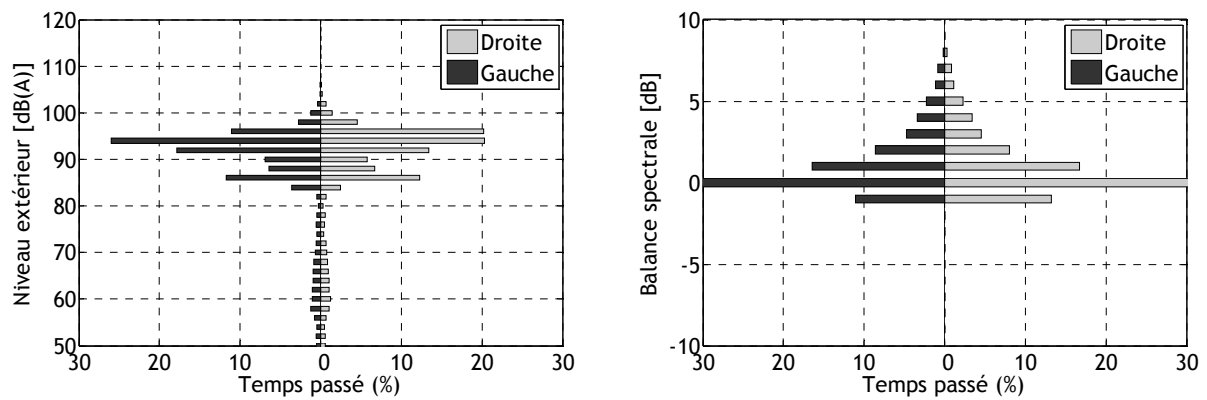




(a)

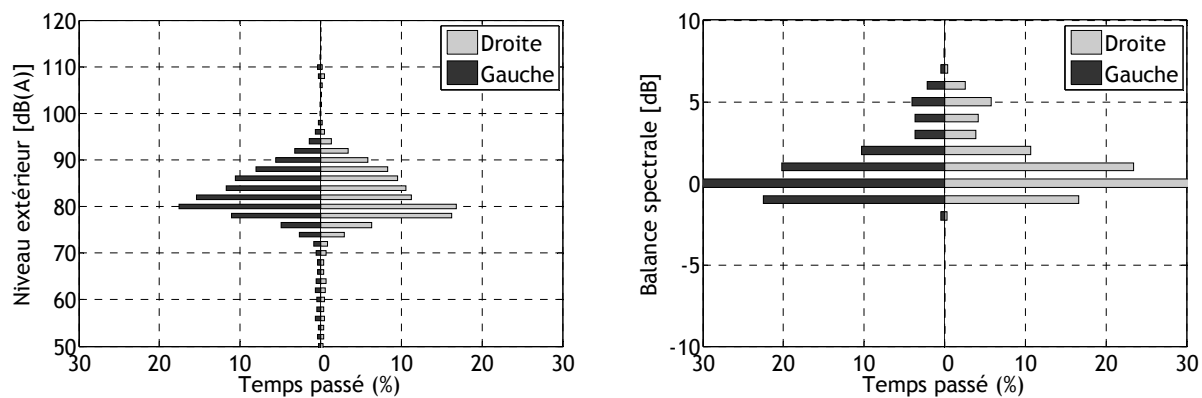


(b)

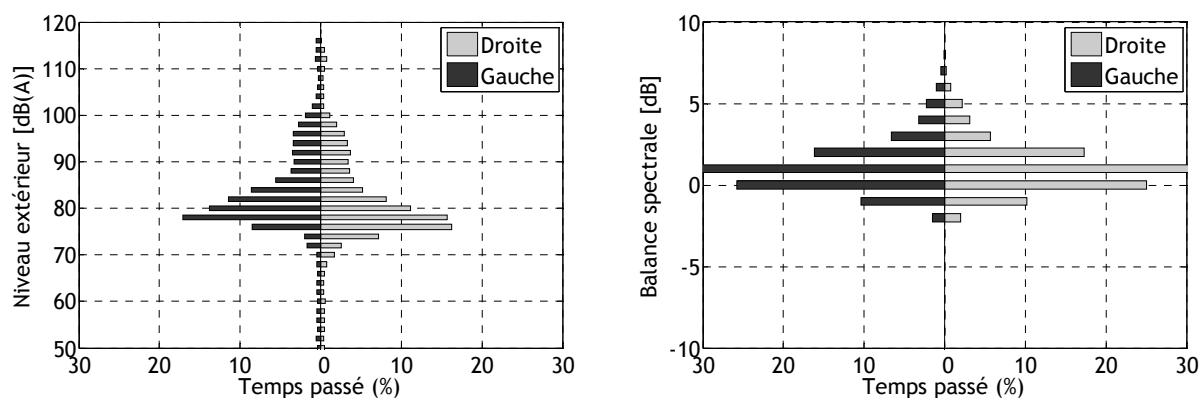


(c)

