



**UNIVERSITÉ
DE LORRAINE**

**BIBLIOTHÈQUES
UNIVERSITAIRES**

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact bibliothèque : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr
(Cette adresse ne permet pas de contacter les auteurs)

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

Ecole Doctorale BioSE (Biologie-Santé-Environnement)

Thèse

Présentée et soutenue publiquement pour l'obtention du titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LORRAINE

Mention : « Sciences de la Vie et de la Santé »

par Thomas VENET

Évaluation de la fatigue auditive chez des sujets exposés à de la musique amplifiée : recherche d'indicateurs d'exposition pertinents.

27/06/2022

Membres du jury :

Rapporteurs :	Paul AVAN	Professeur, CERIAH Institut de l'Audition, Paris
	Jing WANG	Professeure, INM INSERM U1051, Montpellier
Examineurs :	Patrick CHEVRET	Docteur, Chef du laboratoire acoustique au travail, INRS
	Joël DUCOURNEAU	Professeur, LEMTA UMR 7563, Université de Lorraine
	Diane LAZARD	Docteur, INSERM – UA06, Institut de l'Audition, Paris
	Benoît POUYATOS	Docteur, responsable du laboratoire ototoxicité et neurotoxicité, INRS (co-directeur de thèse)
	Cécile RUMEAU	Professeure, EA 3450 DevAH Université de Lorraine
Membres invités:	Pierre CAMPO	Docteur, chef de département toxicologie et biométrie, INRS (Directeur de thèse)
	Angélique DUCHEMIN	Directrice AGI-SON, Paris

DevAH EA 3450 – Développement, Adaptation et Handicap, Régulations cardio-respiratoires et de la motricité, Université de Lorraine - 9 Avenue de la Forêt de Haye CS 50184 - 54505 Vandœuvre-lès-Nancy

Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS), Département Toxicologie et Biométrie, 1 rue du Morvan - CS 60027 - 54519 Vandœuvre-lès-Nancy

Remerciements

En premier lieu, je veux remercier les Pr Jing WANG et Paul AVAN pour l'honneur qu'ils me font en acceptant d'être rapporteurs de ma thèse. Je remercie aussi la Pr Cécile RUMEAU et le Dr Patrick CHEVRET pour leur implication et leur expertise au sein du comité de suivi de thèse durant ces trois années ainsi que leur engagement dans le jury de thèse en tant qu'examinateurs. Je suis également honoré par la présence des Pr Cécile PARIETTY-WINKLER et Joël DUCOURNEAU ainsi que de la Dr Diane LAZARD en tant qu'examinatrice dans le jury de thèse. Enfin, je suis heureux de la présence d'Angélique DUCHEMIN en tant qu'invitée.

Je remercie tout particulièrement le Dr Pierre CAMPO qui, bien avant l'encadrement de ma thèse m'a guidé depuis bientôt 15 ans dans ce travail particulier qu'est la recherche expérimentale. Il a su m'inciter et me motiver pour évoluer, exprimer d'avantage mes capacités. Je suis donc profondément reconnaissant de l'esprit de recherche que Pierre a su me transmettre et d'avoir cru en mon potentiel avant moi.

Je tiens également à remercier le Dr Benoit POUYATOS qui a co-encadré ma thèse tout en étant mon responsable de laboratoire. Par sa disponibilité et son implication, Benoit a su me conseiller et me soutenir dans les phases clef de la thèse. Il a également participé aux interventions sur le terrain, n'hésitant pas à sacrifier des nuits pour suivre des volontaires lors de concerts.

Je remercie la direction de l'INRS qui m'a soutenu au cours de mes projets et qui m'a permis de mener sereinement ce travail de thèse. Je remercie Pierre DANIERE qui m'a accueilli à l'INRS, il y a maintenant bien longtemps, et qui m'a judicieusement conseillé pour orienter mon parcours.

Naturellement, je remercie chaleureusement mes collègues, les ONEs, Aurélie THOMAS, Stéphane BOUCARD, Lise MERLEN, Ludivine WATHIER qui m'ont accompagné lors des interventions tard dans la nuit pour la gloire de la science. Merci encore à Aurélie, pour le déminage du manuscrit ;-).

Je tiens à remercier Thierry BOULANGER, médecin du travail au CMB devenu Thalie Santé qui est à l'origine du projet d'étude et avec qui il est toujours plaisant de travailler. J'espère que nous pourrons poursuivre cette belle collaboration.

Enfin, je veux faire part de ma profonde gratitude à Annie mon épouse et mes enfants Noé, Lucie et Margot auprès de qui j'ai puisé des ressources au cours de ce travail de longue haleine.

Avant d'être un point de départ, ce travail de thèse est le résultat d'un parcours professionnel.

Enfin, je voudrais partager cette Réflexion d'un observateur de la nature, Malicorne (1990), qui exprime à la fois mon goût pour la contemplation de la nature et le plaisir d'en connaître les mystères.

Est-ce que la science en expliquant les couchers de soleil, tue leur magie ?

Hubert Reeves

Sommaires

Liste des abréviations.....	7
Liste des unités.....	8
Liste des figures.....	9
Liste des tableaux.....	13
1 Introduction générale.....	15
2 Rappels physiologiques	17
2.1 Oreille externe et moyenne.....	17
2.2 Oreille interne.....	21
2.2.1 Cellules ciliées externes	22
2.2.2 Cellules ciliées internes	25
2.3 Voies auditives et complexe auditif central	25
2.3.1 Systèmes efférents.....	26
2.3.2 Système afférent	26
3 Réflexes auditifs	29
3.1 Réflexe de l'oreille interne	29
3.2 Réflexe oreille moyenne	29
4 La fatigue auditive	31
4.1 Mécanismes de la fatigue auditive	31
4.1.1 Cellules piliers et implantation des stéréocils des CCE dans la membrane tectoriale	31
4.1.2 Raccourcissement du clou des stéréocils.....	32
4.1.3 Amplificateur cochléaire	33
4.1.4 Excitotoxicité glutamatergique	35

4.1.5	Neuropathie périphérique des fibres nerveuses auditives.....	38
4.1.6	Sensibilité des types de fibres afférentes aux expositions sonores.....	40
4.1.7	Plasticité du système auditif central	43
4.2	Innocuité de la fatigue ?	44
5	Évaluation de la fatigue auditive	46
6	Objectifs	48
7	Matériels et méthodes.....	50
7.1	Cohorte de volontaires	51
7.2	Questionnaire	53
7.3	Mesures auditives.....	54
7.3.1	Mesure du seuil de perception par audiométrie tonale liminaire (ATL)	54
7.3.2	Mesures du seuil du réflexe acoustique par ECHOSCAN®	55
7.3.3	Evaluation de la fatigue auditive	61
7.4	Mesure d'exposition sonore	62
7.4.1	Gestion des données	63
7.5	Analyse des données	64
7.5.1	Gestion des données censurées.....	64
7.5.2	Analyse des données entre groupes	65
7.5.3	Modélisation de la fatigue auditive : méthodologie de sélection des variables explicatives	65
7.5.4	Analyse factorielle	69
7.5.5	Modélisation de la fatigue auditive : régression linéaire.....	71
7.5.6	Modélisation de la fatigue auditive : validation du modèle	72
7.5.7	Modèle sur une sélection de variables	73
7.5.8	Cinétique de récupération de la fatigue	74
8	Résultats	75

8.1	Questionnaires.....	75
8.1.1	Répartition de la population	76
8.1.2	Perception de l'exposition et du risque auditif.....	77
8.1.3	Port de protection auditive individuelle	78
8.1.4	Perception par les volontaires de leur propre audition.....	80
8.1.5	Perception de l'intensité de la journée	83
8.2	Performances auditives en début de poste	83
8.2.1	Audiométrie tonale population entière	84
8.2.2	Seuil du réflexe acoustique population entière	85
8.3	Homogénéité des groupes Musique et Témoin	87
8.4	Troubles auditifs déclarés et performances auditives au repos	87
8.5	Exposition sonore	88
	Les indicateurs réglementaires de l'exposition sonore	88
8.5.1	Indicateurs réglementaires de l'exposition sonore.....	89
8.5.2	Autres indicateurs d'exposition	95
8.6	Fatigue auditive en fin de poste de travail	100
8.6.1	Fatigue auditive mesurée par audiométrie tonale	100
8.6.2	Fatigue auditive mesurée par ECHOSCAN®	101
8.7	Modélisation de la fatigue auditive.....	103
8.7.1	Analyse factorielle	103
8.7.2	Modèle de la fatigue mesurée par audiométrie tonale.....	105
8.7.3	Exemples de modèles utilisant les indicateurs d'expositions mesurés	114
8.8	Récupération de la fatigue auditive	116
9	Discussion.....	118
9.1	Population et limitations dans l'analyse des données	118
9.2	Exposition sonore	118

9.3	Fatigue auditive	121
9.4	Prévention du risque auditif	128
10	Conclusion et perspectives.....	133
11	Références bibliographiques.....	137
12	Annexes	147

Liste des abréviations

ABR	Réponse auditive du tronc cérébral (Auditory Brainstem Response)
ATL	Audiométrie tonale liminaire
Δ ATL	Variation du seuil auditif mesuré par ATL
CCE	Cellules ciliées externes
CCI	Cellule ciliées internes
GABA	Méiateur inhibiteur de la transmission synaptique (Gamma-aminobutyrique acide)
L_{xx}	Quantile des niveaux sonores (ie. L_{10} niveau sonore dépassé durant 10% du temps)
L_{Aeq}	Niveau sonore équivalent pondéré A
L_{eq}	Niveau sonore équivalent
$L_{EX,8h}$	Dose de bruit journalière, niveau équivalent pour une journée normalisée de 8 h
$L_{p,Cpeak}$	Pression acoustique de crête pondéré C
MAE	Erreur moyenne absolue
PAC	Potentiel d'action composite des voies auditives
PDA	Produit de distorsion acoustique (otoémission)
PICB	Protecteur individuel contre le bruit
PTS	Variation permanente du seuil auditif (permanent threshold shift)
R^2	Coefficient de corrélation d'une régression
RMSE	Erreur quadratique moyenne (root mean square error)
ROM	Réflexe de l'oreille moyenne
Sd	Écart type
SRA	Seuil de déclenchement du réflexe acoustique
Δ SRA	Variation du seuil de déclenchement du réflexe acoustique
TTS	Variation temporaire du seuil auditif (temporary threshold shift)

Liste des unités

dB	Décibel, niveau sonore non pondéré (référence 20 μ Pa)
dB(A)	Décibel, niveau sonore calculé avec la pondération fréquentielle A
dB(C)	Décibel, niveau sonore calculé avec la pondération fréquentielle C
dB HL	Décibel, niveau sonore en référence à la courbe normalisée de la perception auditive d'une population jeune ayant une audition normale (ISO 389-2)
h	heure
h:mm	heure et minute
Hz	Hertz, fréquence d'un son
kHz	Kilohertz

Liste des figures

Figure 1 : Schéma de l'oreille humaine	18
Figure 2 : Seuils de sensibilité auditive chez l'Homme (trait plein bleu) et fonction de transfert globale de l'oreille externe et de l'oreille moyenne (en pointillés) (source : http://www.cochlea.eu).	19
Figure 3 : Courbes isosoniques normales des sons purs de la Norme NF ISO 226:2003 (écoute binaurale en champ libre, incidence frontale). En rouge, valeurs de la sonie. Courbes pointillées, valeurs de sonie estimées par la norme.	20
Figure 4 : Schéma en coupe de la cochlée (Source : image adaptée de http://droualb.faculty.mjc.edu)	21
Figure 5 : Coupe schématique de l'organe de Corti (Source : image adaptée de http://droualb.faculty.mjc.edu)	22
Figure 6 : représentation des enveloppes des primaires f_1 , f_2 et du produit de distorsion $2f_1-f_2$ le long de l'organe de Corti. En vert, zone de génération du produit de distorsion.	24
Figure 7 : Voies auditives ascendantes. BNC Noyau cochléaire dorsal ; PVCN, noyau cochléaire post-ventral ; AVCN, noyau cochléaire antéro-ventral ; LSO, olive latérale supérieure ; MSO, noyau olivaire supérieur ; MNTB, noyau médian controlatéral du corps trapézoïdal ; VNLL, noyau ventral du lemniscus latéral ; DNLL, noyau ventral du lemniscus latéral ; IC, colliculus inférieur ; MGB, corps géniculé médian. Figure extraite de "Auditory Pathways: Anatomy and Physiology – Pickles 2015"	27
Figure 8 : Voies auditives descendantes. OCB, faisceau olivo-cochléaire ; COCB, fibres croisées du faisceau olivo-cochléaire ; CN, noyau cochléaire ; BNC Noyau cochléaire dorsal ; LSO, olive latérale supérieure (m médian, lat latéral) ; MSO, noyau olivaire supérieur ; MNTB, noyau médian controlatéral du corps trapézoïdal ; VNLL, noyau ventral du lemniscus latéral ; DNLL, noyau ventral du lemniscus latéral ; IC, colliculus inférieur ; MGB, corps genouillé médian. Figure extraite de "Auditory Pathways: Anatomy and Physiology – Pickles 2015"	28
Figure 9 : Représentation schématique de la diminution de la partie supracuticulaire du clou des stéréocils.	33
Figure 10 : Représentation du phénomène d'excitotoxicité. A) Sollicitation modérée de la cellule ciliée interne sans excitotoxicité. B) Sollicitation forte et prolongée de la cellule ciliée interne provoquant une excitotoxicité glutamatergique.	36
Figure 11 : Schéma illustrant l'innervation afférente normale de la cellule ciliée interne. Deux fibres nerveuses cochléaires non myélinisées (vert) établissant un contact synaptique avec une CCI sont représentées. Sur chaque synapse, un ruban pré-synaptique (rouge) est présent dans la CCI. (Source image adaptée de Lin et al., 2011b)	39
Figure 12 : Représentation de la conformation du ruban présynaptique et de l'activité des fibres 1) à haut taux de décharges spontanées, 2) à moyen taux de décharges, 3) à bas taux de décharges spontanées (source image adaptée de http://www.cochlea.eu).	40
Figure 13 : Complexe synaptique illustrant le ruban pré-synaptique très dense (appairage à une fibre à haut taux de décharge spontanée) et son halo de vésicules synaptiques dans la CCI. Microscopie électronique à transmission (source image adaptée de Liberman, 1980)	42
Figure 14 : Protocole suivi par chaque volontaire. SRA, seuil de déclenchement du réflexe acoustique mesuré par ECHOSCAN®. ATL, seuil d'audition en conduction aérienne mesuré par audiométrie tonale liminaire.	51
Figure 15 : décompte du nombre de volontaires selon les différentes étapes du protocole	53

Figure 16 : Procédé EchoScan	56
Figure 17 : DPgramme (Homme 39 ans) mesuré pour des fréquences f_2 comprises entre 4000 et 5000 Hz ($f_2 = 1,2 f_1$) et à une intensité fixe de $L_1 = L_2 + 6 = 61$ dB HL.	58
Figure 18 : Mesure dite en entrée-sortie du PDA à la fréquence f_1 de 4800 Hz ($f_2 = 1,2 f_1$). Variation de l'intensité des primaires entre 40 et 61 dB pour L_2 avec $L_1 = L_2 + 6$. Les flèches rouges illustrent l'effet d'une variation d'intensité suite au déclenchement du réflexe de l'oreille moyenne. Zone bleue, niveau sélectionné pour la mesure du réflexe acoustique. Zone violette, saturation du PDA.	59
Figure 19 : Calcul de l'amplitude du réflexe acoustique avec un PDA à $f_2 = 4200$ Hz et $L_1 = 67$ dB HL, pour une stimulation sonore controlatérale (bruit de bande centrée sur 1000 Hz) d'intensité 86 dB HL. Points rouges, 6 points utilisés pour calculer le niveau de PDA hors réflexe $L_{HR} = 9,9$ dB. Points verts, 6 points pour calculer le niveau de PDA pendant le réflexe $L_R = 8,6$ dB. $\Delta_{PDA} = L_R - L_{HR} = 1,3$ dB, amplitude du réflexe. Probabilité à 99,95 % que les points rouges soient différents des points verts. Points bleus, mesure exclus du calcul. Barre orange, période de stimulation sonore controlatérale.	60
Figure 20 : Exemple de dendrogramme calculé sur un échantillon restreint du jeu de données(45 variables).	67
Figure 21 : Exemple d'analyse en composantes principales représenté dans le plan des deux premières composantes. Calcul réalisé sur un échantillon restreint de 45 variables.	68
Figure 22 : Exemple de tracé en éboulis. Rupture de pente après le 5 ^{ème} facteur.	70
Figure 23: Paramètres d'une fonction de décroissance exponentielle. Y_0 , ordonnée à l'origine. T , constante de temps.	74
Figure 24 : Réponse en fin de poste de travail à la question : « Comment estimez-vous l'intensité sonore de la journée par rapport à votre activité habituelle ». Vert, réponse médiane du groupe Témoin. Orange, réponse médiane du groupe Musique.	83
Figure 25 : Seuils auditifs mesurés par audiométrie tonale liminaire en début de poste de travail comparés aux valeurs de la distribution statistique de la norme ISO 7029:2017 pour des hommes de 36 ans (quartiles et médiane).	84
Figure 26 : Seuil du réflexe acoustique (SRA) mesuré par ECHOSCAN® de début de poste de travail. Groupe Musique $n = 54$; Groupe Témoin $n = 30$.	86
Figure 27 : Évolution temporelle des niveaux sonores de crête ($L_{p,Cpeak}$) mesurés par exposimétrie. Mesure de deux régisseurs son façade (A) lors d'un concert de blues, (B) lors d'un concert de folk.	90
Figure 28 : Évolution temporelle des niveaux sonores équivalents ($L_{Aeq,1s}$) mesurés par exposimétrie. Mesure de deux régisseurs son façade, (A) lors d'un concert de blues, (B) lors d'un concert de folk.	90
Figure 29 : Valeurs d'exposition sonore journalière mesurées chez les volontaires inclus ($n = 86$).	91
Figure 30 : Expositions sonores parmi le groupe exposé à de la musique, 43 techniciens et 12 autres exposés.	92
Figure 31 : Expositions sonores en fonction du métier exercé par les volontaires. Mesures réalisées chez les 55 volontaires inclus dans le groupe exposé à de la musique.	92
Figure 32 : Expositions sonores en fonction du genre musical. Mesures réalisées chez les 55 volontaires inclus dans le groupe exposé à la musique.	93

Figure 33 : Analyse spectrale par bande d'octave de l'exposition sonore (moyenne de tout le concert). Trois genres musicaux (folk, pop et rap) sont représentés : folk (le plus faible) et rap (le plus fort) encadrent le niveau moyen de l'ensemble des genres musicaux.	96
Figure 34 : Variation du seuil auditif (Δ ATL) en fonction des groupes Musique (n = 51) et Témoin (n = 31). Barres d'erreur écart-types. Significativité intergroupe * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.	101
Figure 35 : Variation du seuil de déclenchement du réflexe acoustique (Δ SRA) en fonction des groupes Musique (n = 49) et Témoin (n = 30). Boite, premier au troisième quartile. Moustaches, étendue minimum à maximum. Significativité intergroupe **** $p < 0,0001$.	102
Figure 36 : Valeurs et pentes "a" du Facteur 1 en fonction de la variation du seuil auditif à 4000 Hz modélisée par régression (Δ ATL4000 = a.Facteur1 + b.Facteur3 + c.ATL2000 + Constante).	111
Figure 37 : Audiogramme des volontaires S51 et S59 mesurés au repos et calcul de l'effet de ces seuils à 250, 500 et 6000 Hz (Δ SRA _{ATL}) dans le modèle Δ SRA. Volontaire S51 : faible effet de diminution de Δ SRA en fin de poste de travail : Volontaire S59 : augmentation de Δ SRA de 3,5 dB.	113
Figure 38: Fatigue auditive mesurée en fin d'exposition et après une courte période de récupération chez 10 volontaires du groupe Musique. En rouge, courbes de décroissance exponentielle en fonction du temps. A) fatigue auditive mesurée par audiométrie tonale (Δ ATL). B) fatigue mesurée par ECHOSCAN® (Δ SRA).	117
Figure 39 : Comparaison des spectres sonores moyens de musique pop mesurés par Axelsson et Lindgren, 1981 (pop 1981) et au cours de la présente étude (pop 2022).	122
Figure 40 : Seuils auditifs au repos du groupe Musique comparé aux valeurs médianes des normes ISO 7029:2017 (homme de 36 ans non exposé au bruit) et ISO 1999:2013 (homme de 36 ans ayant une exposition professionnelle de 87 dB(A) durant 10 ans).	129

Liste des tableaux

Tableau 1 : Nombre et âge moyen ($\pm$ SD) des volontaires ayant répondu au questionnaire.	76
Tableau 2 : Nombre de volontaires par type d'activité dans le groupe Musique.	77
Tableau 3 : Réponses aux questions 1 "Etes-vous exposé au bruit ?" 2 " Pensez-vous que votre activité habituelle présente un risque pour votre audition ?" dans la rubrique "bruit au travail" du questionnaire.	77
Tableau 4 : Équipement en Protecteur Individuel Contre le Bruit (PICB) des volontaires et déclaration de la fréquence du port de ces PICB parmi les personnes équipées.	79
Tableau 5 : Types de protecteurs individuels contre le bruit habituellement portés par les volontaires équipés.	79
Tableau 6 : Moyen de financement des protections individuelles contre le bruit chez les volontaires équipés de PICB.	80
Tableau 7 : Appréciation par les volontaires de leur propre audition.	81
Tableau 8 : Troubles auditifs identifiés par les volontaires.	82
Tableau 9 : Seuils d'audition mesurés par audiométrie tonale liminaire en début de poste de travail.	85
Tableau 10 : Valeurs moyennes et écarts-types des seuils du réflexe acoustique mesurés par ECHOSCAN® en début de poste de travail.	86
Tableau 11 : Nombre de sujets dont le niveau sonore de crête a dépassé les seuils définis par la réglementation bruit au travail.	89
Tableau 12 : Expositions sonores journalières moyennes et écart-types mesurés chez les 86 volontaires inclus.	89
Tableau 13 : Niveaux sonores moyens de la musique amplifiée et leur contribution dans l'exposition sonore journalière pour les 55 volontaires inclus dans le groupe Musique.	94
Tableau 14 : Niveaux sonores équivalents moyens pondérés A et C obtenus sur l'ensemble de la journée de travail des volontaires.	95
Tableau 15 : Moyennes des quantiles L_{90} et L_{10} mesurés durant la totalité des périodes de mesure ou durant les deux dernières heures.	97
Tableau 16 : Kurtosis des $L_{Aeq,15}$ calculés durant la totalité des mesures ou durant les deux dernières heures des mesures.	98
Tableau 17 : Kurtosis audio moyenné durant les 2 dernières heures des mesures.	98
Tableau 18 : Variation du seuil auditif (Δ ATL) à 4000 Hz.	101
Tableau 19 : Variation du déclenchement du réflexe acoustique (Δ SRA).	101
Tableau 20 : Valeur propre des 15 premiers facteurs et proportion de la variance expliquée par ces facteurs.	103
Tableau 21 : Interprétation des facteurs. Type d'indicateur, (+) indicateurs dont la charge factorielle est positive, ou (-) négative. Les « périodes de mesure » correspondent soit à la totalité de l'enregistrement sonore, soit aux dernières heures (3h, 2h ou 1h avant la fin). La « gamme fréquentielle » correspond aux pondérations A et C ou aux bandes d'octave de 63 à 16000 Hz. Le « nombre de variables » est le nombre d'indicateurs d'exposition dont la valeur absolue de la charge factorielle est supérieure à 0,6. La « charge positive » est le nombre de variables	

<i>dont la charge factorielle est supérieure à 0,6. La « charge négative » est le nombre de variables dont la charge factorielle est inférieure à -0,6.</i>	104
<i>Tableau 22 : Modèle de la variation du seuil auditif à 500 Hz.</i>	106
<i>Tableau 23 : Modèle de la variation du seuil auditif à 1000 Hz.</i>	107
<i>Tableau 24 : Modèle de la variation du seuil auditif à 2000 Hz.</i>	108
<i>Tableau 25 : Modèle de la variation du seuil auditif à 4000 Hz.</i>	109
<i>Tableau 26 : Modèle de variation du seuil de déclenchement du réflexe acoustique.</i>	112
<i>Tableau 27 : Modèle de la variation du seuil auditif à 4000 Hz calculé avec une sélection d'indicateurs d'exposition sonore. $L_{10}-L_{50}$ est la différence des quantiles des $L_{Aeq,1s}$ durant les 3 dernières heures de travail.</i>	115
<i>Tableau 28 : Modèle de variation du seuil de déclenchement du réflexe acoustique calculé avec une sélection d'indicateurs d'exposition sonore. $L_{10}-L_{50}$ est la différence des quantiles des $L_{Aeq,1s}$ durant les 3 dernières heures de travail.</i>	115
<i>Tableau 29 : Valeurs moyennes et écart-types des durées entre la fin du concert et les mesures auditives, des variations de seuil auditif mesurées à 4000 Hz (ΔATL 4000) et des variations du seuil de déclenchement du réflexe acoustique (ΔSRA). Test de Student, hypothèse d'une moyenne nulle, * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$</i>	116
<i>Tableau 30 : Paramètres des courbes de décroissance exponentielle en fonction du temps de la fatigue auditive mesurée par audiométrie tonale (ΔATL) à 4000 Hz et par ECHOSCAN® (ΔSRA).</i>	117

1 Introduction générale

Parmi les nombreux salariés exposés au bruit, ceux travaillant dans des établissements diffusant de la musique amplifiée, comme les discothèques, les bars et les salles de spectacle, ont une exposition bien particulière :

- les niveaux sonores dépassent couramment 100 dB(A). De tels niveaux sont aujourd'hui rares en industrie ;
- la musique est une source sonore dynamique, même si la compression électronique, très utilisée dans les musiques actuelles, tend à la réduire. En outre, elle est également une source d'exposition sonore discontinue sur la journée où les phases bruyantes (répétitions, balances ou réglages techniques, concert) alternent avec des moments calmes ;
- la musique n'est pas perçue par les personnes exposées comme une nuisance que l'on chercherait à supprimer puisqu'elle est l'essence même du spectacle musical ;
- pour certains salariés, notamment ceux en charge de la diffusion sonore, le port systématique de protecteurs individuels contre le bruit (PICB) est perçu comme étant incompatible avec l'activité professionnelle.

Le nombre de professionnels dans le secteur du spectacle vivant est en progression de 35% de 2000 à 2016, pour atteindre environ 200 000 personnes en 2016. Le secteur embauche majoritairement des intermittents, avec seulement un tiers de salariés ayant des contrats de travail permanents avec un employeur (CDI) (Observatoire des métiers du spectacle vivant, 2018). Dans le cadre de leur activité, ces travailleurs sont souvent exposés aux mêmes niveaux sonores que le public. Le décret n° 2017-1244 du 7 août 2017, relatif à la prévention des risques liés à la diffusion de sons amplifiés pour la protection du public, définit un niveau maximal de 102 dB(A) ou 118 dB(C) (moyenne glissante sur 15 minutes). Or, en appliquant le principe d'équivalence des doses en fonction du temps, tel qu'il est défini par la norme NF EN ISO 9612 - Acoustique - Détermination de l'exposition au bruit en milieu de travail - Méthode d'expertise," 2009 , une exposition d'à peine 15 minutes à un niveau sonore de 102 dB(A) provoque déjà un dépassement de la valeur limite d'exposition journalière, 87 dB(A), définie par la réglementation du travail. Par conséquent, les salariés des établissements musicaux travaillant dans l'espace de diffusion musicale sont une population à risque, comme l'a d'ailleurs montré une étude bibliographique en 2020 (Trompette and Venet, 2020).

A titre d'exemple, les ingénieurs du son travaillant à la console de mixage située à plusieurs dizaines de mètres de la scène sont exposés à des niveaux compris entre 97 et 103 dB(A) (Caruel and Pardonnet, 1995; Cavanaugh, 1989; Dibble, 1997). L'exposition sonore journalière $L_{EX,8h}$ des barmen en discothèques ($n = 56$), mesurée par Kelly, en 2013, est de 92,3 dB(A). Cette dernière étude montre que le personnel de sécurité à l'intérieur des établissements et les DJ sont exposés à des niveaux sonores moyens supérieurs à 93 dB(A). Ces fortes expositions ne sont évidemment pas sans conséquence. Par exemple, Størmer et al. (2015) montrent que 38% des musiciens appartenant à des groupes de rock présentent des pertes auditives supérieures à 25 dB HL avec une perte maximale centrée sur la fréquence 6 kHz. De plus, cette étude montre que 20% des musiciens souffrent d'acouphènes chroniques.

Le constat des niveaux d'exposition sonore élevés chez les salariés travaillant dans des environnements de diffusion de musique amplifiée, et l'effectif croissant des salariés dans ces secteurs d'activité, font de cette problématique un enjeu majeur pour la prévention du risque de surdité professionnelle.

Toutes les études de la littérature s'étant intéressées aux salariés de ce secteur d'activité, même si elles sont relativement rares, s'accordent sur le fait que le risque de troubles auditifs (surdité, acouphènes, hyperacousie) est avéré pour ces professionnels (voir la revue Trompette and Venet, 2020). Il n'est cependant pas nécessaire d'attendre le constat d'un déficit auditif permanent pour que ces professionnels prennent conscience du risque encouru. L'évaluation de la fatigue auditive met en évidence de manière objective la souffrance du système auditif lors d'une journée de travail et permet d'agir préventivement avant même le constat d'un déficit. C'est en ce sens que la compréhension des facteurs qui influencent la fatigue auditive peut améliorer, orienter et faciliter la mise en œuvre des actions de prévention du risque auditif.

2 Rappels physiologiques

Le système auditif humain est constitué d'une chaîne d'éléments traitant le signal sonore, du pavillon externe collectant les variations de pression acoustique dans l'air aux aires auditives corticales analysant les informations provenant des voies auditives. Pour une bonne audition, l'intégrité de l'ensemble de ces éléments interdépendants est nécessaire.

2.1 Oreille externe et moyenne

L'oreille externe est constituée du pavillon et du canal auditif (cf. Figure 1). La membrane tympanique fait la jonction entre oreille externe et oreille moyenne. L'oreille externe est le maillon le plus simple de la chaîne auditive, son fonctionnement est purement mécanique. Elle permet notamment une amplification des ondes de pression acoustique et elle contribue avec le déphasage entre les oreilles gauche et droite à définir la directivité du système auditif pour la localisation des sources sonores.

L'oreille moyenne est constituée d'une chaîne ossiculaire entre le tympan et la fenêtre ovale située à la base de la cochlée. Le tympan, fine membrane, transforme l'onde de pression acoustique en vibration mécanique qui se transmet par la chaîne ossiculaire jusqu'à la platine de l'étrier. Les mouvements de l'étrier propagent alors des ondes de pression dans l'endolymphe de l'oreille interne. Cette chaîne, par un effet de levier et un rapport de surfaces (tympan/platine de l'étrier), réalise une amplification du signal et une adaptation d'impédance entre le milieu extérieur aérien (onde de pression dans l'air) et l'oreille interne baignant dans un milieu liquidien (endolymphe et périlymphe).

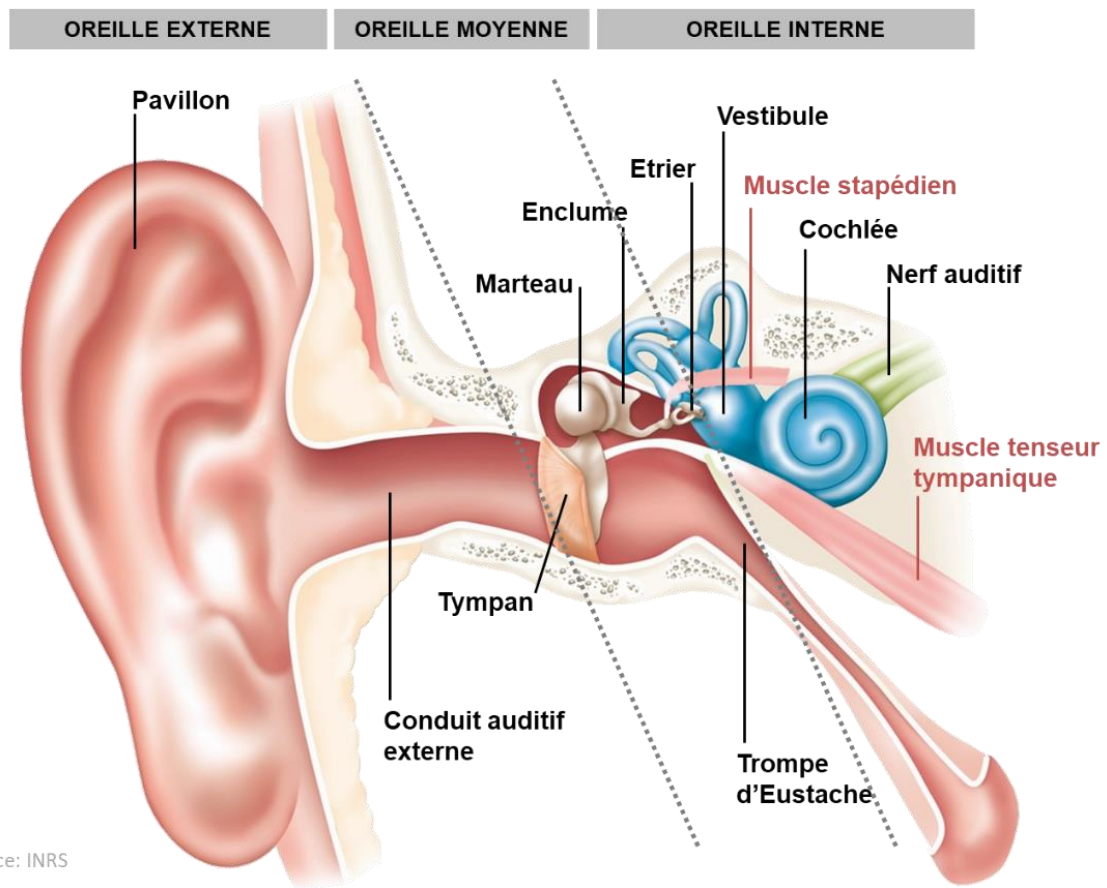


Figure 1 : Schéma de l'oreille humaine

La fonction de transfert étant la relation reliant les signaux d'entrée aux signaux de sortie, on constate aisément sur la Figure 2 que la somme de la fonction de transfert de l'oreille externe et celle de l'oreille moyenne n'est pas neutre. L'amplification des sons dépend de leur fréquence et conduit à une sensibilité en fréquence spécifique à l'espèce concernée. Chez l'Homme, la réflectance, ratio entre énergie réfléchie et énergie incidente, est minimale entre 3000 et 4000 Hz chez l'adulte (Keefe et al., 1993; Werner et al., 2010) tandis que l'amplification de l'oreille moyenne est maximale entre 1000 et 2000 Hz (Aibara et al., 2001).

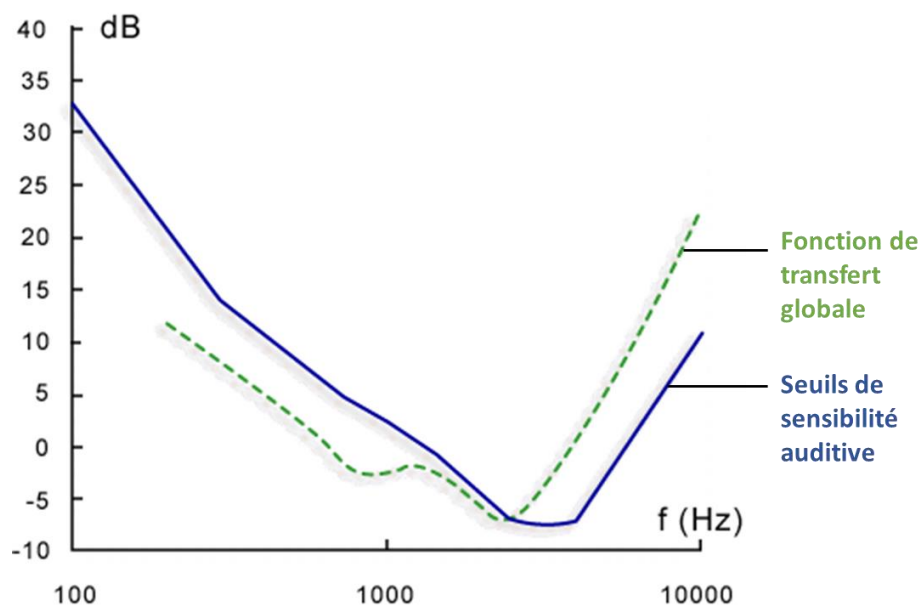


Figure 2 : Seuils de sensibilité auditive chez l'Homme (trait plein bleu) et fonction de transfert globale de l'oreille externe et de l'oreille moyenne (en pointillés) (source : <http://www.cochlea.eu>).

La sensibilité auditive résultante mesurée chez les jeunes adultes normo-entendants est maximale entre 2000 et 4000 Hz comme illustré par la Figure 3 (NF ISO 226:2003). La courbe des seuils auditifs dépend principalement des fonctions de transfert de l'ensemble constitué par l'oreille externe et l'oreille moyenne, la sensibilité de l'organe de Corti étant uniforme sur la quasi-totalité de la gamme auditive. La haute sensibilité dans la gamme des fréquences moyennes est particulièrement adaptée à la discrimination de la parole, mais du fait de cette plus forte amplification de l'énergie sonore, elle induit également une vulnérabilité plus importante de l'oreille interne à ces fréquences, notamment autour de 4000 Hz.

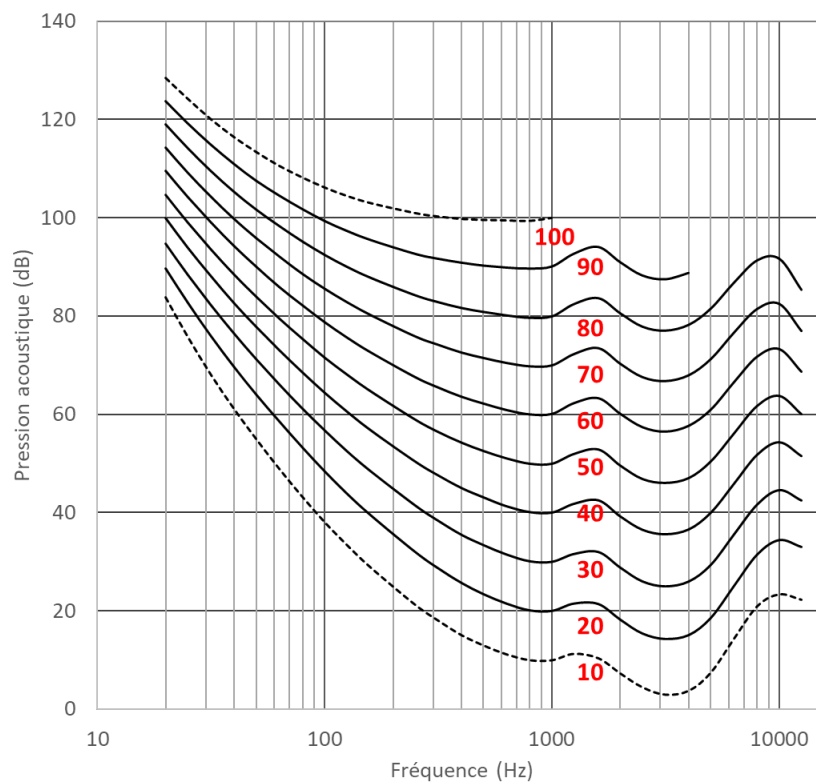


Figure 3 : Courbes isosoniques normales des sons purs de la Norme NF ISO 226:2003 (écoute binaurale en champ libre, incidence frontale). En rouge, valeurs de la sonie. Courbes pointillées, valeurs de sonie estimées par la norme.

L'oreille moyenne est également un système actif rétrocontrôlé par des réflexes agissant sur le muscle tenseur tympanique implanté sur le marteau et le muscle stapédien implanté sur l'étrier. Lors d'une forte stimulation sonore, chez l'Homme, c'est principalement le muscle de l'étrier qui se contracte : on parle de réflexe stapédien. Le réflexe stapédien est décrit plus en détails au paragraphe 3.2 Réflexe oreille moyenne.

2.2 Oreille interne

L'oreille interne est constituée du vestibule et des canaux semi-circulaires, des structures impliquées dans l'équilibre, et de la cochlée, récepteur périphérique impliquée dans l'audition.

La cochlée est une structure en limaçon enroulée autour d'un axe central, le modiolus. Elle contient plusieurs compartiments renfermant des liquides distincts et séparés par des membranes dont la membrane basilaire sur laquelle se trouve l'organe de Corti (cf. Figure 4).

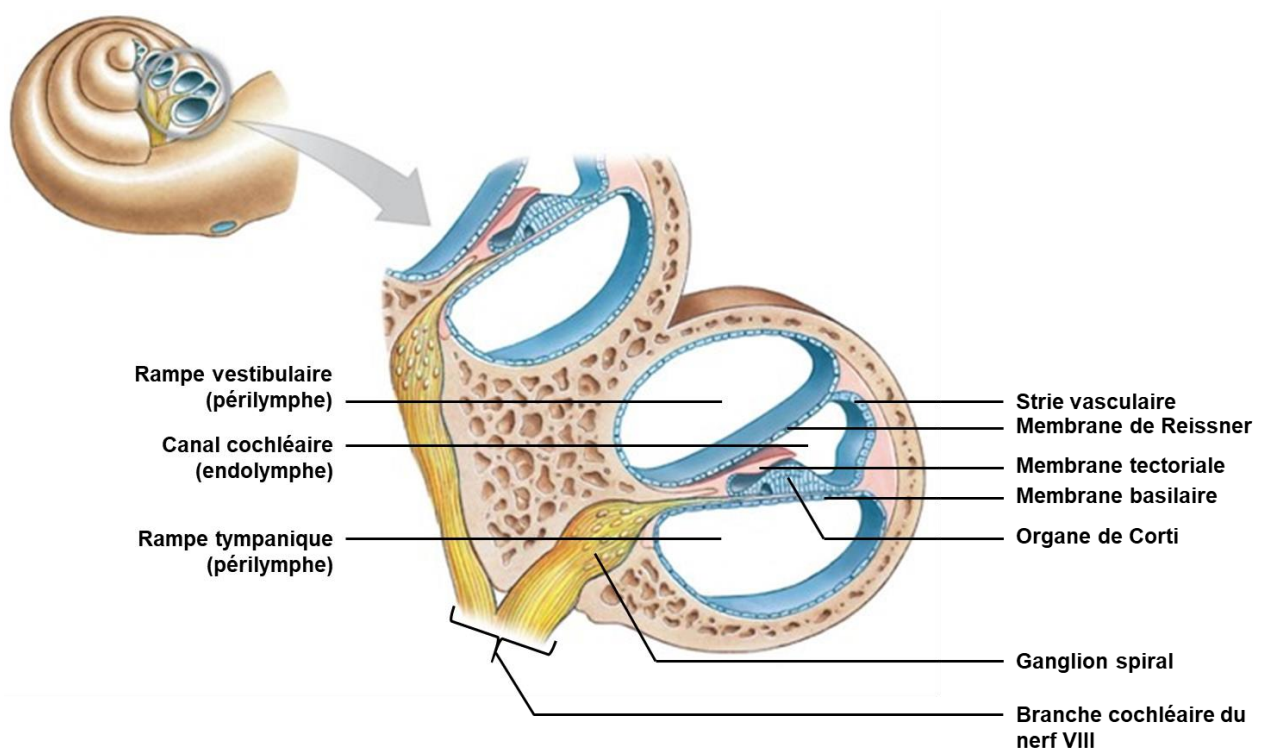


Figure 4 : Schéma en coupe de la cochlée (Source : image adaptée de <http://droualb.faculty.mjc.edu>)

L'organe de Corti, représenté en Figure 5, est constitué de plusieurs types cellulaires : les cellules de soutien (cellules de Hensen, cellules de Deiters, Piliers...) assurant différentes fonctions telles que le recyclage ionique ou le soutien structurel ; les cellules ciliées, cellules qui permettent la transduction mécano-sensorielle en transformant une onde de pression liquidienne en impulsion nerveuse.

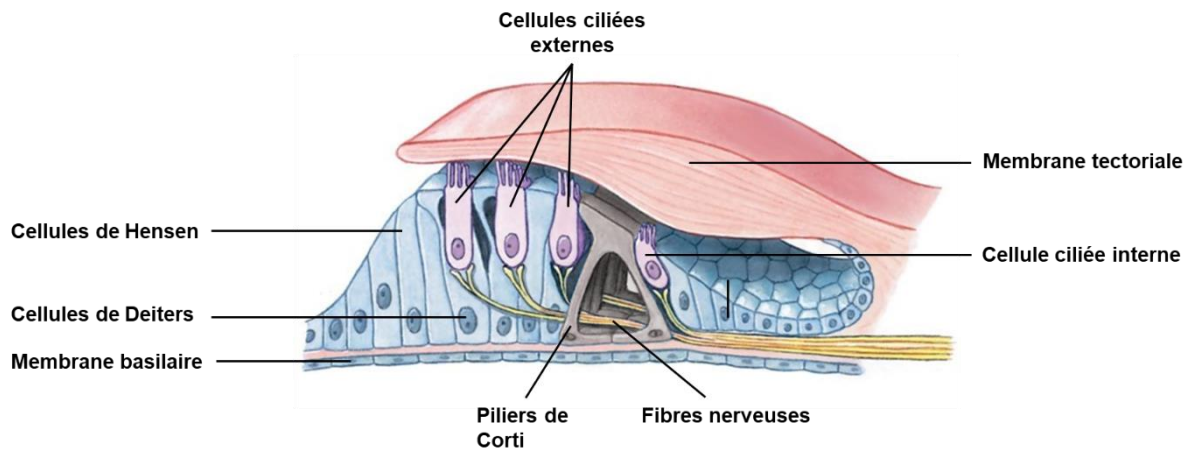


Figure 5 : Coupe schématique de l'organe de Corti (Source : image adaptée de <http://droualb.faculty.mjc.edu>)

On distingue deux types de cellules ciliées qui diffèrent par leur forme et leur fonction.

2.2.1 Cellules ciliées externes

Les cellules ciliées externes (CCE) sont au nombre de 9 000 à 12 000 réparties en 3 rangées (Legendre et al., 2009). Elles permettent une amplification locale de la vibration de la membrane basilaire qui augmente la sensibilité (60 dB de gain) permettant ainsi de percevoir les très faibles niveaux sonores, et améliore la discrimination en fréquence grâce à une mise en résonance très localisée de l'organe de Corti. Cet ajustement actif en fréquence est beaucoup plus fin que la tonotopie passive mise en évidence par Békézy (Davis, 1983).

L'amplification active est rendue possible grâce à une propriété originale des CCE : l'électromotilité. La dépolarisation des CCE lors d'une stimulation sonore, amorcée par l'ouverture de canaux ioniques (K^+) provoquée par le fléchissement des stéréocils, entraîne une modification de la conformation d'une protéine transmembranaire : la prestine. Cette modification provoque une contraction du corps cellulaire de la CCE. Ce mécanisme très rapide de contractions et de relâchements ne nécessite pas d'ATP, il est mû par les variations électriques et dépend donc des dépolarisations et repolarisations membranaires. Il est très rapide, quasi immédiat : on parle parfois de moteur électrique de la cochlée. Il est si rapide que le rythme des contractions et relâchements suit celui de la fréquence sonore et peut donc atteindre 20 000 Hz chez l'Homme. Ce mécanisme actif n'est pas opérant à l'apex de la cochlée, zone où les CCE ont un corps plus allongé démunie de prestine et d'actine, et où le

couplage entre les CCE et les cellules de Deiters est moins rigide. Le couplage entre les stéréocils des CCE et la membrane tectoriale est également plus lâche dans cette partie de la cochlée. Ces caractéristiques sont adaptées à une résonance dans la gamme des basses fréquences.

Cette amplification cochléaire est une amplification compressive, en d'autres termes le gain diminue lorsque l'intensité de la stimulation sonore augmente. Cette réponse non linéaire est notamment due à la rigidité asymétrique des faisceaux de stéréocils des CCE plus élevée dans le sens excitateur (ouverture des canaux ioniques) que dans le sens inhibiteur (Flock and Strelioff, 1984). De cette dernière caractéristique découle une fonction de transfert de forme sigmoïde entre la flexion des stéréocils et le courant d'ions résultant (Weiss and Leong, 1985).

Ces mécanismes d'amplification des CCE sont à l'origine des otoémissions et notamment du produit de distorsion acoustique (PDA) utilisé par le procédé EchoScan pour détecter le déclenchement du réflexe acoustique (cf. §3.1). Lorsque deux sons de fréquences proches f_1 et f_2 , appelés primaires ($f_2 > f_1$), sont présentés simultanément devant le tympan, l'amplitude vibratoire du mouvement de la membrane basilaire culmine à deux endroits différents (tonotopie de l'organe de Corti) tout en se chevauchant sur une large zone (cf. Figure 6). L'interaction des mécanismes actifs liés à la stimulation par les deux fréquences f_1 et f_2 engendre la naissance de vibrations à des fréquences correspondant à des combinaisons de f_1 et f_2 . Le produit de distorsion le plus robuste apparaît à la fréquence $2f_1 - f_2$ lorsque le rapport des primaires f_2/f_1 est proche de 1,2 (Harris et al., 1989). Deux sources principales le long de la membrane basilaire ont été localisées pour ce produit de distorsion : à l'endroit accordé à $2f_1 - f_2$ et près de l'endroit accordé à la fréquence f_2 tel que repéré sur le figure 6. Les voies de propagation des distorsions produites par les CCE jusqu'à l'étrier ne sont pas totalement établies. Certains modèles estiment que la propagation se fait par la seule membrane basilaire (Shera and Guinan, 1999) tandis que d'autres avancent une seconde propagation par la membrane de Reissner (Reichenbach et al., 2012).