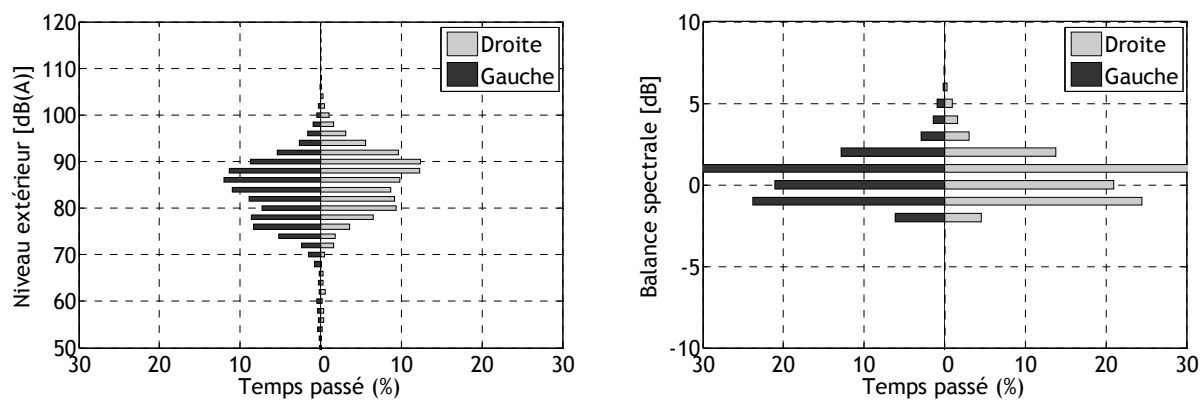
Figure H-6 : Niveaux non protégés et balances spectrales pour l'usine 6 ((a) : travailleur #13; (b) : travailleur #14; (c) : travailleur #15)



(a)

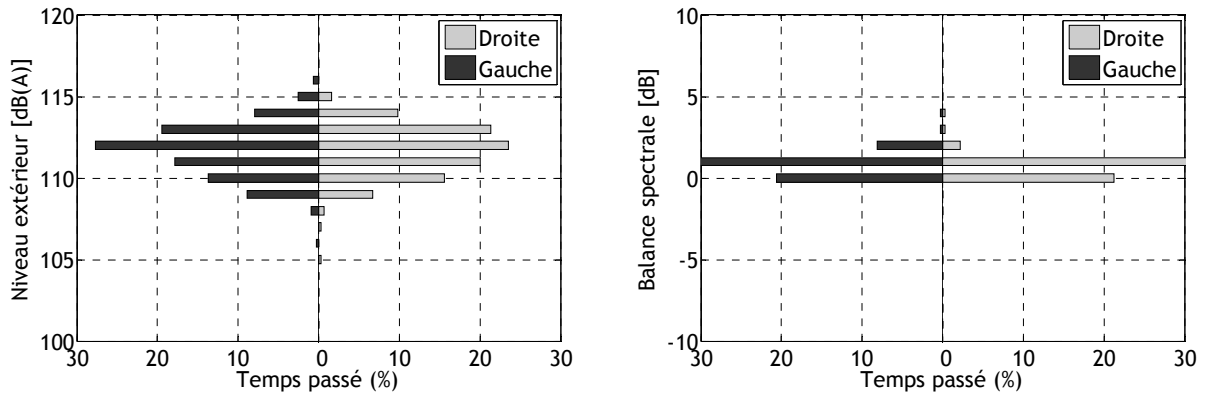


(b)