Toutes les vibrations provenant des différentes sources s'additionnent vectoriellement au niveau de l'étrier et génèrent le produit de distorsion qui sera émis par le tympan dans le canal auditif. Lorsqu'il y a une cohérence entre les sites d'émission du PDA $2f_1 - f_2$, l'amplitude de la vibration du PDA transmise par l'étrier est optimale et le niveau du PDA mesuré dans le canal auditif est optimum.

La mesure des produits de distorsion permet une analyse non invasive du fonctionnement de l'oreille interne et particulièrement des CCE (Avan et al., 2001a). Cette mesure est opérante dans les gammes de fréquences moyennes et élevées, là où le mécanisme actif d'amplification est présent. Dans le cadre des mesures de fatigue auditive par le procédé EchoScan (cf. § 7.3.2), le produit de distorsion $2f_1-f_2$ n'est pas mesuré dans le but d'étudier directement l'oreille interne, mais pour mettre en évidence le déclenchement du réflexe acoustique qui perturbe le produit de distorsion en modifiant la fonction de transfert de l'oreille moyenne.

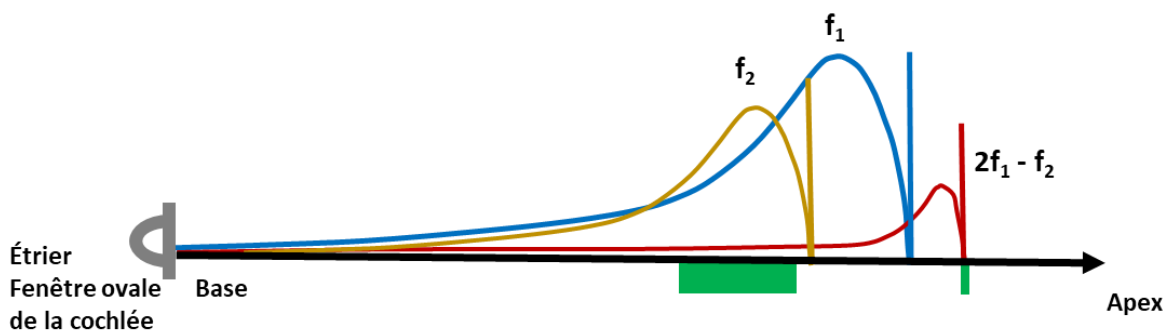


Figure 6 : représentation des enveloppes des primaires f_1 , f_2 et du produit de distorsion $2f_1-f_2$ le long de l'organe de Corti. En vert, zone de génération du produit de distorsion.

Les CCE sont innervées par des fibres nerveuses efférentes provenant du système olivo-cochléaire médian, dont le neurotransmetteur est l'acétylcholine. A l'apex de la cochlée, l'acide gamma-aminobutyrique (GABA) intervient comme modulateur. Les fibres efférentes permettent une boucle réflexe, dit réflexe de l'oreille interne, ou réflexe olivo-cochléaire, qui module le fonctionnement des CCE (Fuchs and Lauer, 2019). Quelques fibres afférentes non-myélinisées (conduction nerveuse lente) issues de neurones ganglionnaires de type II font également synapses avec les CCE. La fonction de ces fibres n'est pas totalement définie à ce jour ; elles pourraient être la voie ascendante du réflexe de l'oreille interne (Rabbitt and Brownell, 2011).

2.2.2 Cellules ciliées internes

Alors que les CCE "mettent en forme" la stimulation vibratoire de l'organe de Corti portée par la membrane basilaire, les cellules ciliées internes (CCI) sont les véritables transducteurs mécano-sensoriels. La cochlée humaine compte 3000 à 3500 CCI implantées sur une seule rangée le long de l'organe de Corti (Legendre et al., 2009) (cf. Figure 5 : Coupe schématique de l'organe de Corti (Source : image adaptée de <http://droualb.faculty.mjc.edu>)). Elles sont connectées par des fibres afférentes myélinisées (conduction rapide) aux neurones des ganglions spiraux de type I. La quasi-totalité (95%) des 35 000 neurones afférents des ganglions spiraux font synapse avec les 3000 CCI, les 5 % restants sont reliés aux CCE. Chaque CCI est donc en liaison avec 10 à 20 fibres afférentes (Wu et al., 2019). Ces fibres conduisent les influx nerveux jusqu'aux noyaux cochléaires avant d'être relayés vers le cortex.

Des fibres efférentes arrivent également aux CCI, mais leur bouton synaptique n'est pas en contact direct avec la CCI. Ces boutons sont implantés sur le complexe synaptique des fibres afférentes pour en moduler leur activité (Rabbitt and Brownell, 2011).

Comme pour les CCE, la déflexion des stéréocils des CCI provoque l'ouverture de canaux cationiques faisant entrer des ions potassium (K^+) dont la concentration est élevée dans l'endolymphe baignant les stéréocils. L'entrée de K^+ dépolarise la CCI, ce qui entraîne l'ouverture de canaux Ca^{2+} voltage-dépendants (CAV1.3) (Lewis and Hudspeth, 1983). Le Ca^{2+} peut alors se lier avec la protéine otoferline en liaison avec les vésicules synaptiques de neurotransmetteur (glutamate). L'activation de l'otoferline déclenche la libération du glutamate dans la fente synaptique (Ramakrishnan et al., 2009).

2.3 Voies auditives et complexe auditif central

Le nerf auditif, ou nerf VIII, est composé de fibres afférentes véhiculant les influx nerveux des CCI par des neurones de type I myélinisés (95% des fibres afférentes) et des fibres efférentes innervant les CCE et CCI qui permettent une régulation du fonctionnement de l'organe de Corti.

Le nerf auditif se projette dans différents noyaux du tronc cérébral comme illustré par les Figure 7 et Figure 8.

2.3.1 Systèmes efférents

Le système auditif efférent se compose du complexe olivaire supérieur (SOC) constitué de neurones croisés et décroisés. Il est divisé en deux sous-systèmes : les voies olivo-cochléaires médiane (MOC) et latérale (LOC) (White and Warr, 1983). Les fibres issues du MOC se connectent aux CCE, tandis que celles issues du LOC sont projetées sous les CCI (Pujol and Lenoir, 1986). L'arc réflexe du MOC, encore appelé réflexe de l'oreille interne, est impliqué pour améliorer la discrimination de signaux sonores, comme la parole dans le bruit, et son activité peut être modulée par l'attention (Guinan, 2018).

La voie efférente du réflexe de l'oreille moyenne emprunte le nerf facial. Elle est issue des motoneurones du noyau VII du tronc cérébral qui est en relation avec le SOC. Ce réflexe est impliqué dans le démasquage de bruit de forte intensité et apporte une protection de l'oreille interne en réduisant l'énergie sonore pénétrant dans la cochlée (Liberman and Guinan, 1998). Cette protection est cependant limitée du fait, entre autres, de la latence de son déclenchement qui la rend inefficace pour les bruits à caractère impulsionnel (cf. § 3.2).

2.3.2 Système afférent

Les noyaux des fibres nerveuses afférentes constituent les ganglions spiraux de la cochlée ; les fibres aboutissent au noyau cochléaire ipsilatéral du tronc cérébral. De ces noyaux, des fibres nerveuses se projettent vers le SOC. La plupart des fibres atteignent le SOC opposé par des fibres croisant la ligne médiane du tronc cérébral (Pickles, 2015). On parle alors de décussation des fibres nerveuses. Ces noyaux réalisent un premier traitement des sons (intensité, fréquence, durée) et déclenchent une réponse réflexe si nécessaire.

Le premier relai ascendant vers le cortex est le colliculus inférieur, puis les voies auditives sont relayées au niveau du corps genouillé avant d'atteindre le cortex cérébral (Pickles, 2015). A ce niveau, le message auditif, déjà largement traité par les voies auditives, est reconnu, mémorisé, il peut alors enclencher une réponse volontaire (cf. Figure 7).

Une seconde voie issue également du noyau cochléaire emprunte *via* la formation réticulée du tronc cérébral des relais non spécifiques à la fonction auditive. Cette voie est impliquée notamment dans l'attention portée aux différents sens véhiculés par les messages sensoriels.

Les voies auditives afférentes sont ramifiées entre les différents noyaux du tronc cérébral et au-delà vers le cortex auditif. Ces voies sont les éléments constitutifs des arcs réflexes courts (réflexe de l'oreille interne et réflexe stapédien) mais également une analyse fine et sophistiquée des influx nerveux issus des CCI.

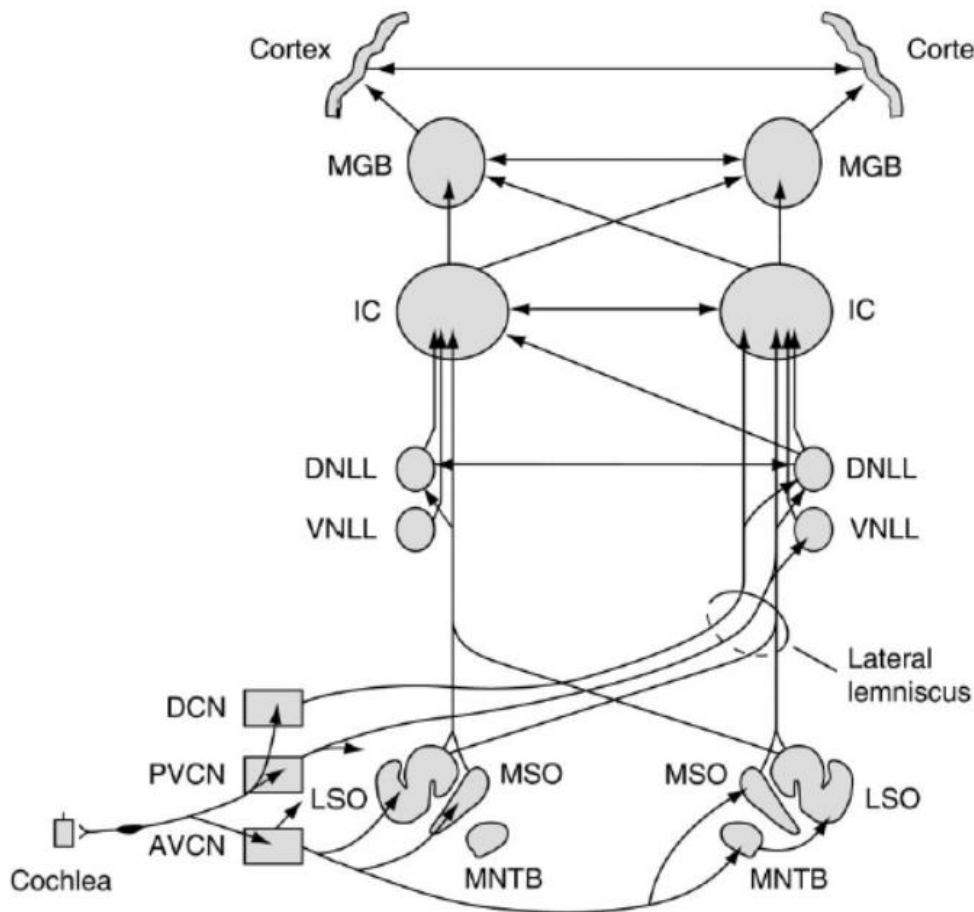


Figure 7 : Voies auditives ascendantes. BNC Noyau cochléaire dorsal ; PVCN, noyau cochléaire post-ventral ; AVCN, noyau cochléaire antéro-ventral ; LSO, olive latérale supérieure ; MSO, noyau olivaire supérieur ; MNTB, noyau médian controlatéral du corps trapézoïdal ; VNLL, noyau ventral du lemniscus latéral ; DNLL, noyau ventral du lemniscus latéral ; IC, colliculus inférieur ; MGB, corps géniculé médian. Figure extraite de "Auditory Pathways: Anatomy and Physiology – Pickles 2015"

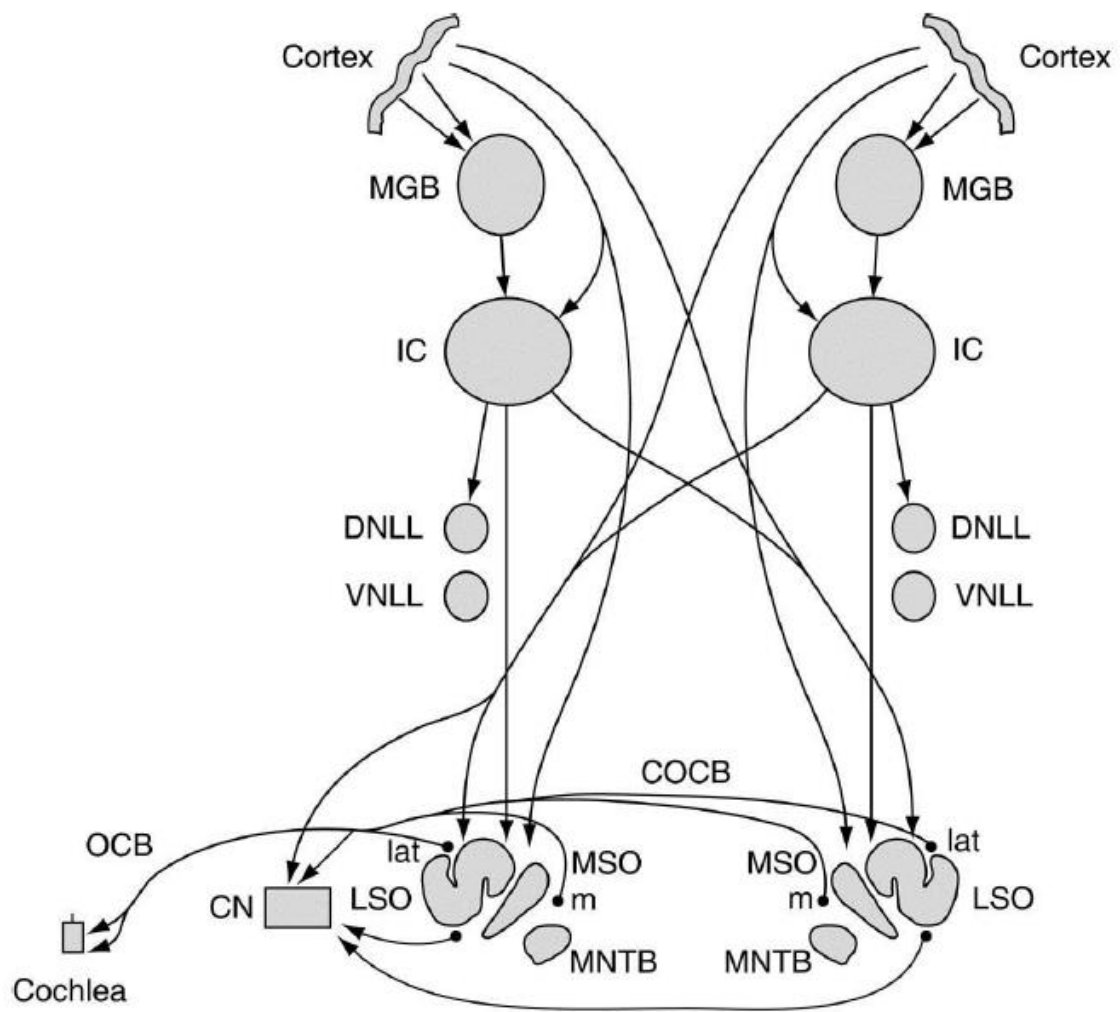


Figure 8 : Voies auditives descendantes. OCB, faisceau olivo-cochléaire ; COCB, fibres croisées du faisceau olivo-cochléaire ; CN, noyau cochléaire ; BNC Noyau cochléaire dorsal ; LSO, olive latérale supérieure (m médian, lat latéral) ; MSO, noyau olivaire supérieur ; MNTB, noyau médian controlatéral du corps trapézoïdal ; VNLL, noyau ventral du lemniscus latéral ; DNLL, noyau ventral du lemniscus latéral ; IC, colliculus inférieur ; MGB, corps genouillé médian. Figure extraite de "Auditory Pathways: Anatomy and Physiology – Pickles 2015"

3 Réflexes auditifs

Le système auditif est le siège de deux réflexes : le réflexe de l'oreille interne, ou réflexe olivo-cochléaire médian (MOC), et le réflexe de l'oreille moyenne, essentiellement le réflexe stapédien chez l'homme.

3.1 Réflexe de l'oreille interne

Le réflexe de l'oreille interne est déclenché par les fibres afférentes du nerf VIII puis contrôlé par le MOC qui agit sur le fonctionnement des CCE. Il permet de moduler l'activité de l'amplificateur cochléaire.

Les synapses des fibres efférentes du MOC libèrent de l'acétylcholine sous les CCE induisant un influx de Ca^{2+} . En entrant dans la CCE, le Ca^{2+} provoque un efflux de K^{+} par des canaux potassiques Ca^{2+} -dépendants, ce qui va entraîner une hyperpolarisation de la CCE et réduire l'électromotilité. Deux réponses sont observées : la première est rapide, elle modifie le courant et le potentiel membranaire en moins de 100 ms, tandis que la seconde est lente, elle joue sur la rigidité membranaire (Evans, 1996). La constante de temps de la réponse lente est de l'ordre de 20 à 50 secondes. Les deux types de réponses, rapide et lente, se combinent et peuvent induire une variation temporaire du seuil auditif (Reiter and Liberman, 1995).

Ce réflexe permet notamment une meilleure discrimination des signaux sonores comme la parole dans le bruit et son activité peut être modulée par l'attention (Liberman and Guinan, 1998; Nieder and Nieder, 1970). Il peut également avoir un effet protecteur sur le système auditif car en réduisant l'amplification cochléaire, il agit sur les mécanismes de la transduction mécano-sensorielle en aval (Rajan, 1988).

3.2 Réflexe oreille moyenne

Le réflexe de l'oreille moyenne (ROM) est contrôlé par les motoneurones du noyau VII qui agissent sur le muscle stapédien *via* le nerf facial (Venet et al., 2011). Ce réflexe modifie la compliance de la chaîne ossiculaire de l'oreille moyenne en limitant la mobilité de l'étrier.

Ce réflexe est bilatéral ; la stimulation sonore d'une seule oreille déclenche le ROM dans les deux oreilles. Il est provoqué par des stimulations sonores de l'ordre de 80 dB, mais il peut également être mis en jeu lors d'autres types de stimulations (mastication, vocalisation,

stimulation faciale). L'activité de ce réflexe peut être perturbée par l'inhalation de solvant ; cette situation de co-exposition est fréquente en secteur professionnel (Campo et al., 2014; Carreres Pons et al., 2017).

Le seuil de déclenchement de ce réflexe, sa dynamique d'action ainsi que sa force (réduction de l'admittance de l'oreille moyenne) sont fonction de la fréquence, de l'intensité et du type de bruit (tonalité ou bruit large bande). Son effet est maximal lors de stimulations sonores bilatérales proches de 1000 Hz et pour des bruits large bande plutôt que des tonalités (Wilson and McBride, 1978).

Le ROM peut être déclenché par le bruit impulsionnel, mais la latence de déclenchement étant de l'ordre de 100 ms chez l'Homme (Prabhu et al., 2015; Rossi and Solero, 2009), ce délai est trop long pour réduire l'onde de pression entrant dans la cochlée (Rossi and Solero, 2009). Ainsi, ce type de réflexe est efficace sur les bruits continus, mais inefficace pour réduire l'impact auditif d'un bruit impulsionnel (Campo et al., 2014).

Enfin, le seuil de déclenchement du ROM est particulièrement sensible à la fatigue auditive, ce qui rend cette mesure intéressante dans le cadre de la prévention du risque auditif en milieu professionnel (Venet et al., 2014a). En effet, la fatigue révèle une souffrance du système auditif engendrée par une exposition sonore présente qui permettrait au service de santé d'agir précocement, avant même le constat d'un déficit auditif définitif.

4 La fatigue auditive

La fatigue auditive est définie comme un phénomène réversible qui témoigne de la souffrance du système auditif, souffrance due à de fortes et/ou longues sollicitations acoustiques. Elle se traduit par une baisse temporaire des performances auditives qui découle des nombreuses modifications physiologiques sur les différents étages du système auditif se produisant lors d'une exposition sonore.

La fatigue auditive étant un phénomène complexe aux origines multiples, la mesure de cette fatigue pourra donc être différente selon la spécificité du test auditif employé à un élément particulier du système auditif ou, au contraire à la prise en compte du système auditif dans son ensemble. Ainsi, des mesures d'otoémissions reflétant spécifiquement le fonctionnement des cellules ciliées externes (Avan et al., 2001b; Robles and Ruggero, 2001) ne caractérisent pas une fatigue comparable à celle mesurée par audiométrie tonale ; en effet, cette dernière intègre l'ensemble des signaux aux différents étages du système auditif, cortex auditif compris (Ulualp et al., 2016).

La complexité de la fatigue auditive apparaît également au travers de la récupération complète des performances initiales dont les différentes phases peuvent durer de quelques minutes à quelques semaines (Kujawa and Liberman, 2009; Puel et al., 1998; Ward, 1970). La durée de récupération de la fatigue varie également d'un individu à l'autre et elle dépend de l'intensité, de la durée, et de la fréquence d'exposition (Clark, 1991; Hétu, 1982).

4.1 Mécanismes de la fatigue auditive

Les mécanismes sous-jacents aux élévations temporaires de seuil (*Temporary threshold shift*, TTS) induits par le bruit sont plus difficiles à identifier que ceux des pertes auditives, car en plus de leur caractère temporaire, ils impliquent probablement plus de structures et de processus, et parce que bon nombre de changements peuvent être submicroscopiques (Wang et al., 2002).

4.1.1 Cellules piliers et implantation des stéréocils des CCE dans la membrane tectoriale

En 1980, Tonndorf a émis l'hypothèse que le découplage entre l'extrémité des stéréocils des cellules ciliées externes et la membrane tectoriale était l'une des modifications structurelles

liée à une élévation temporaire des seuils auditifs (Tonndorf, 1980). Cette hypothèse a été approfondie chez le chinchilla en analysant les évolutions histopathologiques consécutives à une exposition continue à un bruit de bande d'octave de 86 dB (4 kHz, 86 dB) pendant 24h. Une telle exposition a provoqué une élévation de seuil temporaire (Nordmann et al., 2000). Une déformation des piliers offrant l'aspect d'un gauchissement¹ a été observée en fin d'exposition, suivie rapidement d'un découplage des stéréocils des CCE de la membrane tectoriale. Ces phénomènes étaient localisés sur la zone de l'organe de Corti mise en mouvement par l'exposition sonore. Cette signature histopathologique était la seule visible sur l'ensemble des animaux exposés. Quelques animaux présentaient également une vacuolisation sous les CCI. Hormis le découplage, l'aspect des stéréocils des CCE et CCI était normal. La strie vasculaire ne montrait pas non plus de dommage. Dans les oreilles ne présentant pas d'élévation du seuil auditif permanent (*Permanent threshold shift*, PTS), tous les signes histopathologiques avaient disparu entre 3 et 14 jours après l'exposition, les piliers avaient retrouvé leur rigidité et leur alignement, l'organe de Corti avait de nouveau une épaisseur normale et il n'y avait plus de stéréocils découplés. En revanche, les quelques cochlées souffrant de PTS montraient des pertes de cellules ciliées internes et externes localisées et une déafférentation partielle dans la zone de l'organe de Corti mise en mouvement par l'exposition sonore.

Le gauchissement des piliers et la perte d'épaisseur de l'organe de Corti, même sous les CCE, suggèrent également un affaissement partiel et temporaire des cellules de Deiters. Il a d'ailleurs été montré qu'un bruit de bande d'octave centrée sur 4 kHz à 81 dB modifiait la distribution des différentes formes de tubuline dans les piliers et dans les cellules de Deiters (Pack et al., 1998). Or les microtubules constituent le cytosquelette des cellules et par là-même contribuent à la forme et la rigidité des cellules (Tolomeo and Holley, 1997).

4.1.2 Raccourcissement du clou des stéréocils

Si des ruptures du clou du stéréocil dans le plateau cuticulaire peuvent être observées lors d'expositions intenses (Liberman, 1987), un raccourcissement du clou de la partie supra-cuticulaire (cf.