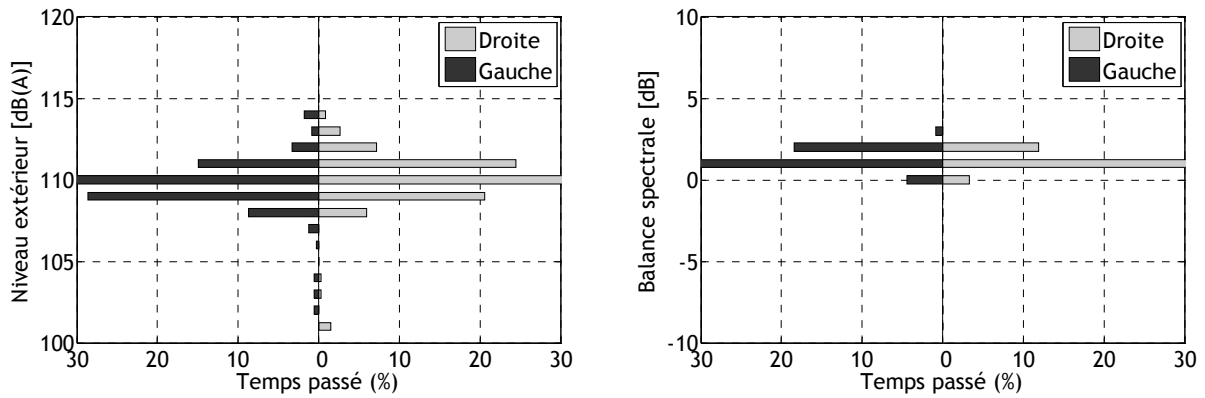


(c)

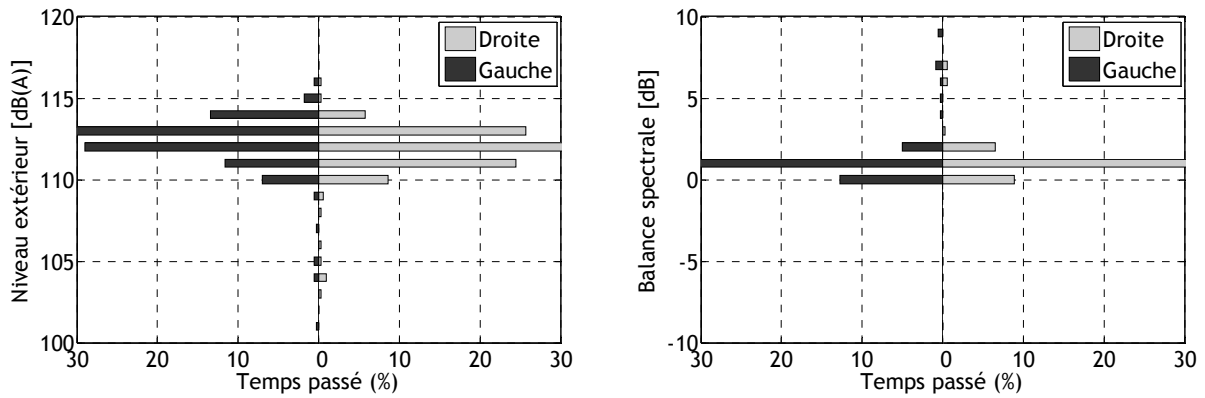
Figure H-7 : Niveaux non protégés et balances spectrales pour l'usine 7 ((a) : travailleur #16; (b) : travailleur #17; (c) : travailleur #18)



(a)

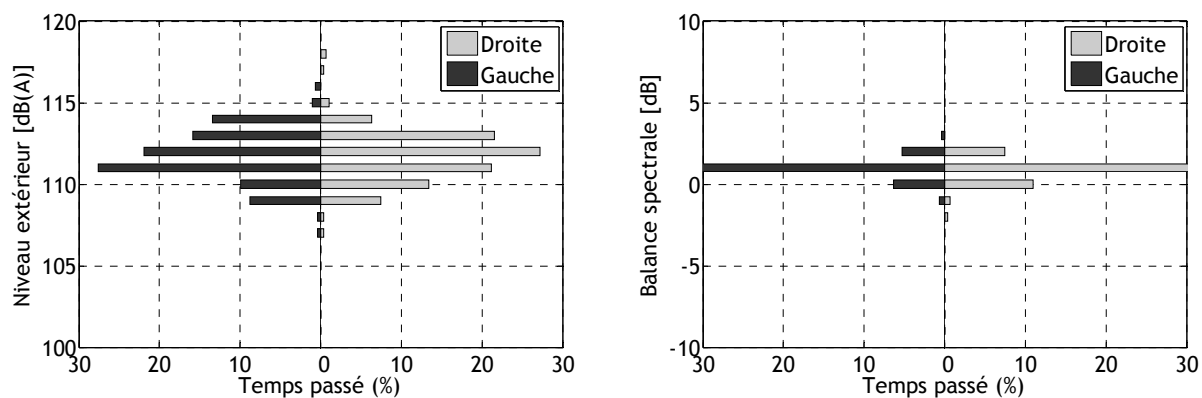


(b)