¹ Déformation de la surface initialement plane d'un matériau, d'une structure.

Figure 9) peut être mesuré lors d'expositions plus modérées provoquant une élévation temporaire du seuil auditif de 40 dB chez le chat (Liberman and Dodds, 1987). Ce raccourcissement réversible du clou supra-cuticulaire pourrait alors diminuer la rigidité des touffes de stéréocils et perturber ainsi temporairement le fonctionnement de "l'amplificateur cochléaire". Dans cette situation, les CCE verraient leur accord fréquentiel modifié ce qui dégraderait localement la sensibilité cochléaire.

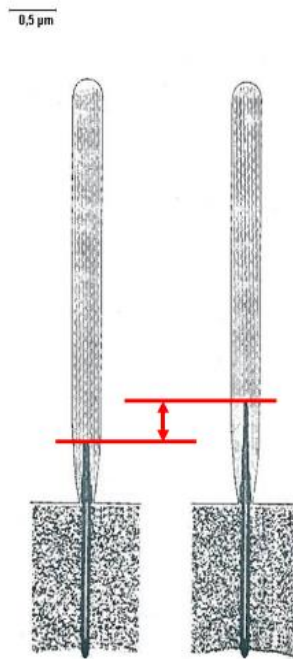


Figure 9 : Représentation schématique de la diminution de la partie supracuticulaire du clou des stéréocils.

Il est à noter que le raccourcissement supra-cuticulaire du clou est un phénomène qui, bien que réversible, pourrait demander une longue période de récupération avant de retrouver sa longueur initiale. En effet, (Liberman and Dodds, 1987) ont pu constater que, 16 heures après l'exposition sonore, le clou restait plus court chez les chats exposés et que ces derniers souffraient toujours d'un déficit auditif.

4.1.3 Amplificateur cochléaire

"L'amplificateur cochléaire" est constitué des CCE qui jouent un rôle clé dans l'amplification active rétrocontrôlée des stimulations sonores. Il n'y a pas d'amplification active dans la zone discriminant les basses fréquences, en d'autres termes à l'apex de la cochlée ; cette

amplification n'est efficace que pour les fréquences moyennes et élevées de 1000 à 20 000 Hz (Dewey et al., 2021; Ulfendahl, 1997). Cette amplification permet notamment d'obtenir une très fine discrimination des fréquences et une grande sensibilité pour percevoir les sons très faibles.

La mesure des produits de distorsion (PDA) résulte directement du fonctionnement de cet amplificateur cochléaire. Les otoémissions évoquées par des tonalités f_1 et f_2 engendrent une réponse de l'oreille interne qui génère des distorsions naturelles issues des mécanismes actifs d'amplification de la cochlée : l'électromotilité des CCE. La mesure du signal issu de la cochlée à la fréquence $2f_1-f_2$ permet donc d'obtenir des informations objectives sur le fonctionnement des CCE.

Depuis leur mise en évidence par Kemp en 1978 (Kemp, 1978), les PDA sont communément utilisés en recherche expérimentale chez l'animal (Amellya et al., 2021; Davis et al., 2004; Pouyatos et al., 2002) comme en clinique chez l'Homme (Avan et al., 2001b; Bonfils et al., 1994; Su et al., 2021). Des expositions sonores uniques ou répétées ne produisant pas de PTS peuvent provoquer des réductions d'amplitude du PDA atteignant 20 dB, soit une réduction de l'amplitude vibratoire du phénomène d'un facteur 10 (Campo et al., 2011; Fernandez et al., 2020). Ces diminutions d'amplitude sont particulièrement marquées au niveau de la cloison cochléaire qui vibre de 0,5 à 1 octave au-dessus de la fréquence centrale du spectre de l'exposition sonore. Ces auteurs ont également montré que la durée de récupération de l'amplitude du PDA pouvait dépasser 24 h. Ainsi, après une exposition de 4 semaines à 86,2 dB (6h/jour, 5j/semaine), des rats présentaient une réduction du PDA de 18 dB, 2 heures post-exposition, puis de 11 dB, à 20 heures post-exposition, pour finalement récupérer complètement un mois plus tard.

La cinétique du retour à une amplitude normale des signaux générés par l'amplificateur cochléaire est comparable à celle de la restauration de la longueur supra-cuticulaire des cils des stéréocils. L'autre phénomène à mettre à l'actif de la fatigue auditive est lié à la libération d'ATP provoquée par les stimulations sonores. Cette libération agit sur les récepteurs purinergiques P2X2, notamment au niveau des stéréocils et de la plaque cuticulaire des CCE mais également sur les cellules épithéliales de l'organe de Corti (Wang et al., 2003). Cette activation des récepteurs P2X2 provoque l'ouverture des canaux ioniques associés concourant à une réduction du potentiel endolymphatique et surtout une réduction de la différence de

potentiel entre l'endolymphe et le compartiment intracellulaire des CCE (Muñoz et al., 1995). La différence de potentiels entre le milieu endolymphatique et le milieu intracellulaire peut être divisée par 2, passant de 80 à 40 mV, en cas de sur-stimulation. Wang et collaborateurs, 2003, ont également montré qu'une exposition sonore de 6 h, dont l'intensité se situe entre 90 et 120 dB, entraînait chez le rat une augmentation de l'expression des canaux P2X2. Par ailleurs, les souris génétiquement déficientes pour le récepteur P2X2 ne développent pas de TTS mais ont une grande sensibilité aux synaptopathies (cf. § 4.1.4) et neuropathies périphériques (Housley et al., 2013). Ce mécanisme de régulation impliquant les canaux P2X2 intervient rapidement, dès les premières minutes d'une stimulation sonore (constante de temps exponentielle d'environ 3 minutes) (Cederholm et al., 2019). Cependant, la lenteur de la récupération après une exposition sonore activant les récepteur P2X2 n'est pas directement liée à la persistance d'ATP dont la demie vie est courte (hydrolyse rapide) dans le milieu extracellulaire ; ceci est corroboré par la récupération du potentiel endocochléaire dans les minutes suivant la fin de l'exposition sonore (Thorne et al., 2004). Selon Cederholm et collaborateurs, 2019, des mécanismes d'action secondaires, de longue durée, pourraient être induits par l'activation des canaux P2X2 dans les cellules de soutien et notamment au niveau des cellules de Deiters (Chen and Bobbin, 1998).

L'activation des récepteurs P2X2 par l'ATP apparaît donc comme un phénomène qui, en développant une fatigue lors de l'exposition sonore, permet de préserver l'audition en réduisant notamment l'activité des CCE.

4.1.4 Excitotoxicité glutamatergique

Une sollicitation sonore prolongée et de forte intensité provoque une libération massive de neurotransmetteur (glutamate) sous les cellules ciliées, notamment les CCI (cf. Figure 10). Le glutamate relargué dans la fente synaptique se lie aux récepteurs de type AMPA (GluR2-4) des terminaisons des neurones du ganglion spiral (voie afférentes) (Ruel et al., 1999). Tout comme les dommages ischémiques provoqués par l'excitotoxicité du glutamate dans le cerveau, le rôle excitotoxique du glutamate sous les CCI a été démontré de longue date (Pujol et al., 1993). En effet, l'application localisée d'un agoniste du glutamate produit une vacuolisation similaire à celle observée lors d'exposition sonore. A l'inverse, des antagonistes du glutamate réduisent l'excitotoxicité provoquée par le bruit (Jäger et al., 2000; Puel et al., 1994; Pujol et al., 1985).

Une étude menée par Weisz et al., 2009, indique que la transmission glutamatergique se produit également dans quelques synapses entre les fibres afférentes et des cellules ciliées externes. L'immunomarquage suggère cependant l'expression de différents sous-types de récepteurs postsynaptiques au glutamate sous les CCI et sous les CCE (Liberman et al., 2011). Ces différences pourraient affecter l'entrée de Ca^{2+} et expliquer pourquoi l'excitotoxicité est plus marquée sous les CCI que sous les CCE.

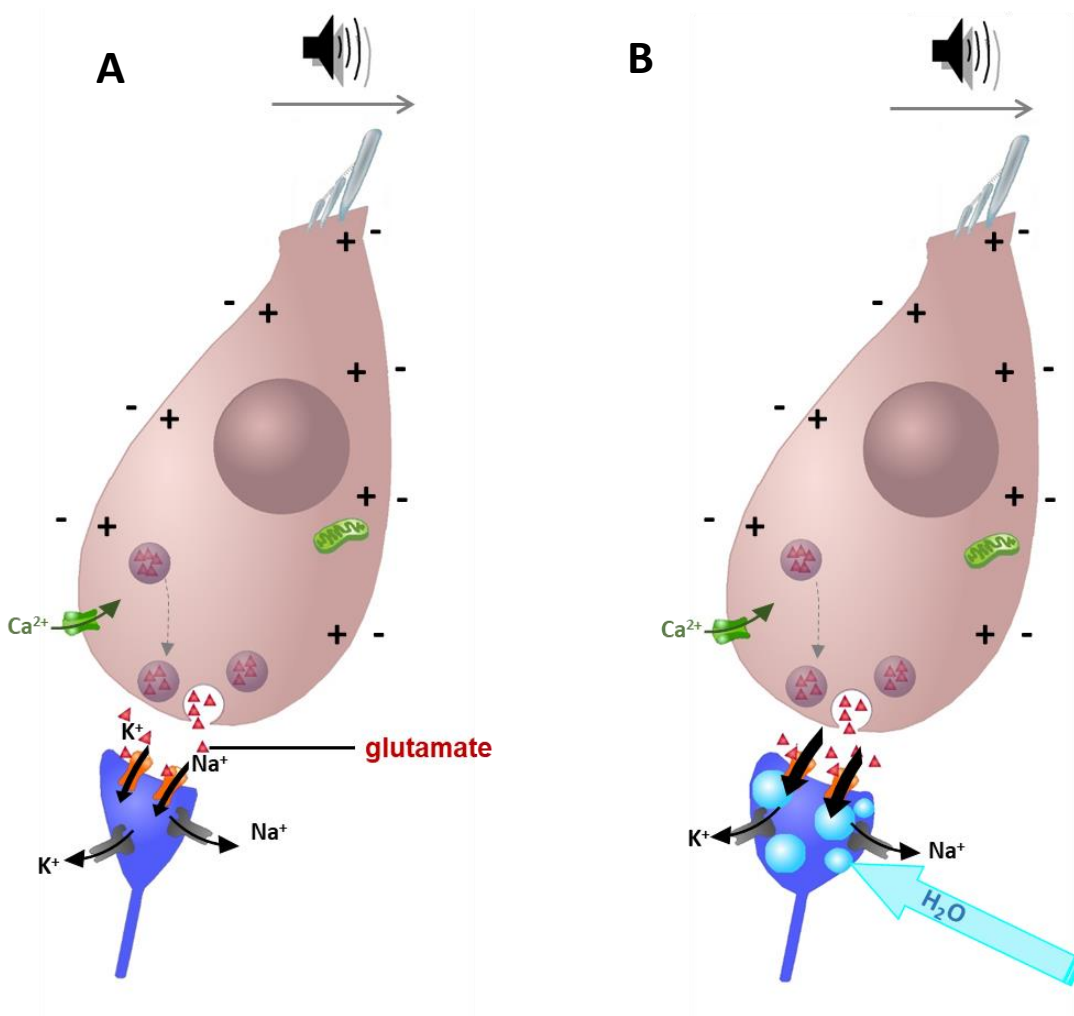


Figure 10 : Représentation du phénomène d'excitotoxicité. A) Sollicitation modérée de la cellule ciliée interne sans excitotoxicité. B) Sollicitation forte et prolongée de la cellule ciliée interne provoquant une excitotoxicité glutamatergique.

L'accumulation de glutamate dans la fente synaptique provoque l'ouverture prolongée des récepteurs postsynaptiques ioniques, ce qui entraîne un afflux important de cations dans le bouton postsynaptique accompagné d'une entrée passive d'anion chlorure. Or, cette élévation de la concentration ionique est toxique. L'hyperconcentration ionique engendre

alors un flux osmotique visant à réduire cette concentration, donc la toxicité. Ces mouvements d'eau vont provoquer la formation de vacuoles au niveau des boutons dendritiques, ce qui stoppe la genèse de potentiels neurosensoriels. Si le phénomène de stimulation persiste trop longtemps, l'augmentation de la taille des vacuoles peut provoquer l'éclatement de la synapse entre les CCI et les terminaisons postsynaptiques des fibres nerveuses afférentes (Puel et al., 1998; Pujol, 1991). Le gonflement de l'espace synaptique peut également s'accompagner d'un gonflement du corps des cellules ciliées elles-mêmes, comme rapporté par Liberman and Dodds, 1987.

Dès le début des années 1980, il a été montré que le gonflement sous les cellules ciliées internes pouvait être observé même lorsque les expositions ne provoquaient qu'une élévation temporaire du seuil (Robertson, 1983).

La vacuolisation est un phénomène qui peut apparaître chez le chat ou le cobaye en une dizaine de minutes seulement lorsque les niveaux sonores sont compris entre 110 et 120 dB (Liberman and Dodds, 1987; Puel et al., 1998).

Si l'on se base sur la mesure du potentiel d'action composite (PAC) qui correspond à la synchronisation des signaux dans la cochlée lors d'une stimulation acoustique, la récupération de la fatigue mesurée chez les animaux peut durer de 1 à 2 semaines. En fait, peu de données sont disponibles sur la durée nécessaire à la disparition des vacuoles. Les animaux mis à mort dans la demi-heure suivant l'exposition sonore montrent des vacuolisations massives sous les CCI (Liberman and Dodds, 1987; Puel et al., 1998). Puel et al., 1998, ont mentionné que les lésions synaptiques causées par l'excitotoxicité glutamatergique étaient totalement réversibles une semaine après exposition. Ils en ont déduit qu'un mécanisme de réparation synaptique était fortement impliqué dans la restauration de la fonction auditive après une surexposition sonore.

Puel et al., 1995, ont suivi l'évolution de cochlées après une perfusion aiguë d'AMPA dans la périlymphe provoquant une excitotoxicité massive (destruction des dendrites synaptiques) et la disparition des potentiels d'action composite (PAC). Après 24 heures, les PAC étaient de nouveau mesurables chez 30% des cobayes et quelques synapses apparaissaient sur les dendrites reformées selon un mécanisme similaire au développement cochléaire initial. Cinq jours après la perfusion, la mesure fonctionnelle des PAC montrait une récupération totale

avec des synapses efférentes et afférentes sous les cellules ciliées internes présentant un aspect normal. Néanmoins, la reconstruction synaptique sous les cellules ciliées internes peut être imparfaite avec une réorganisation et une modification du type de fibres afférentes. De plus, l'entrée massive et répétée de Ca^{2+} à l'extrémité des axones des neurones du ganglion spiral, lors des chocs excitotoxiques, peut déclencher une cascade métabolique qui altère la fonction neuronale pouvant aller jusqu'à la mort cellulaire. On parle alors de neuropathie périphérique (Szydlowska and Tymianski, 2010).

4.1.5 Neuropathie périphérique des fibres nerveuses auditives

La déafférentation neuronale des CCI se traduit, à son stade terminal, par une diminution de la densité des corps cellulaires neuronaux dans le ganglion spiral de la cochlée (Campo et al., 2011). La disparition complète du corps cellulaire du neurone étant longue, l'observation des ganglions spiraux sous-estime la synaptopathie en cours qui débute par la disparition de la synapse en contact avec la CCI (Fernandez et al., 2020). Ce phénomène apparaît notamment lors d'expositions sonores modérées et répétées, à des doses de bruit plus faibles que celles engendrant une perte de CCI ou CCE (Fernandez et al., 2020) en raison d'une libération excessive de glutamate (Puel et al., 1998; Robertson, 1983). La synaptopathie et la neuropathie sont impliquées dans les pertes auditives masquées ; en effet, elles peuvent être présentes bien que le seuil auditif reste inchangé, et ceci chez l'animal (Kujawa and Liberman, 2009) comme chez l'Homme (Viana et al., 2015; Wu et al., 2019).

Comme Puel et al. (1995, 1998), Shi et al. (2015, 2013) ont observé une récupération allant jusqu'à 90% du nombre de synapses chez le cobaye et la souris C57BL/6J à la suite d'expositions sonores ne provoquant qu'un TTS. Ils ont également observé, chez la souris, un ré-appairage des rubans postsynaptiques séparés à la suite de l'exposition sonore et une localisation mouvante de ces structures durant la récupération qui s'était poursuivie jusqu'au 14^{ème} jour après exposition. A l'instar des auteurs précédents, Hickman et al., 2020, ont observé une restauration allant jusqu'à 90% des synapses chez le cobaye. En revanche, Kujawa and Liberman, 2009; Lin et al., 2011 ont conclu que la synaptogénèse sous les cellules ciliées internes, consécutive à un choc excitotoxique, était très faible voire inexistante. En effet, ils ont observé que les seuils cochléaires mesurés, soit par la mesure des amplitudes des réponses auditives du tronc cérébral (ABR), soit par celles des produits de distorsion acoustique (PDA), étaient rétablis après une semaine malgré la perte d'environ 50% des

terminaisons nerveuses auditives. Dans de telles situations, l'analyse immunohistochimique a montré que les rubans présynaptiques des CCI se déplaçaient de la position basolatérale vers le haut de la cellule (rapprochement du noyau) du côté modiolaire. Ces analyses ont également mis en évidence une dissociation de certains rubans présynaptiques qui n'étaient plus appairés à un bouton synaptique (cf. Figure 11). Ces observations histologiques montrent l'importance des rubans présynaptiques (taille, position) et du type de fibre afférente associé : fibre à haut taux de décharges spontanées ou à bas taux de décharges spontanées.

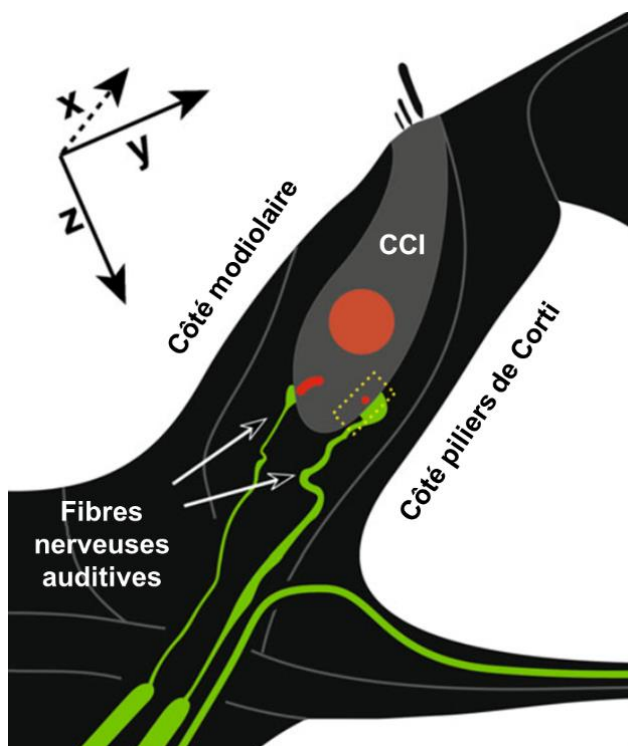


Figure 11 : Schéma illustrant l'innervation afférente normale de la cellule ciliée interne. Deux fibres nerveuses cochléaires non myélinisées (vert) établissant un contact synaptique avec une CCI sont représentées. Sur chaque synapse, un ruban pré-synaptique (rouge) est présent dans la CCI. (Source image adaptée de Lin et al., 2011b)

Le bruit peut donc induire une dégénérescence et une réorganisation des synapses en réduisant d'une part, le nombre de synapses sous les CCI et d'autre part, le nombre de fibres à bas taux de décharges, sans oublier le positionnement des synapses restantes. Ce type de neuropathies périphériques ne se traduit pas par une augmentation du seuil auditif, dont la valeur se maintient tant que la perte de fibres nerveuses afférentes est inférieure à 50%. D'ailleurs, ce constat est valable aussi bien après des expositions sonores (Kujawa and Liberman, 2009), qu'à la suite des effets de l'âge (Sergeyenko et al., 2013). Cette neuropathie

a été mise en évidence chez toutes les espèces de mammifères évaluées, y compris chez l'Homme (Wu et al., 2019). Une fois enclenchée, la mort du premier neurone en contact avec la CCI n'est pas réversible, ce n'est donc plus un phénomène directement associé à la fatigue auditive. En revanche, le phénomène de mort cellulaire est à l'œuvre en cas de répétition d'expositions sonores, chacune produisant de la fatigue auditive, c'est-à-dire une élévation temporaire du seuil auditif. On voit donc par-là que la fatigue auditive peut altérer le système auditif périphérique et que ces altérations finissent par avoir un impact en provoquant notamment une presbycousie précoce chez de jeunes adultes (Campo et al., 2011; Fernandez et al., 2015; Viana et al., 2015).

4.1.6 Sensibilité des types de fibres afférentes aux expositions sonores

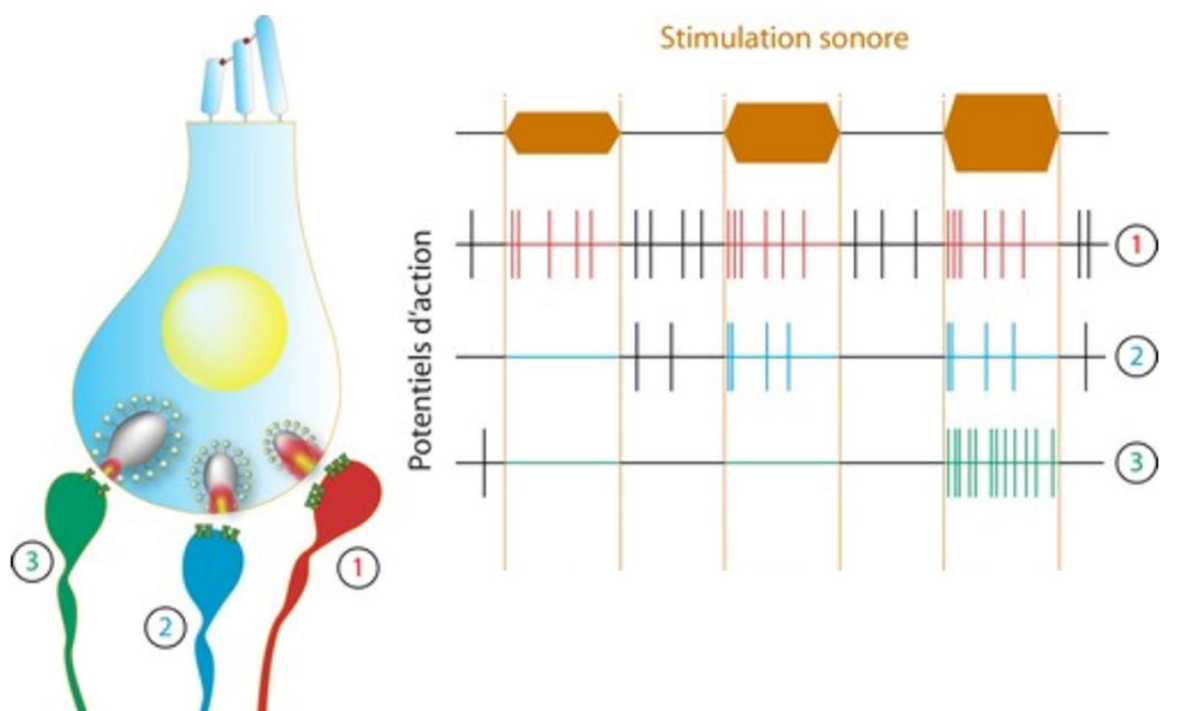


Figure 12 : Représentation de la conformation du ruban présynaptique et de l'activité des fibres 1) à haut taux de décharges spontanées, 2) à moyen taux de décharges, 3) à bas taux de décharges spontanées (source image adaptée de <http://www.cochlea.eu>).

Chaque neurone des ganglions spiraux n'est en contact qu'avec une seule CCI, mais en fonction de la position des CCI le long de l'organe de Corti (accord tonotopique) et de l'espèce de mammifère concernée, chaque CCI possède entre 10 et 30 synapses avec des fibres afférentes (Bohne et al., 1982; Liberman et al., 1990; Stamatakis et al., 2006). Chez l'Homme,

le nombre de fibres afférentes connectées par CCI est compris entre 10 et 20 en fonction de la fréquence chez les sujets de moins de 20 ans. Ce nombre décroît entre 4 et 8 chez les sujets de plus de 60 ans (Wu et al., 2019). Plusieurs types de fibres auditives afférentes font synapses avec les cellules ciliées internes (Liberman, 1978) ; elles se distinguent en fonction du taux de décharges spontanées (cf. Figure 12).

- Fibres à haut taux de décharges (supérieur à 20 potentiels d'action par seconde au repos). Ces fibres ont une forte activité spontanée, elles produisent une réponse évoquée pour de faibles stimulations sonores mais elles saturent rapidement lorsque l'intensité sonore croît (dynamique inférieure à 30 dB) (Winter et al., 1990). L'espace synaptique de ces fibres avec la CCI est étendu. Ces synapses font généralement face à des rubans synaptiques de petites tailles mais très denses (fort contraste en imagerie électronique cf. Figure 13) dans les corps cellulaires des CCI (Liberman et al., 1990).
- Fibres à moyen taux de décharges (compris entre 1 et 20 impulsions par seconde). Ces fibres ont une activité spontanée moyenne et sont activées pour des stimulations sonores intermédiaires.
- Fibres à bas taux de décharges (inférieur à 1 impulsion par seconde). Ces fibres ont une très faible activité spontanée. Elles répondent à des stimulations sonores élevées et elles ont une large dynamique avant saturation (60 dB). Grâce à leur seuil plus élevé, les fibres à bas taux de décharges sont moins sensibles au bruit de masquage et sont donc cruciales pour la discrimination dans le bruit (Costalupes et al., 1984). Elles auraient également un rôle capital pour le déclenchement du réflexe de l'oreille moyenne (Liberman, 1988).

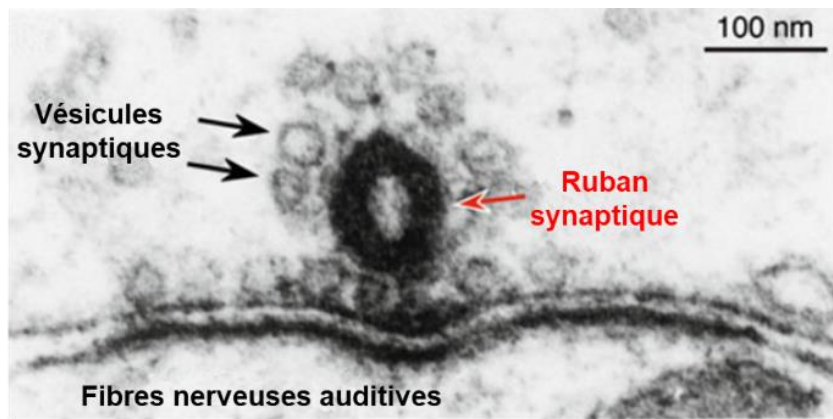


Figure 13 : Complexe synaptique illustrant le ruban pré-synaptique très dense (appairage à une fibre à haut taux de décharge spontanée) et son halo de vésicules synaptiques dans la CCI. Microscopie électronique à transmission (source image adaptée de Liberman, 1980)

Après une exposition sonore engendrant une fatigue sans perte auditive, Furman et al., 2013 ont montré que la corrélation entre la taille des rubans présynaptiques et le taux de décharges spontanées n'était plus vérifiée. Ils ont également observé une redistribution de la taille des rubans en fonction de la localisation dans la CCI. Ils ont surtout mis en évidence une diminution drastique du nombre de fibres à bas taux de décharges dans la zone cochléaire correspondant aux fréquences de la stimulation sonore. Bien que les seuils auditifs et les amplitudes de produit de distorsion fussent normaux, après 2 semaines post-exposition sonore, la réduction de l'onde 1 des potentiels évoqués du nerf auditif, mesurés 30 dB au-dessus du seuil, traduisait la disparition des fibres à bas taux de décharges spontanées.

La neuropathie qui suit une exposition sonore sans perte auditive mesurée est donc une neuropathie sélective qui affecte prioritairement les fibres à bas taux de décharges, fibres capitales pour la discrimination du son dans le bruit. La grande sensibilité des fibres à bas taux de décharges pourrait être due à la moindre densité de mitochondries dans ces fibres. En effet, les mitochondries procurent une grande capacité à stocker du Ca^{2+} , propriété qui serait cruciale pour la survie des neurones lors des expositions sonores engendrant de la fatigue auditive (TTS sans PTS) (Szydlowska and Tymianski, 2010).

4.1.7 Plasticité du système auditif central

La plasticité neuronale peut palier, dans une certaine mesure, les effets délétères d'une exposition sonore. Cette plasticité est comprise dans la mesure de la fatigue auditive, notamment lorsque cette dernière est évaluée à partir d'une réponse subjective du sujet obtenue par audiométrie tonale ou vocale. En effet, la réponse intègre alors le fonctionnement de l'ensemble des voies auditives dont la plasticité centrale.

Le premier centre nerveux pouvant moduler la réponse auditive périphérique est le noyau cochléaire dorsal. C'est un centre auditif primaire dont les fibres afférentes font synapse dans le colliculus inférieur controlatéral. En raison de cette connexion, les changements d'activités spontanées au sein du noyau cochléaire dorsal peuvent influencer les propriétés fonctionnelles des neurones du colliculus inférieur qui, à leur tour, peuvent influencer l'activité des structures supérieures telles que le corps genouillé médian et le cortex auditif. L'activité du noyau cochléaire dorsal a principalement été étudiée lors de travaux mettant en évidence son rôle dans la naissance d'acouphènes. Les protocoles (expositions sonores, délai post-exposition) n'étaient pas optimaux pour étudier des phénomènes transitoires liés à la fatigue auditive. Cependant, il a été montré que d'intenses stimulations sonores augmentent la sensibilité des neurones glutamatergiques du noyau dorsal, une augmentation qui peut être néanmoins modulée par des stimulations cholinergiques. Il n'en demeure pas moins que, chez le rat, le résultat d'une stimulation acoustique intense se traduit par une augmentation du nombre de potentiels d'action provenant surtout des neurones en surface du noyau dorsal (Kaltenbach and Zhang, 2007a). Si l'activité spontanée de neurones est doublée, l'activité évoquée augmente de manière plus limitée (Finlayson and Kaltenbach, 2009). Cette hyperactivité n'apparaît que 2 à 5 jours après l'exposition sonore mais elle est d'abord précédée d'une période de sous-activité (Kaltenbach et al., 2000). Cette diminution transitoire serait en lien avec la diminution de l'activité périphérique durant cette période (Liberman and Dodds, 1984).

La seconde structure montrant une activité neuronale plastique est le colliculus inférieur qui peut augmenter son activité spontanée. Cette hyperactivité apparaît chez le cobaye entre 4 et 12 heures après une exposition sonore de forte intensité (W. H. A. M. Mulders and Robertson, 2013). Les auteurs ont montré que l'hyperactivité était généralisée à l'ensemble des zones du colliculus, mais au-delà de 24h, l'hyperactivité se limite progressivement aux

zones correspondant aux régions de la cochlée présentant des dommages suite à l'exposition. Alors que pour le noyau dorsal la plasticité se traduit par une hypersensibilité cholinergique, la plasticité dans le colliculus relève davantage d'un mécanisme de levée d'inhibition de type GABAergique (Ono and Ito, 2018).

Enfin, le cortex auditif peut être également le siège d'une modification de l'activité neuronale. Immédiatement après l'exposition sonore, les réponses évoquées par des stimulations sonores comme le nombre de groupes de potentiel d'action et celui de potentiels par groupe sont augmentés, tandis que le taux de décharges spontanées reste identique (Noreña and Eggermont, 2003). Au moins 2 heures après exposition, l'activité spontanée des neurones, dont la fréquence caractéristique est située en dehors de la bande fréquentielle d'exposition sonore augmente, tandis que les réponses évoquées par des stimulations sonores reviennent à des valeurs normales.

Par sa plasticité, le système auditif central est donc en mesure d'adapter ses réponses aux stimulations provenant des récepteurs auditifs périphériques. Par ce biais, il peut compenser les dysfonctionnements subtils de l'oreille, ou la fatigue auditive périphérique, pour maintenir ses performances. Mais ces adaptations peuvent également être à l'origine de troubles tels que des acouphènes. Le cumul des mécanismes de compensation rétro-cochléaires conduisent parfois à une réponse intégrée dont l'interprétation est plus complexe que la réponse périphérique. Même s'ils sont relativement long à apparaître, ces phénomènes pourraient entraîner une sous-estimation des effets périphériques de la fatigue en fin de journée ou lors d'un éventuel cumul hebdomadaire. En masquant une partie des dommages périphériques permanents, ils peuvent surtout retarder l'identification des modifications de la capacité auditive et donc par exemple retarder la prise en compte d'une situation délétère pour l'audition d'un salarié.

4.2 Innocuité de la fatigue ?

Une hypothèse sous-jacente au concept de fatigue auditive est qu'après récupération, aucun dommage anatomique ou physiologique résiduel ne persiste ; l'augmentation du seuil auditif serait temporaire et le retour au seuil auditif précédent l'exposition en serait le témoin.

Cependant, les éléments décrits ci-avant prouvent le contraire : le TTS n'est pas toujours un état temporaire dont le système auditif sort indemne. En effet, la redondance cellulaire, la plasticité synaptique et neuronale, la latence des phénomènes de dégénérescence et d'apoptose peuvent masquer un temps les effets de la fatigue auditive. À terme, la répétition de fatigue auditive peut conduire à des troubles auditifs permanents.

L'évaluation de la fatigue auditive et la connaissance des facteurs la provoquant ont donc un grand intérêt pour mener une prévention précoce et efficace des troubles auditifs permanents.

5 Évaluation de la fatigue auditive

L'examen de référence dont disposent les services de santé au travail est l'audiométrie tonale liminaire par conduction aérienne. Ils l'utilisent pour évaluer le déficit auditif permanent du salarié. Ce déficit peut être comparé au seuil de reconnaissance de la maladie professionnelle du tableau 42 (AT/MP) si l'activité du salarié est référencée dans ce tableau. Toutefois, cet examen est peu adapté à la mesure de la fatigue auditive car des mécanismes de compensation des voies auditives centrales (cf. § 4.1.7) réduisent la sensibilité de l'audiométrie tonale aux dommages périphériques (W. H. A. M. Mulders and Robertson, 2013; Syka, 2002). De même, la synaptopathie et la neuropathie des fibres afférentes à bas taux de décharges spontanées, fibres à seuil de déclenchement élevé (cf. § 4.1.6) n'est pas visible au seuil d'audition (Viana et al., 2015; Wu et al., 2019). En masquant les décalages de seuils auditifs, ces mécanismes compromettent le diagnostic précoce d'une souffrance cochléaire et celui d'une fatigue auditive périphérique.

Pour mesurer la fatigue auditive périphérique, l'INRS a mis au point et breveté le procédé EchoScan Audio (Venet et al., 2012). Ce procédé est basé sur la mesure des PDA et permet des mesures non invasives, objectives, rapides et reproductibles.

Les PDA sont des sons générés par l'oreille interne et émis par le tympan en réponse à deux sons purs de fréquence f_1 et f_2 . En reflétant spécifiquement le fonctionnement des cellules ciliées externes de l'organe de Corti, la mesure des PDA permet de mettre en évidence une pathologie exclusivement cochléaire, même lorsque les explorations audiométriques classiques trouvent des seuils auditifs normaux (Avan et al., 2001a; Brown et al., 1996; Davis et al., 2004).

Le niveau de PDA produit par l'activité des cellules ciliées externes peut être modulé par deux arcs réflexes (Avan et al., 2013) : le réflexe olivo-cochléaire, dont les fibres nerveuses efférentes innervent les cellules ciliées externes et le réflexe de l'oreille moyenne (ROM), qui est principalement lié à la contraction du muscle stapédien (en présence d'une stimulation sonore suffisante). En rigidifiant la chaîne tympano-ossiculaire, le ROM provoque une réduction de la quantité d'énergie acoustique transmise à l'oreille interne. En conséquence, le déclenchement du réflexe stapédien entraîne une diminution de l'amplitude du PDA. Le

procédé EchoScan réalise la mesure du PDA couplée à une stimulation sonore controlatérale. Ce procédé permet donc d'évaluer le seuil de déclenchement du réflexe auditif qui est particulièrement sensible à la fatigue auditive (Venet et al., 2014a).

Au cours de cette étude, deux types d'examen auditif ont donc été réalisés :

- l'audiométrie tonale liminaire, examen de référence pour le diagnostic de la santé auditive réalisé par les services de santé au travail ;
- la mesure du seuil de déclenchement du réflexe auditif par le procédé EchoScan, examen appliquant une technique innovante, très sensible pour mesurer la fatigue auditive, mais ayant pour corolaire une assise moindre dans le domaine de l'audiométrie.

6 Objectifs

Dans le cadre de la prévention des risques auditifs, l'évaluation des performances auditives des salariés est perfectible. Aujourd'hui, elle se limite uniquement à la mesure du déficit auditif permanent par audiométrie tonale liminaire en conduction aérienne. Or cette mesure n'est pas satisfaisante dans le cadre d'une politique de prévention qui vise à éviter l'installation de troubles auditifs et plus particulièrement du déficit auditif. En effet, un tel constat se fait a posteriori, lorsque le mal est déjà fait.

Pour cette raison, l'évaluation de la fatigue auditive, qui objective la souffrance du système auditif causée par des bruits de forte intensité, peut faciliter la mise en place d'actions de prévention et de moyens de protection avant qu'il ne soit trop tard, c'est-à-dire avant l'installation d'un déficit auditif permanent. Le diagnostic de la fatigue auditive peut être établi en mesurant l'évolution des performances auditives grâce à l'audiométrie tonale liminaire qui détermine le seuil d'audition ou grâce au procédé EchoScan qui mesure le seuil de déclenchement du réflexe acoustique.

Cependant, si on peut aujourd'hui mesurer de manière fiable la fatigue auditive, les facteurs qui induisent une fatigue lors d'une exposition en milieu professionnel restent mal définis. Or, la connaissance de ces paramètres est indispensable pour exploiter la fatigue auditive, pour détecter plus efficacement les situations à risque pour l'audition et pour proposer des actions de prévention adaptées.

Cette étude s'est intéressée au cas des professionnels du secteur de la musique amplifiée. Il s'agit d'une population très exposée mais peu étudiée. Leur exposition présente une forte variabilité au cours de la journée contrairement à celle généralement mesurée en milieu industriel. Ainsi, le secteur de la musique amplifiée permettait d'expérimenter l'effet de cette variabilité sur la fatigue auditive.

Ce projet propose de rechercher les facteurs qui influencent la fatigue auditive. Deux types d'indicateurs ont été distingués : ceux définissant l'exposition sonore d'une part et ceux définissant l'individu d'autre part. Parmi les indicateurs de l'exposition sonore, l'énergie sonore (Leq) et la dispersion des niveaux sonores (quantile, kurtosis) en fonction de la composition fréquentielle (Pondération A ou C, bande d'octave) ont été étudiés. Les facteurs individuels analysés étaient entre autres l'âge, le sexe ou les performances auditives au repos.

De plus, outre les objectifs décrits ci-dessus, l'étude de la cinétique de récupération de la fatigue auditive dans le contexte de l'exposition à de la musique amplifiée devrait permettre de proposer des pistes de prévention pour réduire les risques auditifs encourus par les personnels permanents et temporaires de ce secteur.

7 Matériels et méthodes

Un protocole de recherche impliquant la personne humaine a été conçu pour étudier les liens de causalité reliant la fatigue auditive aux facteurs d'exposition sonore et à ceux propres à chaque individu. Le protocole de l'étude a été approuvé par le comité national d'éthique (CCP Sud Est II : ID-RCB 2018 -A02832-53). Le protocole était composé de deux phases principales : l'inclusion des volontaires puis le recueil de données.

La phase d'inclusion comportait l'information préalable de chaque volontaire, un questionnaire, et permettait de vérifier que le sujet volontaire remplissait les critères d'inclusion.

La phase de recueil des données, qui pouvait être séparée de plusieurs jours de l'inclusion, consistait à mesurer la fatigue auditive (mesures auditives en début et fin de poste de travail) et l'exposition sonore du sujet volontaire au cours d'une journée de travail (cf. Figure 14).

La durée durant laquelle un volontaire est mobilisé pour réaliser les différentes étapes du protocole est un critère crucial pour le bon déroulement d'une étude en entreprise. Chaque minute compte. Une durée trop longue peut conduire le volontaire à stopper sa participation en cours de protocole ou peut engendrer des tensions entre les volontaires, l'employeur et les investigateurs, tensions qui nuisent à la réalisation du protocole. Pour cette raison, le questionnaire a été limité à 38 questions essentielles et les mesures auditives n'ont été réalisées que sur une seule des deux oreilles. Ce protocole a permis de réaliser l'inclusion en environ 15 minutes, les tests de référence en début de poste de travail en environ 20 minutes et les tests post-exposition en moins de 10 minutes lorsqu'ils étaient réalisés par des investigateurs expérimentés.

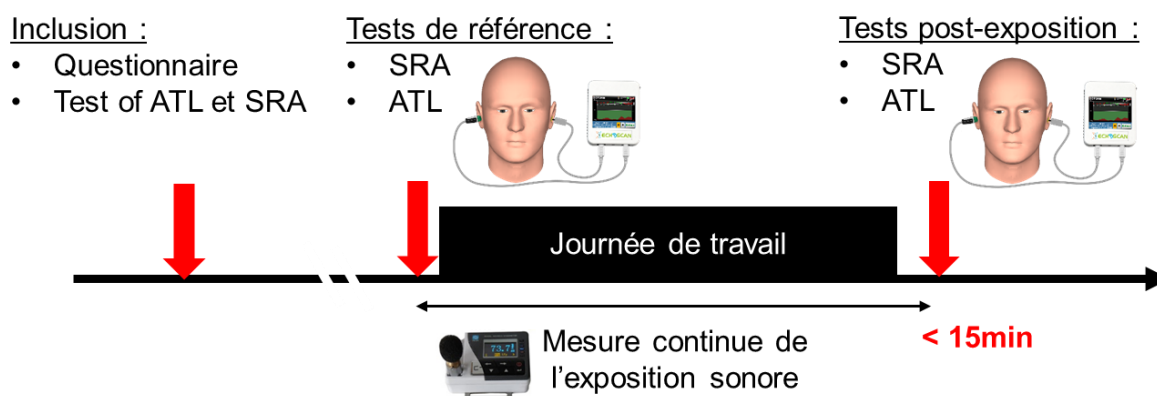


Figure 14 : Protocole suivi par chaque volontaire. SRA, seuil de déclenchement du réflexe acoustique mesuré par ECHOSCAN®. ATL, seuil d'audition en conduction aérienne mesuré par audiométrie tonale liminaire.

Cette étude a été menée afin d'évaluer la fatigue auditive engendrée par des expositions en situations réelles de travail. Les investigations ont donc été réalisées en entreprises avec des volontaires exerçant leur activité dans des conditions habituelles. Le secteur d'activité de la musique amplifiée a été choisi comme terrain d'investigation car il offre une grande diversité d'expositions en termes de niveaux sonores et de distribution de ces niveaux au cours de la journée de travail. C'est également un secteur relativement peu étudié malgré un risque auditif avéré pour les professionnels travaillant dans l'espace de diffusion de la musique (Trompette and Venet, 2020).

7.1 Cohorte de volontaires

La cohorte de cette étude était composée de 100 volontaires âgés de 19 à 65 ans. Ces sujets ont été recrutés parmi des établissements de spectacle, qu'ils soient employés permanents ou intermittents.

Lors de la phase d'information, chaque volontaire a bénéficié d'un entretien au cours duquel il était informé des modalités et des objectifs de l'étude par un investigateur. Il recevait alors la lettre d'information décrivant le déroulement de la recherche (annexe 1). Tous les volontaires ont donné leur consentement écrit pour participer à cette étude avant de déterminer leur éligibilité.

Les antécédents médicaux et acoustiques ont été rassemblés pour tous les participants dans un dossier médical confidentiel.

Les descripteurs des volontaires : âge, sexe, informations sur leur activité professionnelle, et les mesures auditives ont été anonymisés avant leur exploitation afin de garantir le respect des données numériques individuelles, conformément à la réglementation française selon la méthodologie MR-001 de la Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés (CNIL). Ces descripteurs ont été recueillis lors de la phase d'inclusion par un questionnaire. Cent personnes ont rempli les questionnaires mais 14 d'entre elles n'ont pas satisfait aux critères d'inclusion ou n'ont pas pu se libérer pour réaliser le cursus de mesure (cf. Figure 15).

Lors de cette phase, les critères d'exclusion étaient une possible infection de l'oreille, une occlusion par du cérumen ou des anomalies du conduit auditif externe détectées par un examen otoscopique ; une maladie liée au système auditif au cours des 5 dernières années, ou l'utilisation d'un traitement médical pouvant affecter les performances auditives (diurétiques, myorelaxants, aspirine, antibiotiques, etc.). Les personnes ayant un seuil auditif supérieur à 35 dB HL à 4000 Hz ou un seuil de déclenchement du réflexe acoustique supérieur à 92 dB HL étaient également exclues.

La cohorte des volontaires inclus a été divisée en 2 groupes : un groupe de 55 travailleurs exposés à de la musique amplifiée, et un groupe témoin de 31 participants réalisant des tâches administratives ou d'encadrement dans les établissements de spectacle visités et qui n'étaient pas exposés à de la musique amplifiée le jour de la mesure. Après la phase d'inclusion dans le protocole de recherche, chaque volontaire a été mesuré au cours d'une journée durant laquelle il a réalisé son activité normale sans consigne de la part des expérimentateurs.

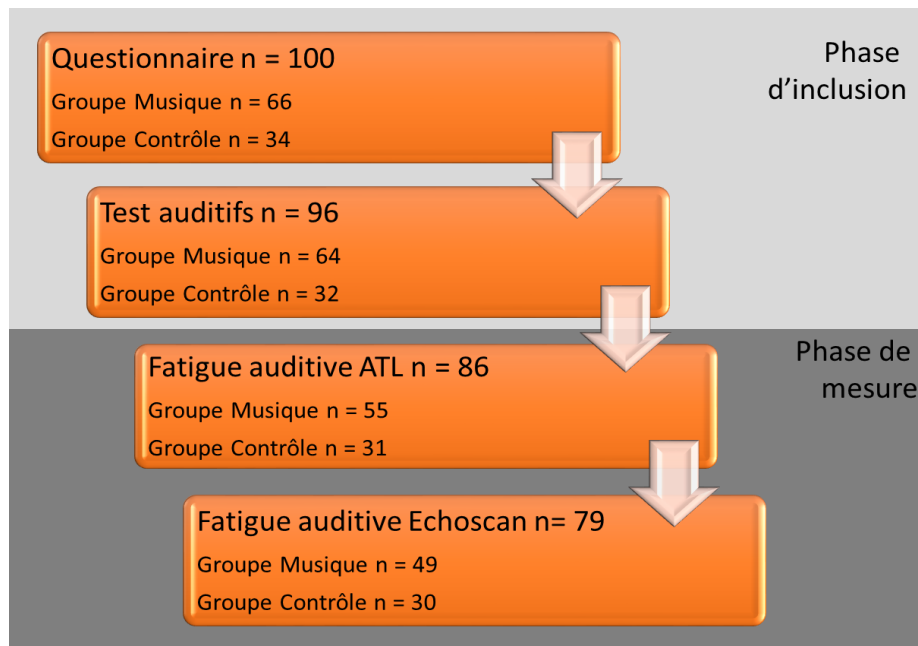


Figure 15 : décompte du nombre de volontaires selon les différentes étapes du protocole

7.2 Questionnaire

Le questionnaire est joint en annexe 2. Il s'appuie en partie sur le questionnaire utilisé par Størmer et al. en 2015. Le questionnaire ne comportait que 38 questions essentielles afin de limiter la durée nécessaire à son renseignement.

Le questionnaire était renseigné avec l'assistance d'un investigateur qui contextualisait les questions et répondait, si le besoin se faisait sentir, aux interrogations des volontaires. La présence de l'investigateur permettait de fiabiliser les réponses obtenues et de réduire la durée de mobilisation du volontaire.

Les objectifs de ce questionnaire étaient multiples :

- 1) vérifier les critères d'inclusion par des questions sur leurs antécédents médicaux et sur des traitements médicamenteux en cours susceptibles d'interférer avec l'audition ;
- 2) obtenir des informations sur les pratiques professionnelles notamment vis-à-vis des protecteurs individuels contre le bruit (PICB), les durées de travail et d'exposition sonore ;
- 3) obtenir des informations décrivant les volontaires et pouvant être exploitées dans le cadre de la recherche des paramètres ayant un impact sur la fatigue auditive. Ces

paramètres sont l'âge, le sexe, la présence de troubles auditifs (acouphènes post-exposition, acouphènes chroniques, hyperacousie, diplacousie, distorsion acoustique).

7.3 Mesures auditives

Deux types d'examens ont été réalisés pour évaluer la fonction auditive et quantifier la fatigue auditive : l'audiométrie tonale liminaire en conduction aérienne et la mesure du seuil de déclenchement du réflexe acoustique par le procédé EchoScan.