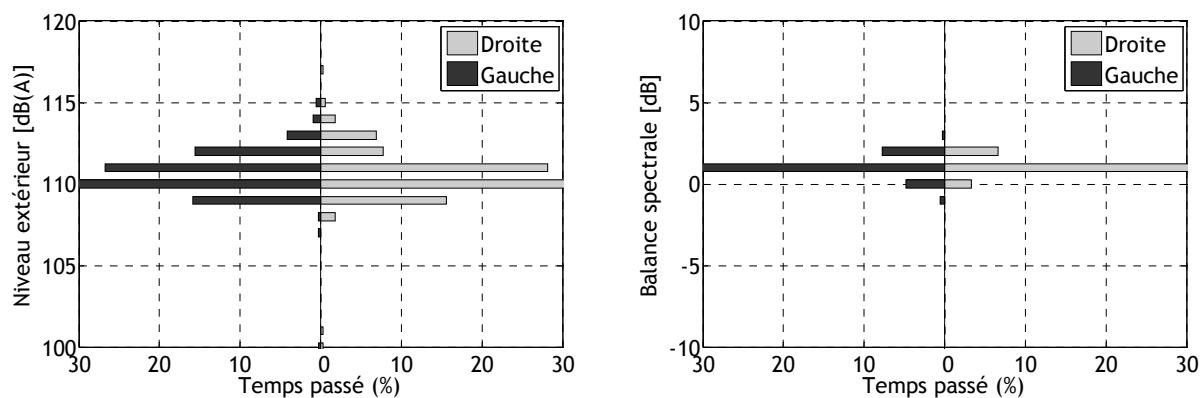


(d)

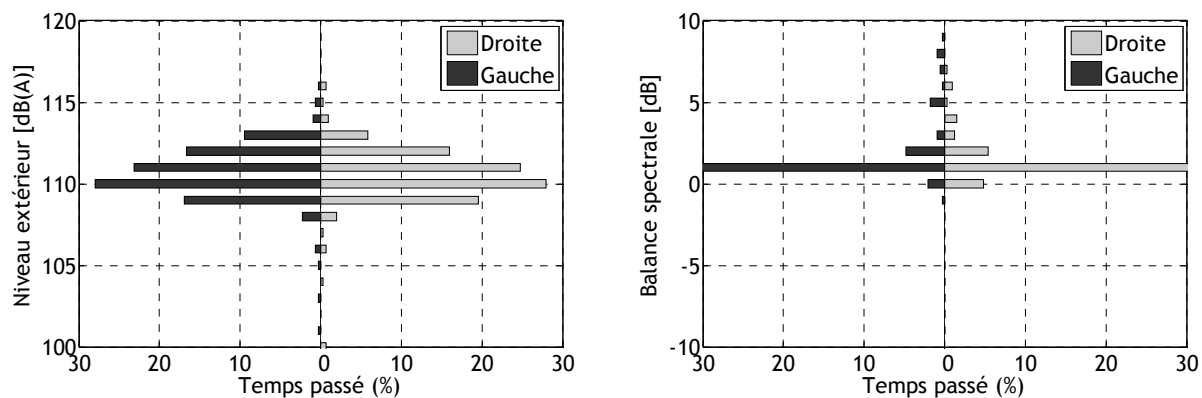
Figure H-8 : Niveaux non protégés et balances spectrales pour l'usine 8 ((a) : travailleur #19; (b) : travailleur #20; (c) : travailleur #21)



(a)

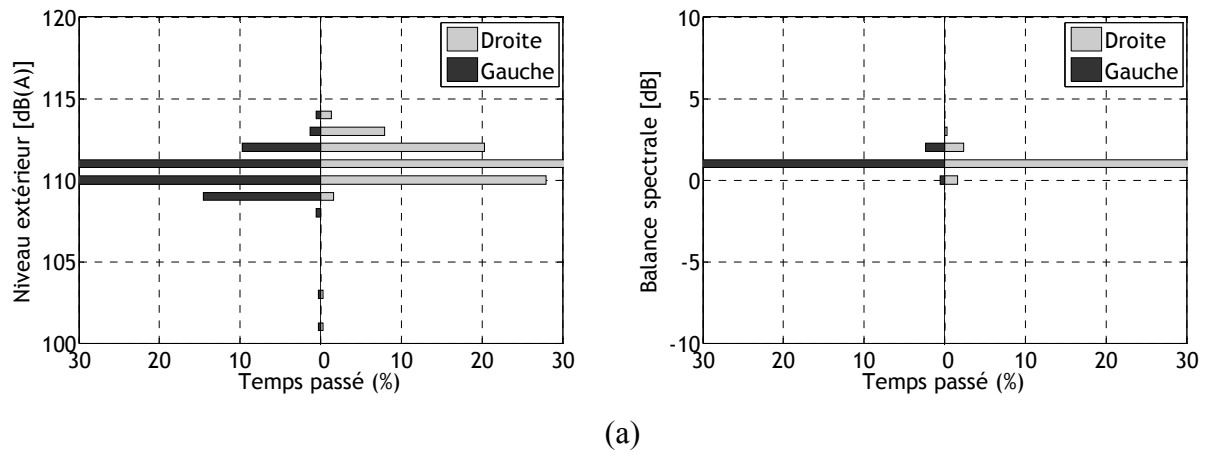


(b)