L'audiométrie tonale et la mesure du seuil du réflexe acoustique ont été réalisés avec un même modèle d'appareil ECHOSCAN® commercialisé par la société ECHODIA qui intègre l'ensemble des fonctions.

Cet appareil est conforme aux normes et au marquage requis :

- Directive 93/42/CEE, marquage CE notifié 0120
- Sécurité : NF EN 60601-1 ; NF EN 60601-2
- Caractéristiques et performances : NF EN 60645 ; ISO 389-2

Pour cette étude, nous disposions de 3 appareils. Le même appareil était utilisé pour les mesures pré- et post-exposition d'un même volontaire afin de se prémunir de tout écart entre appareils. De même, pour un volontaire donné, le même investigateur réalisait les mesures pré- et post-exposition. Ces mesures étaient toujours réalisées sans connaître au préalable le niveau sonore auquel le volontaire allait être exposé (mesure préexposition) ou avait été exposé (mesures post-exposition).

7.3.1 Mesure du seuil de perception par audiométrie tonale liminaire (ATL)

L'ATL est l'examen de référence des services de santé au travail pour évaluer la fonction auditive. Cet examen permet de mesurer le seuil de perception à différentes fréquences. La fatigue auditive peut être évaluée en comparant les seuils de perception au cours d'une journée.

Afin de limiter la durée des examens, une seule oreille a été mesurée. Cette oreille correspondait à l'oreille de la stimulation sonore contralatérale déclenchant le réflexe auditif lors de la mesure ECHOSCAN®.

Les audiométries ont été réalisées par un expérimentateur en mode manuel avec des stimulations sonores pulsées aux fréquences 250, 500, 1000, 2000, 4000, 6000 et 8000 Hz. Le

choix de ces fréquences est issu d'un compromis permettant de limiter la durée de l'examen. Une progression par octave a été retenue, complétée par la fréquence 6000 Hz. L'ajout de cette fréquence découlait de l'analyse bibliographique (Trompette and Venet, 2020) qui suggérait que le scotome des personnes exposées à de la musique, qu'elle soit amplifiée ou non, était souvent centré sur 6000 Hz plutôt qu'à 4000 Hz comme on l'observe chez les travailleurs des secteurs industriels et comme le reporte la norme ISO 1999:2013 qui estime la perte auditive induite par le bruit.

Les mesures ont été réalisées conformément aux recommandations de la Société Française d'Audiologie, par pas d'intensité croissante de 5 dB. L'examen débutait par la mesure à 1000 Hz avant de tester les fréquences de plus en plus élevées. Après la mesure à 8000 Hz, la mesure à 1000 Hz était répétée, puis les fréquences de plus en plus basses étaient testées.

La norme ISO 8253-1 définit le niveau maximal du bruit ambiant par bande d'octave lors de la réalisation d'une mesure d'ATL. Le cumul de ces niveaux par octave conduit à un niveau ambiant de 43,7 dB(A) (ISO 8253-1:2010). En pratique, le bruit ambiant doit être inférieur à 27 dB(A), selon la Société Française d'Audiologie pour réaliser une audiométrie tonale. Afin de pouvoir réaliser l'ATL dans des conditions acceptables sur site, sans cabine insonorisée, des casques audiométriques de type Echodia DD45-HI ont été employés. Ces casques étaient équipés de coques anti-bruit de type PELTOR H7A offrant un affaiblissement sonore élevé (SNR = 37 dB). Ces casques d'audiométrie ont permis de garantir un niveau sonore sous casque bien inférieur à 27 dB(A). Cependant, lors des mesures réalisées au festival NJP en octobre 2021, le niveau émis en basses fréquences par un club jouant de la musique électro à une centaine de mètres du lieu de mesure, n'a pas permis de réaliser des mesures fiables en-dessous de 500 Hz en post-exposition. La fatigue auditive n'a donc pas pu être mesurée à 250 Hz pour 6 volontaires.

7.3.2 Mesures du seuil du réflexe acoustique par ECHOSCAN®

ECHOSCAN® est un dispositif spécifiquement conçu pour mesurer la fatigue auditive périphérique. Le procédé de mesure est issu de la recherche expérimentale chez l'animal (Venet et al., 2021, 2011). Ce procédé a été breveté par l'INRS (brevet n°2971931 du 31/8/2012) et la société ECHODIA a développé, en collaboration avec l'INRS, un appareil commercial : l' ECHOSCAN®. Au cours de cette thèse, les mesures ont été réalisées avec ce dispositif commercial alors que les précédentes études mettant en œuvre le procédé

EchoScan avaient été menées avec le prototype réalisé à l'INRS (Venet et al., 2012, 2014, 2018).

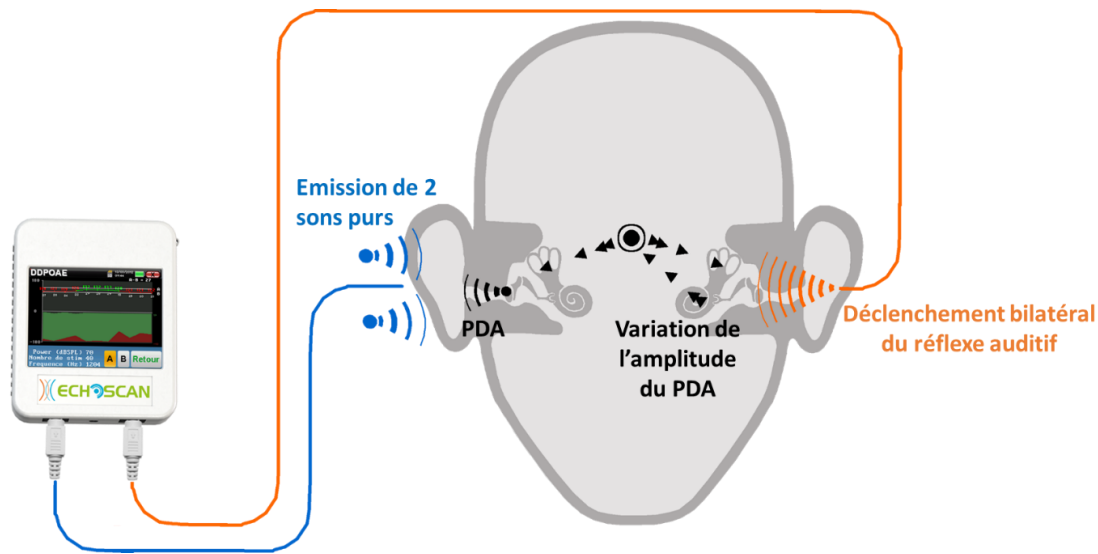


Figure 16 : Procédé EchoScan

Comme l'illustre la Figure 16, ECHOSCAN® réalise la mesure du seuil de déclenchement du réflexe acoustique (SRA) en mesurant les variations de l'amplitude du produit de distorsion acoustique (PDA) provoquées par une stimulation sonore contralatérale. La mesure du PDA est donc cruciale dans le procédé EchoScan. Le PDA est un indicateur spécifique du fonctionnement des CCE qui sont la cible de nombreuses atteintes, qu'il s'agisse d'expositions sonores ou d'agents chimiques.

7.3.2.1 Mesure du Produit de distorsion acoustique

Les PDAs sont des manifestations acoustiques mesurées dans le canal de l'oreille externe qui appartiennent à la famille des otoémissions provoquées. Ils sont obtenus après une stimulation sonore par deux sons purs, appelés primaires, de fréquences f_1 et f_2 et de niveau respectif L_1 et L_2 . Lors des mesures ECHOSCAN®, le rapport entre ces primaires est prédéfini.

Rapport de fréquences $f_2/f_1 = 1,2$

Différence de niveaux $L_1 = L_2 + 6 \text{ dB}$

Une telle stimulation génère des PDA à des fréquences qui correspondent à différentes combinaisons linéaires des fréquences des primaires. Pour les mesures EchoScan, la grandeur

mesurée est le produit cubique : $2f_1-f_2$, car le niveau de celui-ci est le plus important et sa fréquence est située dans une zone fréquentielle intéressante. Les autres produits de distorsion présentent moins d'avantages. Par exemple, le produit de distorsion f_1-f_2 est plus faible en amplitude et se situe dans la zone des basses fréquences donc dans une zone plus perturbée par le bruit de fond. Le produit de distorsion $2f_2-f_1$ est également plus faible en amplitude et sa fréquence se situe au-delà des primaires, ce qui peut poser problème par rapport à la bande passante du microphone de la sonde.

Deux types de mesures du PDA sont réalisés avec le procédé EchoScan:

- 1) le DPgramme est une mesure à différentes fréquences du couple $[f_1, f_2]$ émises à intensité constante ; il permet de choisir le couple de fréquences utilisé pour la mesure du SRA ;
- 2) une approche de type entrée-sortie réalisée avec différentes intensités des primaires mais à fréquences fixes, permettant de déterminer l'intensité qui sera retenue lors de la mesure du SRA.

Afin d'adapter au mieux les fréquences du couple de primaires à l'audition du sujet testé, une mesure de DPgramme est réalisée sur la gamme de fréquence allant de $f_2 = 4000$ Hz à 5000 Hz (cf. Figure 17). Le DPgramme permet de contrôler le bon fonctionnement des cellules ciliées et de définir la meilleure fréquence pour ensuite mesurer le réflexe auditif. En effet, selon l'âge et «l'historique» acoustique du sujet testé, l'audition peut présenter des déficits qui ne permettent pas d'effectuer une mesure par le procédé EchoScan en raison d'un niveau trop faible de PDA. La fréquence $f_2 = 4800$ Hz est choisie préférentiellement car elle présente un bon compromis : elle est suffisamment éloignée de la plage fréquentielle des stimulations sonores déclenchant le réflexe (bande de bruit 600 à 1400 Hz) sans être trop élevée en fréquence. Les mesures de PDA à plus hautes fréquences peuvent être moins reproductibles du fait d'une grande variabilité due au positionnement de la sonde dans le canal auditif. De plus, la gamme des hautes fréquences est également impactée par la presbycousie qui réduit fortement le PDA dans ce domaine fréquentiel. Lors de la mesure du DPgramme, si le niveau de PDA obtenu à une fréquence est supérieur de plus de 2 dB à celui mesuré à 4800 Hz, alors cette fréquence est proposée à l'expérimentateur pour réaliser la mesure du réflexe acoustique. L'expérimentateur peut cependant choisir une autre fréquence parmi celles testées par le DPgramme avant de réaliser la mesure d'entrée-sortie.

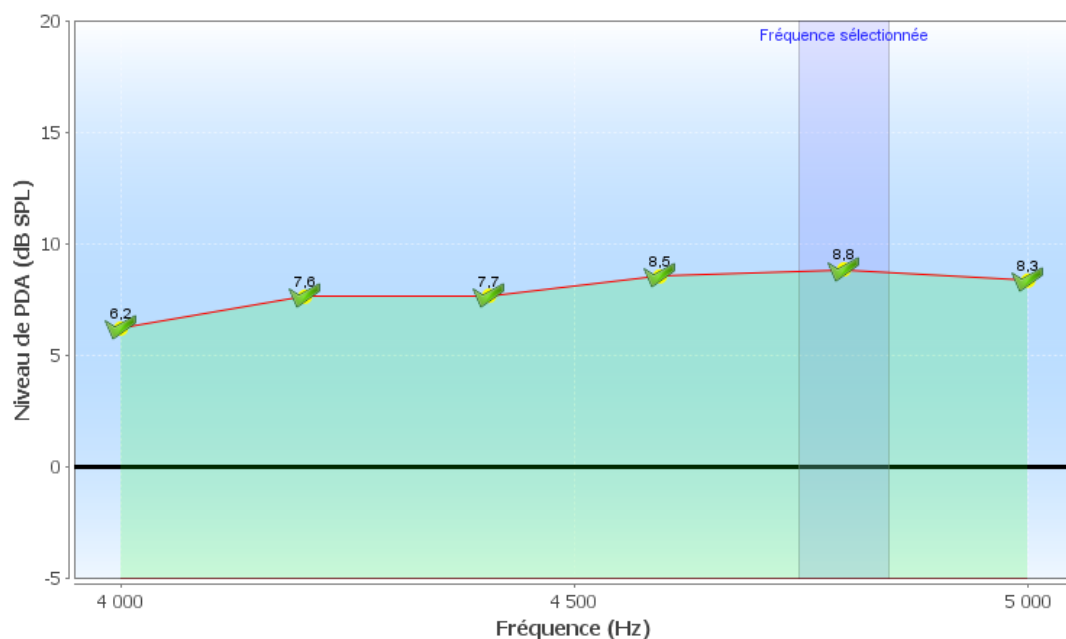


Figure 17 : DPgramme (Homme 39 ans) mesuré pour des fréquences f_2 comprises entre 4000 et 5000 Hz ($f_2 = 1,2 f_1$) et à une intensité fixe de $L_1 = L_2 + 6 = 61$ dB HL.

La mesure d'entrée-sortie permet de choisir le niveau de PDA qui sera utilisé pour la mesure du SRA. Les niveaux des primaires L_1 et L_2 , aux fréquences respectives f_1 et f_2 , conditionnent le niveau de PDA mesuré (cf. Figure 18). Le niveau de PDA hors stimulation sonore déclenchant le réflexe doit satisfaire deux conditions :

- pour que la variation produite par le déclenchement du réflexe soit visible, le PDA doit être suffisamment stable par rapport à la variation produite par le réflexe. Il doit donc être bien supérieur au bruit de fond qui est dépendant du bruit ambiant du local dans lequel est réalisée la mesure. Un niveau supérieur à 6 dB est généralement nécessaire ;
- le niveau de PDA doit se situer en dehors de la zone de saturation, voire de diminution, qui se produit souvent aux intensités les plus élevées. Ce phénomène est bien visible sur la Figure 18 au-delà de $L_2 = 55$ dB HL.

Le choix de l'intensité se fait donc dans la zone linéaire. De plus, une pente importante produira une variation importante du niveau de PDA lorsque l'intensité de l'énergie acoustique des primaires, L_1 et L_2 , sera réduite par le déclenchement du réflexe de l'oreille moyenne.

Le dispositif ECHOSCAN® réalise par défaut une mesure d'entrée-sortie entre $L1 = 42$ dB HL et 70 dB HL et il propose à l'expérimentateur une intensité $L1$ permettant d'obtenir un niveau de PDA proche de 10 dB et satisfaisant les conditions ci-dessus.

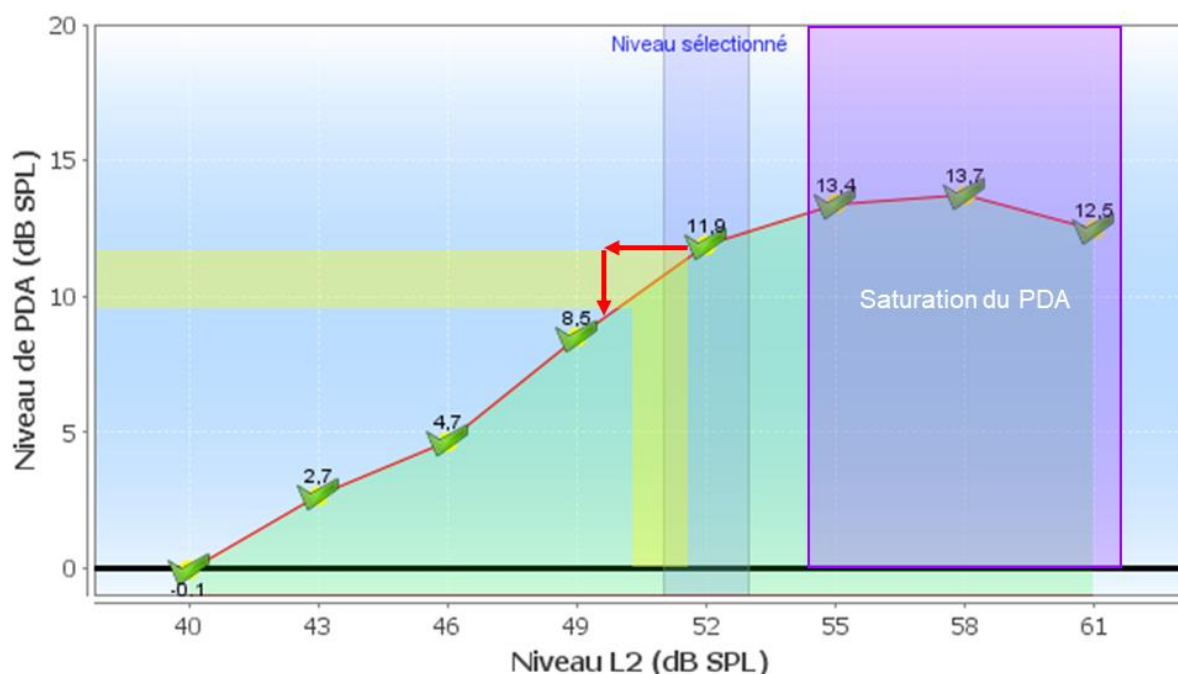


Figure 18 : Mesure dite en entrée-sortie du PDA à la fréquence f_1 de 4800 Hz ($f_2 = 1,2 f_1$). Variation de l'intensité des primaires entre 40 et 61 dB pour L_2 avec $L_1 = L_2 + 6$. Les flèches rouges illustrent l'effet d'une variation d'intensité suite au déclenchement du réflexe de l'oreille moyenne. Zone bleue, niveau sélectionné pour la mesure du réflexe acoustique. Zone violette, saturation du PDA.

Lorsque le couple de fréquences f_1 & f_2 et l'intensité de ces primaires ont été choisis, ces paramètres optimisés et personnalisés de la mesure du PDA sont alors utilisés pour toutes les mesures pré- et post-exposition du SRA du volontaire.

7.3.2.2 Mesure du seuil de déclenchement du réflexe acoustique par ECHOSCAN®

Lors de la mesure du SRA, le PDA est mesuré en continu dans une oreille alors que de brèves stimulations sonores (bruit de bande de 800 Hz centrée sur 1000 Hz) sont émises dans l'oreille controlatérale. L'intensité des stimulations sonores controlatérales débute à 65 dB HL et croît avec un pas de 3 dB HL. L'examen se termine lorsque le SRA provoque une variation significative de l'amplitude du PDA ou lorsque le niveau maximal de stimulation est atteint (98 dB HL). La significativité de la variation de l'amplitude du PDA est déterminée par un test de Student unilatéral dont le seuil de confiance est fixé à 97,5 %. Les échantillons comparés par le test t sont les niveaux de PDA mesurés hors stimulation controlatérale par rapport à

ceux mesurés pendant la stimulation controlatérale (Figure 19). Pour chaque niveau testé, la stimulation sonore controlatérale est scindée en 2 brèves stimulations sonores d'environ 3 secondes chacune. Une durée brève est requise car, après quelques secondes, un phénomène d'adaptation de la réponse du réflexe peut intervenir et réduire l'amplitude de la variation du PDA. Ce phénomène est par ailleurs mesuré par impédancemétrie en clinique : il s'agit du « Decay Test ».

Lorsque la variation de l'amplitude du PDA est significative, un niveau plus élevé de 3 dB est testé afin de confirmer le déclenchement du réflexe acoustique. Le seuil retenu est le premier des deux déclenchements significatifs mesurés.

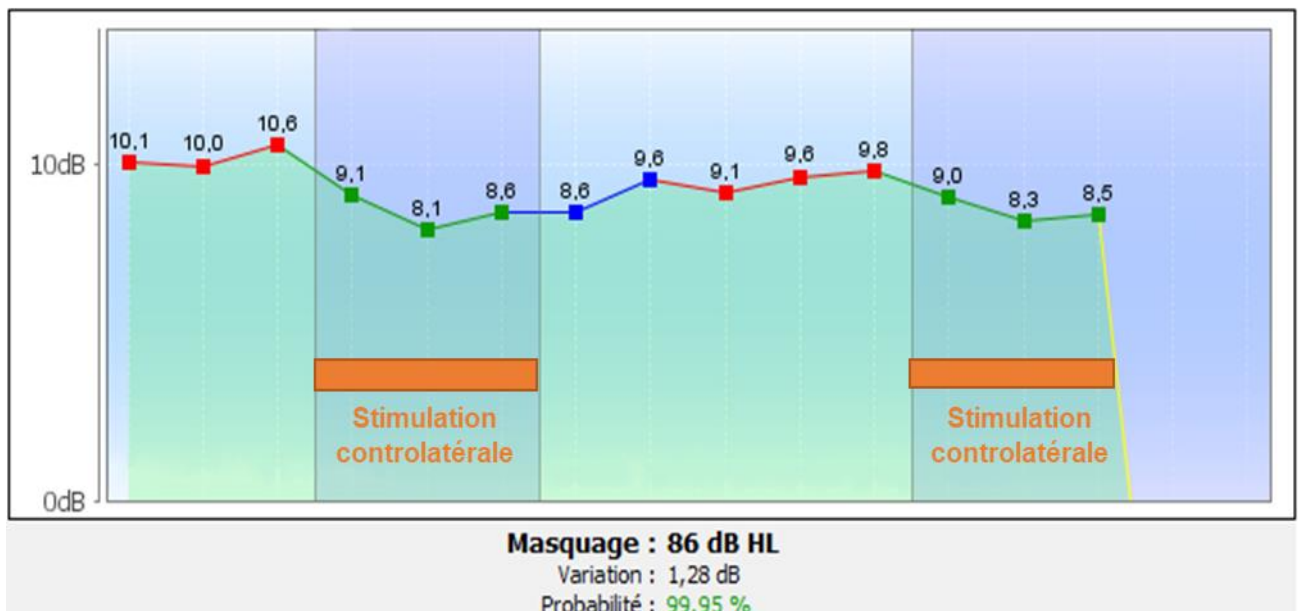


Figure 19 : Calcul de l'amplitude du réflexe acoustique avec un PDA à $f_2 = 4200$ Hz et $L_1 = 67$ dB HL, pour une stimulation sonore controlatérale (bruit de bande centrée sur 1000 Hz) d'intensité 86 dB HL. Points rouges, 6 points utilisés pour calculer le niveau de PDA hors réflexe $L_{HR} = 9,9$ dB. Points verts, 6 points pour calculer le niveau de PDA pendant le réflexe $L_R = 8,6$ dB. $\Delta_{PDA} = L_R - L_{HR} = 1,3$ dB, amplitude du réflexe. Probabilité à 99,95 % que les points rouges soient différents des points verts. Points bleus, mesure exclus du calcul. Barre orange, période de stimulation sonore controlatérale.

Durant l'examen, les volontaires, assis et passifs, étaient équipés d'une sonde de mesure d'otoémission dans l'oreille ipsilatérale et d'un émetteur sonore dans l'oreille controlatérale.

La phase d'optimisation des paramètres du PDA pour mesurer le SRA au repos nécessite environ 3 minutes, mais elle peut être plus longue si le PDA est difficile à mesurer.

La séquence de mesures du SRA, avec les stimulations controlatérales, dure environ 2 minutes pour les personnes ayant un seuil de déclenchement élevé. Ce procédé permet de réaliser rapidement une mesure objective qui est peu sensible au bruit ambiant du local de mesure puisque les stimulations sonores déclenchant le réflexe sont généralement de l'ordre de 80 dB HL. De plus, le bruit ambiant est fortement atténué par la mise en place d'un bouchon audiométrique en mousse dans les canaux auditifs droit et gauche.

Les paramètres de mesure du procédé EchoScan permettent de privilégier l'arc réflexe de l'oreille moyenne, mais l'activité du réflexe olivocochléaire ne peut être totalement exclue. Chez les personnes normo-entendantes, le seuil de déclenchement du réflexe auditif de l'oreille moyenne (réflexe stapédien), mesuré par l'examen clinique de référence (admittance à 226 Hz), est de 85 dB HL (Dobie and Hemel, 2004). La valeur moyenne du seuil du réflexe acoustique mesurée par le procédé EchoScan était de 83 dB HL dans cette étude ce qui indique que le réflexe mesuré est bien le réflexe stapédien.

7.3.3 Evaluation de la fatigue auditive

Pour quantifier la fatigue auditive, les mesures sont réalisées à plusieurs reprises. Une première mesure est réalisée lorsque le volontaire arrive à son poste de travail. Cette mesure sert de niveau de base. Des mesures peuvent ensuite être réalisées en fin de poste de travail ou après une phase d'exposition particulière. Ces dernières mesures sont comparées au niveau de base pour quantifier la fatigue auditive.

Au cours de cette étude, la première mesure était réalisée dès l'arrivée du volontaire sur son lieu de travail. La mesure de fin de poste de travail était effectuée dans les 20 minutes suivant la fin du concert pour les volontaires exposés. Lorsque cela était possible, des mesures additionnelles ont été réalisées entre 45 min et 15 h après la fin de l'exposition sonore afin d'évaluer la récupération de la fatigue auditive.