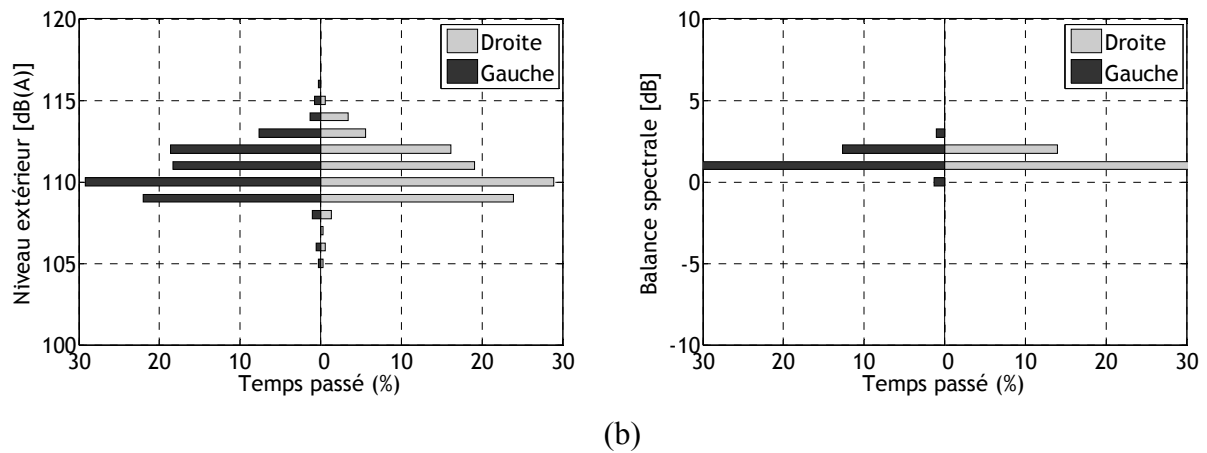


(c)

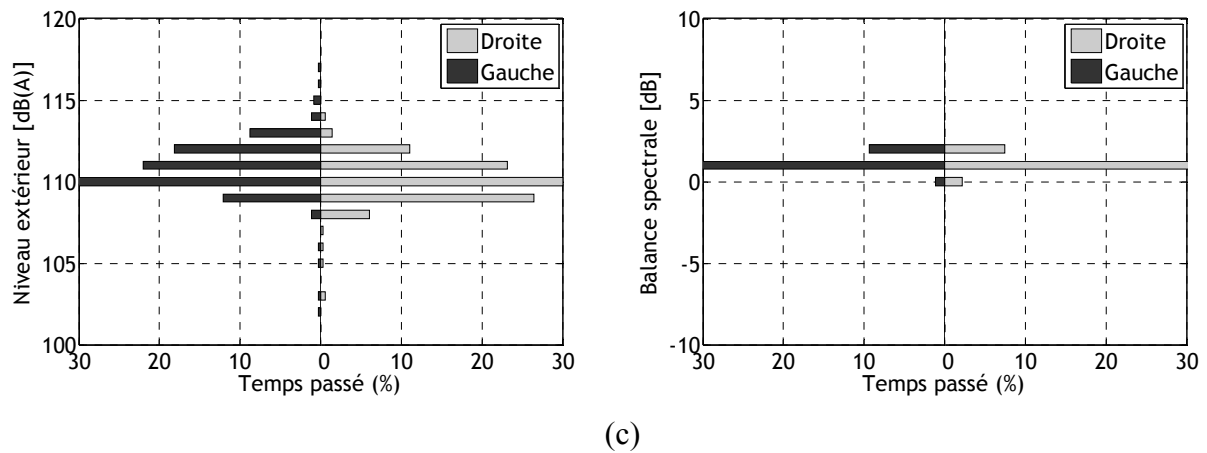
Figure H-9 : Niveaux non protégés et balances spectrales pour l'usine 8 ((a) : travailleur #22; (b) : travailleur #23; (c) : travailleur #24)



(a)



(b)



(c)

Figure H-10 : Niveaux non protégés et balances spectrales pour l'usine 8 ((a) : travailleur #25; (b) : travailleur #26; (c) : travailleur #27)