7.4 Mesure d'exposition sonore

Les mesures d'exposition sonore réalisées au cours de ce projet ne l'ont pas été dans un contexte réglementaire, mais pour suivre précisément le déroulement temporel des niveaux sonores auxquels étaient exposés les volontaires le jour des mesures auditives. Tous les volontaires, exposés ou non à de la musique amplifiée, ont porté un exposimètre (type AVS 5910-R conforme à IEC 61672:2013 Classe1) durant l'intégralité de leur journée (ou nuit) de travail, entre les mesures auditives de début de poste et celles de fin de poste de travail. L'exposimètre était placé sur une des deux épaules du volontaire.

Pour évaluer l'impact de la répartition de l'exposition sonore au cours de la journée de travail, des mesures ont été analysées sur différentes périodes. Ces périodes P retenues étaient : P_t pour la totalité de la journée, $P-3$ pour les 3 dernières heures de travail, $P-2$ pour les 2 dernières heures de travail et $P-1$ la dernière heure de travail. Plusieurs types d'analyses ont été réalisées sur chacune de ces périodes.

1. L'énergie sonore a été quantifiée par le calcul de niveaux sonores équivalents réalisés à partir des Leq_{15} mesurés. Cet ensemble d'informations sur l'énergie sonore était constitué de 53 variables. Ces niveaux étaient pondérés A, C, Z ou filtrés par bandes d'octaves de 63 Hz à 16 kHz. En plus des niveaux équivalents sur les différentes périodes P , les niveaux sonores globaux A et C ont été calculés avec des pondérations exponentielles de 90, 180 et 360 min. Celles-ci permettaient de prendre en compte une éventuelle récupération en atténuant progressivement les événements sonores passés. La pondération exponentielle du bruit reproduisait, en partie, l'allure exponentielle de la récupération de la fatigue auditive (Mills et al., 1970; Patuzzi, 1998). Selon les profils d'exposition, différentes formes de récupération exponentielle ont été observées ayant des constantes de temps comprises entre 30 et 800 min.
2. La distribution de l'énergie sonore a été évaluée par le calcul des quantiles 10%, 50% et 90%, l'écart entre les quantiles L_{10} - L_{50} et L_{10} - L_{90} ainsi que les kurtosis des Leq_{15} pondérés A et C. Cet ensemble d'informations sur la distribution de l'énergie sonore comprenait 40 variables.
3. Pour compléter les indicateurs de l'énergie sonore et de sa distribution, les kurtosis du signal sonore numérisé ont été calculés selon la méthodologie développée par (Qiu et al., 2013) provenant d'études expérimentales chez le Chinchilla et appliquées aux

expositions sonores professionnelles (Fuentes et al., 2018a). Cette méthode calcule des kurtosis d'une période élémentaire de 40 s. Une moyenne géométrique a été appliquée pour calculer le kurtosis moyen sur les différentes périodes allant de P_t à $P-1$. Les kurtosis ont été calculés par bande d'octave (63 à 16 000 Hz) et sur le signal global non pondéré. Cet ensemble d'informations était constitué de 40 variables.

4. Les niveaux sonores de crête pondérés C ont permis de déterminer le nombre de dépassements des seuils de 135, 137 et 140 dB(C), seuils définis par la directive « Bruit » 2003/10/CE du Parlement européen, transposée en droit français par le décret 2006-892 du 19 janvier 2006 (Directive, 2003). Les niveaux dépassant ces seuils étant peu fréquents, les quantiles L_{90} et L_{10} ont aussi été calculés. Cet ensemble d'informations sur les niveaux crêtes de pression sonore était constitué de 24 variables.

La durée de mesure, qui correspond à la durée de travail du volontaire est également une variable décrivant l'exposition sonore. Chaque exposition sonore est donc décrite par un ensemble de 158 variables. La liste des variables est jointe en annexe 3.

7.4.1 Gestion des données

La collecte des données a été menée en respectant le règlement (UE) 2016/679 du Parlement européen et du Conseil du 27 avril 2016 relatif à la protection des personnes physiques à l'égard du traitement des données à caractère personnel et à la libre circulation de ces données.

Le traitement des données a fait l'objet d'une déclaration de conformité à la méthodologie de référence MR-001 pour les traitements de données personnelles opérés dans le cadre des recherches biomédicales auprès de la CNIL.

La lettre d'information remise à chaque volontaire explicitait clairement que la participation du salarié était facultative et qu'il était dans le droit de se retirer à tout moment du protocole de recherche sans justification ni conséquence pour lui. Le droit d'accès, de rectification et le droit d'opposition étaient également indiqués, de même que leurs modalités. Ces droits pouvaient s'exercer par tout moyen auprès du coordonnateur du projet.

La confidentialité de la recherche a été assurée par le codage des informations concernant les participants, de manière à assurer un total anonymat. La correspondance entre les résultats des analyses et l'identité des participants n'a été connue que par les investigateurs principaux et par les investigateurs délégués aidant au recueil des données lors des interventions dans les établissements.

Le codage des données (questionnaire, mesures auditives, exposition sonore) était réalisé dès l'acquisition. Toutes les analyses et publications menées sur ces données ont été réalisées avec des données anonymisées.

Au terme d'une intervention dans un établissement, les résultats des mesures auditives et des expositions sonores étaient communiqués sous différentes formes :

- les résultats individuels étaient communiqués au volontaire, et pouvaient être transmis à un médecin (médecin du travail ou médecin traitant) désigné par le sujet lors de l'information individuelle ;
- l'ensemble des résultats concernant les volontaires d'un établissement était communiqué à l'entreprise sous forme d'un compte-rendu d'intervention. Ce rapport garantissait l'anonymat des sujets participant à l'étude.

7.5 Analyse des données

Les analyses statistiques ont été réalisées avec les applications STATA v16 de StataCorp et Prism v9 de GraphPad.

7.5.1 Gestion des données censurées

Les stimulations sonores pour le déclenchement du réflexe acoustique étaient limitées à 98 dB HL. Lorsqu'en fin de poste de travail, la fatigue auditive provoquait une élévation du seuil du réflexe au-delà de 98 dB HL, la valeur était définie à 101 dB HL soit le pas de mesure (+3 dB) suivant la valeur maximale mesurée. Le remplacement de ces valeurs censurées a concerné 5 volontaires exposés sur 43. Aucun volontaire non exposé n'a été concerné par le dépassement du niveau de stimulation sonore maximal.

7.5.2 Analyse des données entre groupes

Une ANOVA à un facteur a été appliquée pour étudier les différences des variables numériques entre groupes témoins et travailleurs exposés. Les résultats de ces tests sont exprimés sous la forme suivante : $(F(df_b, df_i) = Fratio ; \text{valeur } p)$, où df_b est le nombre de degrés de liberté entre groupes, df_i est le nombre de degrés de liberté des résidus, et $Fratio$ est le rapport de la somme des moyennes quadratiques entre groupes divisée par la somme des moyennes quadratiques intra-groupe. Le cas échéant, lorsque la distribution des données ne permettait pas un test paramétrique, la comparaison des groupes a été réalisée grâce à un test non paramétrique : test de Kruskal-Wallis avec intervalles de Bonferroni.

Pour l'audiométrie tonale dont les mesures sont effectuées à différentes fréquences pour un même volontaire, un modèle mixte a été réalisé avec des facteurs à effet fixe (fréquence, groupe) et un facteur à effet aléatoire (volontaire). Le niveau de significativité statistique a été fixé à 5 %.

Pour les comparaisons de moyenne, l'écart-type (S_d), est indiqué pour permettre d'évaluer la variabilité de la distribution des données.

7.5.3 Modélisation de la fatigue auditive : méthodologie de sélection des variables explicatives

Le but de la modélisation de la fatigue auditive est de déterminer les paramètres de l'exposition sonore pouvant expliquer cette fatigue en fin de poste de travail.

Cette analyse est basée sur la corrélation par régression linéaire entre les variables à expliquer quantifiant la fatigue auditive et les variables explicatives liées à l'exposition sonore ou à la description des volontaires.

Variables à expliquer

- Variation du seuil du réflexe auditif mesuré par ECHOSCAN[®],
- Variation du seuil de perception auditif mesuré par audiométrie tonale liminaire.

Variables explicatives

- 18 variables décrivent les volontaires. Ces informations sont issues du questionnaire et de la mesure des performances auditives en début de poste de travail.
 - Age, sexe, années d'expérience dans le métier, troubles auditifs déclarés (trouble auditif, difficulté de perception dans le bruit, acouphène post exposition, acouphène chronique au repos, hyperacousie, diplacousie, distorsion).
 - Performances auditives nominales au repos, en début de poste de travail, mesurées par ATL à 250, 500, 1000, 2000, 4000, 6000 et 8000 Hz ainsi que le seuil de déclenchement du réflexe auditif à 1000 Hz mesuré par ECHOSCAN®.
- 158 variables calculées à partir de l'exposition sonore du volontaire et décrite au paragraphe 7.4.
 - Grandeurs énergétiques : 54 variables issues des différentes pondérations A, C, ou Z, des analyses en bandes d'octave (63 à 16 000 Hz).
 - Distribution de l'énergie sonore (kurtosis et quantiles des Leq) et stabilité audio (kurtosis du signal audio).

L'annexe 4 illustre la différence entre le kurtosis calculé sur des Leq et celui calculé sur le signal audio.

Ces différents indicateurs (énergie et distribution d'énergie) sont calculés en fonction de la fréquence (niveaux globaux et bandes d'octave) et de la période de mesure. Ces périodes correspondent à la durée précédant la mesure auditive post-exposition. Ces durées sont 1 h, 2 h et 3 h avant la fin de la mesure. Les calculs sont également réalisés sur la totalité de la journée. Par exemple, le $Leq_{1000Hz,2h}$ signifie qu'il s'agit de l'énergie sonore moyenne de la bande d'octave 1000 Hz calculée sur les 2 dernières heures de travail avant la mesure post-exposition.

La difficulté de cette analyse est liée au grand nombre de variables explicatives (158 + 17) au regard du faible nombre d'observations (79 mesures complètes) rendant impossible la réalisation de régression. En conséquence, la réalisation de modèles par régression a nécessité au préalable une réduction du nombre de variables explicatives. Deux méthodologies ont été

Méthodologie 2 : Analyse factorielle

Analyse factorielle → sélection de facteurs → régression multiple

- 1) L'analyse factorielle des variables issues de l'exposition sonore permet de définir des facteurs composés des variables mesurées. Chaque facteur explique une partie, plus ou moins grande, de la variance du jeu de données.
- 2) Les facteurs sont sélectionnés en fonction de la variance expliquée. L'analyse de la composition des facteurs retenus permet de déterminer le type de grandeur représenté.
- 3) Des régressions multiples peuvent alors être réalisées entre les variables à expliquer (fatigue auditive) et les facteurs sélectionnés complétés des variables descriptives des volontaires.

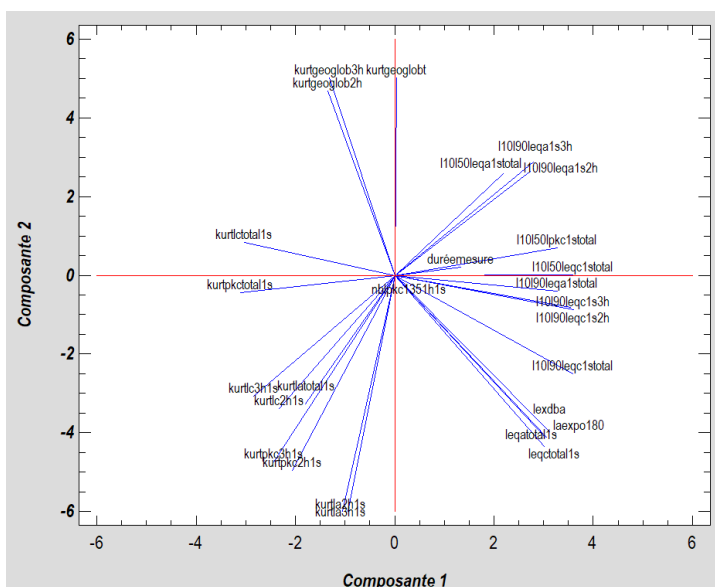


Figure 21 : Exemple d'analyse en composantes principales représenté dans le plan des deux premières composantes. Calcul réalisé sur un échantillon restreint de 45 variables.

L'analyse factorielle regroupe les variables en fonction de leur cohérence. Ces regroupements réalisés sous forme de faisceaux autour des axes des facteurs peuvent être illustrés par l'analyse en composante principale (cf. Figure 21). L'utilisation de facteurs issus de l'analyse factorielle plutôt que la sélection de variables particulières donne une portée plus générale que la classification. En d'autres termes, l'analyse factorielle est plus robuste car moins sensible aux spécificités du jeu de données.

S'ils permettent une modélisation plus robuste, les facteurs ne permettent pas une représentation directe et le lien vers un indicateur mesuré identifiable. Afin d'illustrer le modèle, la sélection d'une variable, ou de deux variables lorsqu'un contraste est présent dans le facteur, peut être réalisée pour chaque facteur retenu. Ces contrastes apparaissent lorsque pour un facteur, certaines variables ont des charges factorielles positives alors que d'autres variables ont des charges négatives. La régression peut alors être calculée avec cette sélection d'indicateurs mesurés. Ce modèle, de compréhension plus directe, est cependant plus sensible au jeu de données.

7.5.4 Analyse factorielle

L'analyse factorielle exploratoire vise à explorer les relations entre les variables. Elle regroupe, sous forme de facteurs, des groupes de variables observées ayant des modèles de réponses similaires parce qu'elles sont toutes associées à une variable latente (inconnue ou non mesurée directement) ou associées du fait d'une colinéarité.

La valeur propre ou ("eigen value") de chaque facteur reflète le poids de la variance globale des variables du jeu de données qui est expliqué par le facteur.

L'analyse factorielle génère le même nombre de facteurs que le nombre de variables, mais leur importance est quantifiée par leur valeur propre, ce qui permet de sélectionner les facteurs d'intérêt et restreint donc le nombre de facteurs à inclure dans le modèle de régression.

Nombre de facteurs à retenir

Un premier seuil peut être fixé sur la valeur absolue de la valeur propre des facteurs. Les facteurs doivent avoir une valeur propre supérieure à 1. Cela signifie qu'ils contiennent au moins autant de variances du jeu de données qu'une seule variable isolée. Si un facteur explique moins bien la variabilité des données qu'une variable isolée, il est jugé inutile et écarté.

Le tracé en éboulis des valeurs propres permet également de définir une limite adaptée au jeu de données. La limite est alors choisie sur une rupture de pente dans le tracé en ébouillis. Cette rupture traduit une discontinuité de la différence des valeurs propres des facteurs n et $n+1$. Dans l'exemple de la Figure 22, seuls 5 facteurs sont retenus.

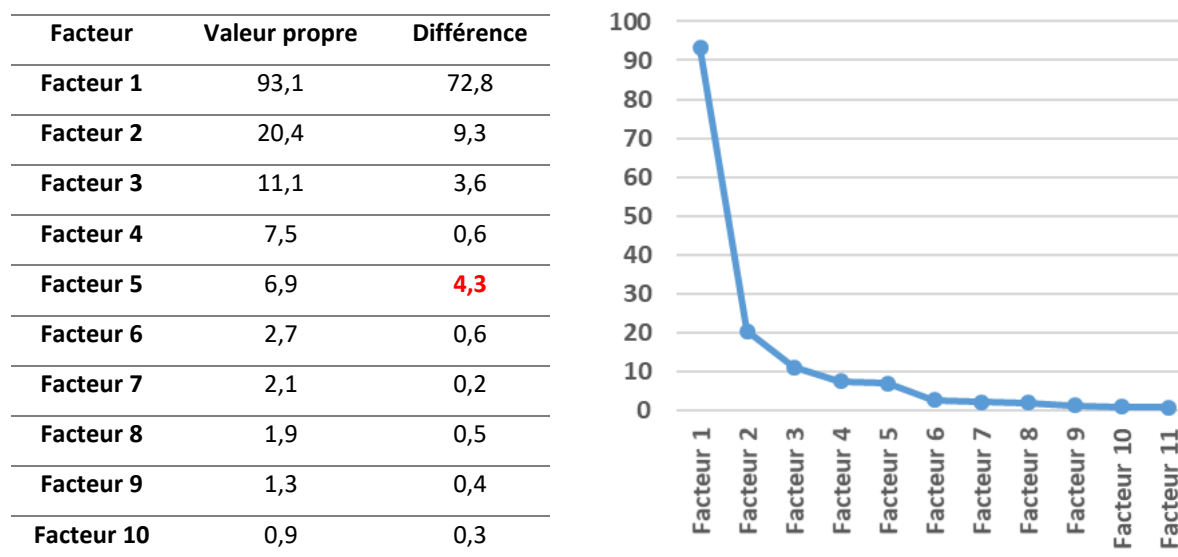


Figure 22 : Exemple de tracé en éboulis. Rupture de pente après le 5^{ème} facteur.

Rotation des axes des facteurs

Après avoir sélectionné les facteurs exprimant au mieux la variance des données, une rotation des axes des facteurs permet d'optimiser la répartition du poids des variables sur les différents facteurs. Après rotation, les axes englobent mieux les données. La rotation peut être oblique entre les différents axes et donc tolérer un niveau de corrélation entre ces axes. Représenté dans un plan en 2 dimensions, les axes ne seraient alors plus perpendiculaires. C'est ce type de rotation qui est appliquée dans l'analyse des données d'exposition sonore. La rotation fait en sorte que les coordonnées des variables sur les facteurs deviennent soit élevées (en valeur absolue), soit proches de zéro ; cela permet une meilleure interprétation des facteurs.

Variables définissant un facteur

Pour chaque variable du jeu de données, la charge factorielle ("factor loading" ou coordonnées factorielles) quantifie le degré d'association entre une variable et un facteur à la manière d'un coefficient de régression. Les variables retenues pour chaque facteur sont celles dont la valeur absolue de la charge factorielle est supérieure à 0,6 après rotation des axes (Beavers et al., 2013; Suhr, 2006). Les variables retenues permettent de définir le facteur

auquel elles sont associées, c'est-à-dire, de donner une signification au facteur. Chaque variable retenue n'est associée qu'à un seul facteur. Le signe attribué à la charge factorielle peut être positif ou négatif, il indique un contraste à l'intérieur du facteur. Le signe négatif pour une variable signifie que cette variable évolue inversement aux variables ayant un signe positif. Par exemple, lorsque la dispersion des niveaux sonores est importante, la différence des indices fractiles (L_{10} - L_{90} ou L_{10} - L_{50}) est élevée alors que la valeur du kurtosis des Leq est généralement faible (Cf. annexe 4).

7.5.5 Modélisation de la fatigue auditive : régression linéaire

Les facteurs ou variables influençant la fatigue auditive sont recherchés à l'aide de modèles de régressions linéaires qui établissent une relation entre des variables quantitatives explicatives et la variable à expliquer. Les paramètres de l'équation, coefficients et constante, sont optimisés pour minimiser l'erreur moyenne de prédiction au sens des moindres carrés. Pour une équation de la forme $y = ax + b$, l'erreur moyenne des n observations vaut :

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - (ax_i + b))^2$$

La procédure utilisée est une procédure de régression multiple pas à pas calculant la relation entre la fatigue auditive et les facteurs d'exposition retenus complétés par des variables décrivant les volontaires. Une procédure pas à pas ascendante ajoute une variable explicative à chaque itération du modèle alors qu'une procédure descendante débute avec toutes les variables explicatives disponibles dans le modèle et retire une variable par itération. La régression pas à pas permet d'obtenir un modèle ne contenant que des variables explicatives significatives et n'excluant aucune variable utile. Les deux procédures, ascendante et descendante, ont été appliquées sur chaque modèle, ce qui a permis de vérifier la concordance des modèles obtenus.

Les paramètres d'inclusion et d'exclusion des variables explicatives sont définis en fonction de la probabilité du coefficient calculé pour chaque variable. Les paramètres sont les suivants :

Seuil d'inclusion d'une variable $p < 0,1$

Seuil d'exclusion d'une variable $p \geq 0,2$

Le poids relatif des différentes variables explicatives d'un modèle sur la variable à expliquer est évalué à partir du modèle calculé avec les variables centrée réduite. Les coefficients des variables centrées réduites permettent une comparaison directe de ces variables et permettent de hiérarchiser l'impact des variables explicatives mesurées sur le phénomène à expliquer. Une variable centrée réduite est obtenue selon la formule ci-après.

$$Z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

Avec x variable et z variable centrée réduite
 μ moyenne de x
 σ écart type de x

7.5.6 Modélisation de la fatigue auditive : validation du modèle

La qualité des modèles statistiques a été étudiée par :

- l'analyse des résidus ;
- l'observation d'éventuels points atypiques pouvant entraîner une forte dépendance du modèle ;
- la réalisation d'une validation croisée.

7.5.6.1 Étude des résidus

Les résidus sont définis comme étant les différences entre les valeurs observées et les valeurs prédites par le modèle de régression. Les résidus représentent la partie non expliquée par l'équation de régression. L'analyse des résidus teste la validité d'un modèle de régression. Pour cela, on vérifie que la distribution des résidus suit bien une loi normale en étudiant deux statistiques dont la valeur doit être comprise entre -2 et 2.

- 1) Le paramètre d'asymétrie mesure la symétrie ou le manque de symétrie. Une loi symétrique comme la loi normale a une asymétrie nulle. Des lois qui ont des valeurs plutôt au-dessus du pic (moyenne et médiane supérieures au mode) ont une asymétrie positive. Des lois qui ont des valeurs plutôt au-dessous du pic qu'au-dessus ont une asymétrie négative.
- 2) L'aplatissement (kurtosis normalisé) mesure la forme d'une loi symétrique. Une loi normale ou en forme de cloche a un aplatissement nul. Une loi plus pointue que la

loi normale a un aplatissement positif. Une loi plus plate que la loi normale a un aplatissement négatif.

La normalité des résidus peut également être représentée par la droite de Henri.

7.5.6.2 *Observations atypiques*

Les éventuels points atypiques ont été identifiés par l'analyse graphique des résidus et par la valeur de résidus studentisés supérieurs à 3 en valeur absolue. Les résidus studentisés mesurent de combien d'écart-types chaque valeur observée de la variable à expliquer varie si on ajuste un modèle en utilisant toutes les observations sauf cette observation. Ces observations extrêmes nécessitent alors une analyse individuelle pour déterminer si elles doivent être retirées du modèle et traitées séparément.

7.5.6.3 *Validation croisée*

Le faible nombre d'observations du jeu de données collectées n'a pas permis de les scinder en un jeu d'apprentissage et un jeu de validation. L'erreur de prédiction a donc été évaluée par une validation croisée.

Cette validation consiste à recalculer les coefficients du modèle en retirant chaque observation une par une. Ce modèle permet alors de prédire l'observation retirée et de calculer le résidu de cette prédiction.

L'erreur quadratique moyenne (RMSE) calculée sur l'ensemble des résidus issus de la validation croisée permet de mesurer l'erreur de prédiction, c'est-à-dire dans quelle mesure les prédictions diffèrent des données prédites. Le RMSE peut être rapproché de l'écart-type (SD) qui lui permet d'évaluer la dispersion des données autour de la moyenne. Si le RMSE est inférieur au SD, cela signifie que les prévisions du modèle sont meilleures que la distribution des observations autour de la moyenne ce qui est un gage de qualité du modèle. Le RMSE est plus sensible que l'erreur absolue moyenne (MAE) aux observations atypiques ou mal modélisées présentant un fort résidu.

7.5.7 *Modèle sur une sélection de variables*

Au terme de la modélisation s'appuyant sur l'analyse factorielle, des modèles sont réalisés à titre d'exemple en substituant des variables "d'intérêt" aux facteurs. Les variables d'intérêt retenues ont été sélectionnées parmi celles ayant une valeur absolue de la charge factorielle

supérieure à 0,6. Cette réduction de facteur à une variable diminue considérablement l'information et rend le modèle plus sensible et spécifique aux données observées. En revanche, ces modèles sans facteur permettent une compréhension plus simple puisqu'ils utilisent des variables (grandeurs d'exposition) directement mesurées.

Les mêmes processus de calcul et de validation que ceux employés pour les modèles utilisant les facteurs (cf. paragraphe 7.5.6) sont appliqués à ces modèles sans facteur.

7.5.8 Cinétique de récupération de la fatigue

La cinétique de récupération de la fatigue a été estimée grâce à des mesures répétées après la fin de l'exposition sonore (concerts). Ces mesures n'ont été possibles que sur un nombre restreint de volontaires. Certains d'entre eux ont été mesurés le lendemain, ce qui permettait d'avoir une durée de récupération de plus de 12 heures alors que d'autres ont été mesurés après une durée de récupération courte d'environ 1h30. Dans ce dernier cas, les volontaires conservaient l'exposimètre afin de vérifier que leurs expositions étaient inférieures à 70 dB(A) durant la période de récupération.

Les paramètres de la cinétique de récupération ont été estimés par une méthode d'ajustement de la courbe de décroissance de la fatigue mesurée aux deux instants différents : juste après la fin du concert et après la période de récupération. La récupération de la fatigue étant de forme exponentielle (Mills et al., 1970; Patuzzi, 1998), l'ajustement a été réalisé sur une courbe de décroissance exponentielle dont les paramètres sont explicités en Figure 23.

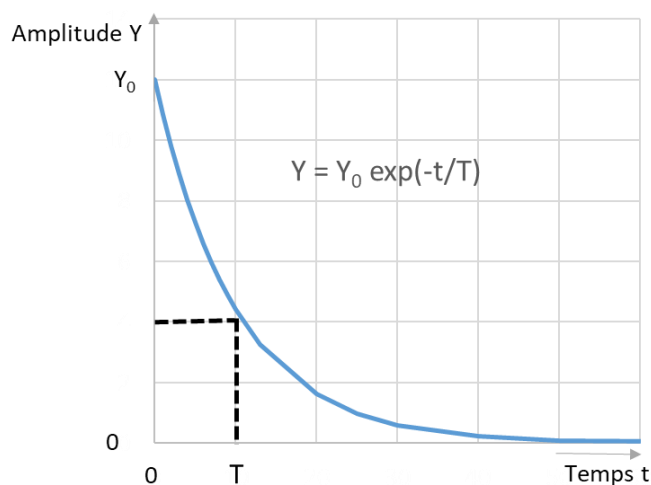


Figure 23: Paramètres d'une fonction de décroissance exponentielle. Y_0 , ordonnée à l'origine. T , constante de temps.

8 Résultats

Les résultats présentés dans ce manuscrit s'appuient sur l'étude des volontaires inclus dans le cadre du protocole approuvé par le comité national d'éthique (CCP Sud Est II : ID-RCB 2018 - A02832-53). Le protocole s'articulait autour de trois principaux recueils de données :

- 1) un questionnaire permettant d'obtenir des informations concernant les volontaires ;
- 2) une mesure continue de l'exposition sonore par exposimétrie lors de la journée d'observation du volontaire ;
- 3) des mesures auditives en début et en fin de poste de travail lors de la journée d'observation.

Le recoupement de ces trois sources d'informations a permis de déterminer les paramètres influençant la fatigue auditive.

Cent questionnaires ont été remplis par les volontaires dans 12 établissements différents, mais seulement 86 personnes ont pu réaliser le protocole de mesure en audiométrie tonale. In fine, le protocole complet, mesure d'audiométrie tonale et ECHOSCAN®, a été réalisé par 79 personnes.

Les établissements visités étaient essentiellement des salles de spectacle de petite jauge (moins de 400 personnes) et de moyenne jauge (entre 400 et 3000 personnes).

8.1 Questionnaires

L'ensemble des questionnaires a été analysé, y compris ceux des volontaires ne remplissant pas certains critères d'inclusion par la suite ou ne pouvant se libérer pour réaliser les mesures. Cela a permis d'obtenir des informations sur un plus large panel de volontaires, sans biais qui aurait pu être lié à un critère d'exclusion.

8.1.1 Répartition de la population

Le Tableau 1 donne la composition par groupe des 100 questionnaires analysés.

Groupe		Effectif	Âge
Musique	Femme	16	32,4 ± 12,8
	Homme	50	37,7 ± 10,5
	Ensemble	66	36,5 ± 11,3
Témoin	Femme	15	36,5 ± 10,7
	Homme	19	37,6 ± 9,4
	Ensemble	34	37,1 ± 9,9
Total général	Ensemble	100	36,7 ± 10,8

Tableau 1 : Nombre et âge moyen ($\pm$ SD) des volontaires ayant répondu au questionnaire.

Malgré les efforts réalisés pour inclure le plus possible de femmes dans le groupe Musique, les proportions étaient déséquilibrées : 76% d'hommes pour 24% de femmes. Ces proportions reflètent la répartition réelle entre hommes et femmes dans les métiers techniques de la musique amplifiée qui constituent le groupe Musique. Dans le groupe Témoin, la proportion homme-femme était beaucoup moins déséquilibrée puisque ce groupe était composé de 56% d'hommes pour 44% de femmes.

Dans le groupe exposé à la musique, l'âge des volontaires s'étendait de 19 à 65 ans tandis que dans le groupe non exposé, il était compris entre 24 et 61 ans. La répartition de l'âge était proche dans les différentes catégories de groupes. Seules les femmes du groupe Musique étaient un peu plus jeunes.

Les volontaires du groupe Musique avaient en moyenne 9,4 ans d'expérience à leur poste de travail contre 7,1 pour le groupe Témoin. L'analyse statistique montre que le retrait des 14 volontaires exclus, réduisant la population de 100 à 86 personnes, était indépendante de l'âge et des années d'expérience.

Parmi les volontaires du groupe Musique, 48 étaient des techniciens son, lumière ou plateau et 18 occupaient d'autres fonctions (cf. Tableau 2). Les volontaires du groupe Témoin occupaient des fonctions administratives ou d'encadrement dans les établissements visités.

Activité	Effectif
Bar	3
Régie générale	5
Sécurité	10
Technicien plateau	12
Technicien lumière	18
Technicien son	18

Tableau 2 : Nombre de volontaires par type d'activité dans le groupe Musique.

8.1.2 Perception de l'exposition et du risque auditif

Le Tableau 3 donne les résultats aux questions concernant la perception que les volontaires avaient de leur exposition sonore et du risque encouru pour leur audition.

Groupe		Exposition à de forts niveaux sonores ¹	Risque pour l'audition ²
Musique n = 66	Oui	99%	92%
	Non	1%	5%
	Ne sait pas	0%	2%
Témoin n = 34	Oui	38%	15%
	Non	62%	85%

Tableau 3 : Réponses aux questions 1 "Etes-vous exposé au bruit ?" 2 " Pensez-vous que votre activité habituelle présente un risque pour votre audition ?" dans la rubrique "bruit au travail" du questionnaire.

Les volontaires du groupe Musique savaient qu'ils étaient exposés à de forts niveaux sonores et ils étaient conscients que cette exposition professionnelle engendrait un risque pour leur audition. Seules 3 personnes ont déclaré que leur activité ne présentait pas de risque. L'une d'entre elles était un régisseur général qui, après une longue carrière d'activité technique sur scène et en régie son, occupait un poste de supervision de l'activité et se tenait en coulisse durant les concerts. Il se sentait protégé du bruit (portes battantes lourdes entre son poste et la scène) au regard de ses activités antérieures. Le cas des deux autres personnes ayant répondu ne pas courir de risque pour leur audition était plus problématique. Il s'agissait de

jeunes techniciens son et lumière achevant leur formation. Enfin, deux agents de sécurité ont répondu ne pas savoir si leur activité pouvait présenter un risque pour leur audition.

Les principales sources sonores auxquelles les volontaires du groupe Musique étaient exposés étaient la musique amplifiée, citée par tous les volontaires, les bruits lors du montage et démontage des structures scéniques lourdes, cités par 13 techniciens dont 8 techniciens plateau, la conduite d'engins tels que des chariots élévateurs (un technicien plateau), la manutention générale (un technicien son) et l'exposition directe aux instruments de musique et notamment la batterie citée par 2 techniciens.

La fréquence des expositions sonores déclarée par les volontaires du groupe Musique était de $3,0 \pm 1,1$ jours par semaine en moyenne annuelle. Durant ces journées, la durée déclarée d'exposition à la musique amplifiée était de $5,0 \pm 1,8$ heures soit une quinzaine d'heures d'exposition hebdomadaire à la musique amplifiée.

En plus des expositions sonores professionnelles, 74% des volontaires du groupe Musique avaient également une exposition sonore dans le cadre de leurs loisirs. Ils pratiquaient de la musique en groupe, assistaient à des concerts ou fréquentaient les discothèques en moyenne 5 fois par mois. Dans le groupe Témoin, ils étaient 70% à avoir ces mêmes types d'activités mais avec une fréquence de 3,3 fois par mois.

8.1.3 Port de protection auditive individuelle

Le Tableau 4 recense la proportion de volontaires équipés de PICB et la fréquence du port de ces protections. Le taux de personnes équipées dans le groupe Musique n'était que de 57% bien que ces professionnels soient très fréquemment exposés à des doses de bruit journalières supérieures à 85 dB(A), seuil au-delà duquel le port de PICB est obligatoire. Le taux d'équipement était plus faible parmi les techniciens que parmi les autres sujets exposés (barman, sécurité, régie générale). De plus, même parmi les professionnels équipés, 31% des individus interrogés disaient ne jamais les porter.

Dans le groupe Témoin, près de la moitié des volontaires étaient équipés mais 29% d'entre eux reconnaissaient ne jamais les utiliser. En revanche, ils étaient 29% à déclarer les utiliser systématiquement alors qu'ils n'étaient que 12% dans le groupe Musique.

Lors des mesures, le suivi de l'activité des volontaires a permis de comptabiliser les personnes portant réellement des PICB durant leur activité. Seuls 3 volontaires du groupe Musique (soit moins de 5% de l'effectif) ont porté leur PICB le jour des mesures, et seulement durant une partie du concert. Les volontaires du groupe Musique, et notamment les techniciens, ayant jugé l'intensité sonore de la journée de mesure comme étant habituelle, les pratiques observées vis-à-vis du port du PICB devaient donc être conformes aux pratiques habituelles.

Groupe	Équipé de PICB	Fréquence du port des PICB			
		Toujours	Parfois	Jamais	
Musique n = 66	Techniciens	56%	8%	58%	33%
	Autres exposés	61%	13%	58%	30%
	Ensemble	57%	12%	58%	31%
Témoin n = 34		47%	29%	41%	29%

Tableau 4 : Équipement en Protecteur Individuel Contre le Bruit (PICB) des volontaires et déclaration de la fréquence du port de ces PICB parmi les personnes équipées.

Près d'un tiers des volontaires équipés de PICB utilisaient des bouchons jetables qu'ils prenaient généralement dans les distributeurs mis à disposition du public (cf. Tableau 5) et plus de la moitié des volontaires avaient des bouchons moulés individuellement par une prise d'empreinte de leur canal auditif (groupes Témoin et Musique).

Groupe	Casque actif ¹	Casque classique	Bouchon jetable	Bouchon pré-moulé réutilisable	Bouchon moulé individuel
Musique n = 38	2%	7%	34%	2%	55%
Témoin n = 16	0%	13%	25%	6%	56%

¹ Casque avec intercommunication et réduction de bruit active

Tableau 5 : Types de protecteurs individuels contre le bruit habituellement portés par les volontaires équipés.

Parmi les 57% des personnes du groupe Musique équipées de PICB, moins de la moitié l'ont été par leur employeur, soit environ un quart du groupe Musique (cf. Tableau 6). Il s'agit de bouchons à usage unique pour les intermittents et de bouchons moulés pour les employés permanents. Dans le groupe Témoin, c'est principalement l'employeur qui a financé les PICB alors que ces personnes sont beaucoup moins exposées au bruit. Dans ce groupe, les volontaires ne sont pas des intermittents mais des employés permanents des établissements. Les bouchons moulés ont un coût proche de 150€, mais une partie de ce coût peut être prise en charge par des mutuelles, lors de formations ou lors de campagnes de prévention comme celles mises en place par AGI-SON, fréquemment citées par les techniciens du groupe Musique, ce qui réduit l'investissement personnel.

Groupe	Employeur	Formation	Mutuelle	Personnel	Non équipé
Musique n = 38	13	1	1	13	38
Témoin n = 16	12	0	0	3	19

Tableau 6 : Moyen de financement des protections individuelles contre le bruit chez les volontaires équipés de PICB.

8.1.4 Perception par les volontaires de leur propre audition

Plusieurs questions étaient posées aux volontaires afin d'évaluer la perception qu'ils avaient de leur propre audition et pour comptabiliser les troubles auditifs tels que :

- les acouphènes post-exposition, perçus par exemple à la suite d'un concert ;
- les acouphènes chroniques, sifflements ou bourdonnements perçus au repos ;
- l'hyperacousie, sensibilité accrue au bruit rendant désagréable voire insupportable les bruits courants de faible et moyenne intensités ;
- la diplacousie, entraînant une perception fréquentielle différente entre les deux oreilles ;
- les distorsions auditives, provoquant la perception d'un son déformé ou de craquements.

Comme pour l'ensemble du questionnaire, ces questions étaient contextualisées par un investigateur qui accompagnait le volontaire.

Les analyses n'ont pas montré de différences significatives aux réponses concernant l'audition entre les volontaires inclus (n = 86) et les volontaires exclus (n = 14). Les déclarations de troubles auditifs par les volontaires des deux groupes paraissaient indépendantes des critères d'inclusion : seuil auditif inférieur ou égal à 35 dB HL à 4 kHz, niveau de PDA supérieur ou égal à 6 dB à au moins une fréquence entre 4 et 5 kHz, seuil de déclenchement du réflexe acoustique inférieur à 95 dB HL au repos.

Groupe		Problème d'audition quel qu'il soit	Problème de compréhension dans le bruit
Musique n = 66	Techniciens	50%	46%
	Autres exposés	33%	17%
	Ensemble	45%	38%
Témoin n = 34		26%	32%

Tableau 7 :Appréciation par les volontaires de leur propre audition.

Parmi les 36 personnes du groupe Musique ayant répondu ne pas avoir de problème d'audition quel qu'il soit (cf. Tableau 7), 11 ont cependant déclaré dans les questions suivantes avoir des problèmes de compréhension dans le bruit, 19 des acouphènes post-exposition, 7 des acouphènes chroniques, 2 avaient eu par le passé des problèmes d'hyperacousie et 1 avait eu des problèmes de distorsion (cf. Tableau 8). Seulement 14 personnes, soit 21% du groupe Musique, n'ont pas déclaré de trouble auditif. Parmi les 25 personnes du groupe Témoin ayant répondu ne pas avoir de problème auditif, 3 ont déclaré des problèmes de compréhension dans le bruit, 2 des acouphènes post-exposition et 1 seul des acouphènes chroniques. Donc parmi les 36 personnes du groupe Musique ayant déclaré ne pas avoir de problème d'audition, on dénombre un cumul de 40 problèmes auditifs (soit un rapport de 111%) alors que pour les 25 sujets Témoin ayant déclaré ne pas souffrir de problème auditif, on ne dénombre que 6 troubles (soit un rapport de 24%).

Groupe	Activité	Acouphènes	Acouphènes	Hyperacousie	Diplacousie	Distorsion
		post-exposition %	chroniques %	%	%	%
Musique n = 66	Techniciens	67	42	15	2	10
	Autres exposés	28	17	0	0	0
	Ensemble	56	35	11	2	8
Témoin n = 34	Administratifs	21	21	9	0	0

Tableau 8 : Troubles auditifs identifiés par les volontaires.

Dans le groupe Musique, 30% des volontaires ont déclaré au moins deux problèmes. La moitié de ces personnes avaient à la fois des acouphènes post-exposition et des acouphènes chroniques. Les acouphènes étaient les principaux troubles déclarés, notamment parmi les techniciens chez qui plus des deux tiers avaient des acouphènes post-exposition et 42% étaient touchés de manière chronique au repos.

Les acouphènes consécutifs à une exposition sonore, telle qu'un concert, étaient la seule catégorie de troubles dont le nombre de déclarations était significativement différent entre les groupes Musique et Témoin (test non paramétrique $p = 0,0007$). Pour les acouphènes chroniques, seul le sous-groupe des techniciens était significativement différent des autres (test non paramétrique $p = 0,05$). Les acouphènes étaient également un trouble fréquent dans le groupe Témoin.

Il est important de rappeler ici que le groupe Témoin n'est pas constitué de volontaires n'ayant jamais été exposés au bruit. Ces Témoins travaillant dans des établissements de spectacle, ils pouvaient être amenés à assister à des représentations, ou pouvaient avoir été exposés lors d'activités professionnelles antérieures. Ainsi, malgré une moyenne d'âge proche de 35 ans, environ un tiers du groupe Témoin déclarait avoir des problèmes de compréhension dans le bruit, ce qui est l'un des premiers signes perçus lors de pertes auditives légères. Parmi le groupe des techniciens, 46% ont déclaré avoir des problèmes de perception dans le bruit, soit une proportion proche de celle des techniciens atteints d'acouphènes chroniques. Cependant, il ne s'agissait pas des mêmes personnes puisque près de 75% des techniciens atteints d'acouphènes chroniques n'ont pas déclaré de problèmes de perception dans le bruit.

8.1.5 Perception de l'intensité de la journée

En fin de poste de travail, les volontaires devaient juger l'intensité sonore de la journée par rapport à leur activité habituelle. L'échelle de cotation comportait 5 niveaux (cf. Figure 24).

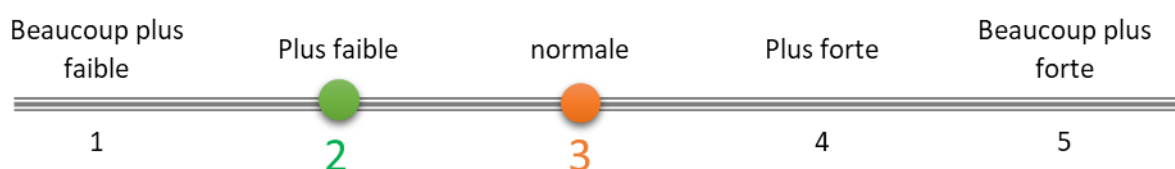


Figure 24 : Réponse en fin de poste de travail à la question : « Comment estimez-vous l'intensité sonore de la journée par rapport à votre activité habituelle ». Vert, réponse médiane du groupe Témoin. Orange, réponse médiane du groupe Musique.

Les volontaires du groupe Témoin ont estimé que l'intensité sonore de la journée durant laquelle ils ont été mesurés était plutôt plus faible que l'intensité habituelle. En revanche, les volontaires du groupe Musique ont estimé que l'intensité de la journée était habituelle. Ces résultats sont à rapprocher des observations de l'activité, notamment celles concernant les volontaires du groupe Musique. Pour ce groupe, l'intensité étant jugée habituelle, le comportement face à l'exposition sonore de ces professionnels devrait refléter le comportement habituel.

8.2 Performances auditives en début de poste

Avant de commencer leur activité professionnelle, les seuils de perception auditive et du déclenchement du réflexe acoustique étaient mesurés. Ces mesures étaient généralement réalisées le matin avant toute exposition sonore importante lorsque le volontaire arrivait sur son lieu de travail. L'audition des volontaires était alors considérée comme étant au repos.

Deux analyses successives ont été réalisées. La première a intégré toutes les mesures disponibles ($n = 96$) et permettait d'avoir une vision sur l'audition de la population des volontaires. La seconde a été réalisée uniquement chez les volontaires ayant réalisé l'intégralité du protocole de mesure de la fatigue auditive. Cette analyse a été réalisée pour vérifier l'homogénéité des groupes Musique et Témoin en début de poste de travail.

8.2.1 Audiométrie tonale population entière

La Figure 25 compare les seuils audiométriques des volontaires en début de poste par rapport aux performances attendues selon la norme ISO 7029:2017 qui établit la distribution statistique des seuils d'audition en fonction de l'âge et du sexe. Les mesures des 96 volontaires (moyenne d'âge de 36,7 ans) sont comparées à la distribution pour une population d'hommes de 36 ans car les groupes mesurés sont principalement composés d'hommes et l'écart de distribution entre hommes et femmes est faible (moins de 1 dB à 4000 Hz pour le quartile supérieur).

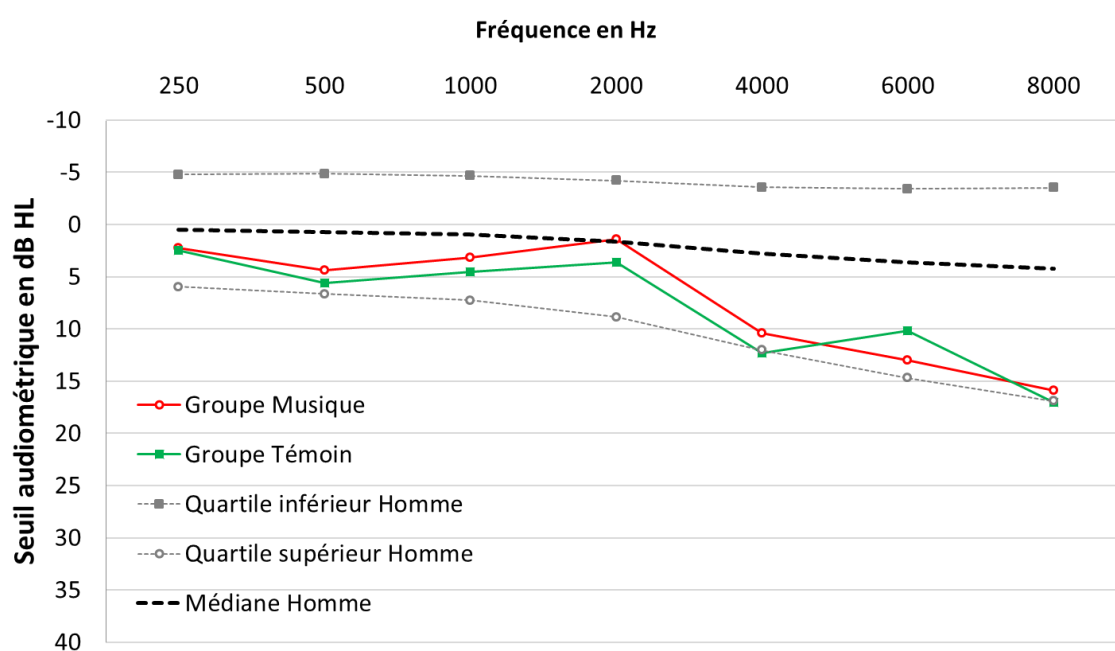


Figure 25 : Seuils auditifs mesurés par audiométrie tonale liminaire en début de poste de travail comparés aux valeurs de la distribution statistique de la norme ISO 7029:2017 pour des hommes de 36 ans (quartiles et médiane).

Les seuils auditifs du groupe Témoin étaient légèrement inférieurs à ceux du groupe Musique excepté à 6000 Hz.

A 500 Hz et entre 4000 et 8000 Hz, les seuils audiométriques des deux groupes étaient inférieurs à la valeur médiane de l'ISO 7029 tout en restant proche du quartile inférieur. Ce déficit auditif léger à partir de 4000 Hz, compris entre 10 et 20 dB HL, pourrait être lié à des expositions sonores, qu'elles soient professionnelles ou non. Ceci peut paraître étrange pour le groupe Témoin, mais on rappelle que les volontaires de ce groupe ne sont pas des individus

indemnes d'une exposition au bruit dans le passé. En effet, certaines de ces personnes pouvaient avoir été occasionnellement exposées au bruit dans le cadre professionnel et privé. En outre, dans le groupe Témoin, les volontaires ont déclaré assister à des concerts 2,5 fois par mois en moyenne. Néanmoins, les mesures d'exposimétrie ont permis de vérifier que les volontaires du groupe Témoin n'étaient pas exposés à de forts niveaux sonores le jour des mesures.

Le Tableau 9 compare les seuils audiométriques des volontaires exclus par rapport aux volontaires inclus.

Groupe	Fréquence (Hz)						
	250	500	1000	2000	4000	6000	8000
Exclus n = 10	5,5 ± 10,9	3,5 ± 6,3	4 ± 8,4	2 ± 7,5	19,5 ± 17,2	23,5 ± 20,6	24,5 ± 28,6
Inclus n = 86	2 ± 7,7	4,9 ± 7,8	3,5 ± 6,9	2,2 ± 8,7	9,9 ± 13,2	10,7 ± 13,8	15,3 ± 15,6

Tableau 9 : Seuils d'audition mesurés par audiométrie tonale liminaire en début de poste de travail.

Seuls les seuils audiométriques mesurés à 4000 Hz et 6000 Hz étaient significativement différents entre les volontaires inclus et ceux exclus (respectivement $p = 0,05$ et $p = 0,04$). Les 10 volontaires exclus n'ont pas tous été écartés en raison des critères auditifs, certains l'ont été en raison de l'impossibilité de les mesurer en fin de poste de travail.

8.2.2 Seuil du réflexe acoustique population entière

Le seuil du réflexe acoustique mesuré par ECHOSCAN® a été mesuré chez 84 volontaires en début de poste de travail. Cinq n'ont pas pu être mesurés en fin de poste ou n'ont pu se libérer pour réaliser les mesures. L'Echoscan étant le dernier test lors de la phase d'inclusion, très peu de données ont été collectées sur les volontaires exclus. La comparaison du seuil de déclenchement du réflexe entre volontaires exclus et inclus n'est donc pas présentée.

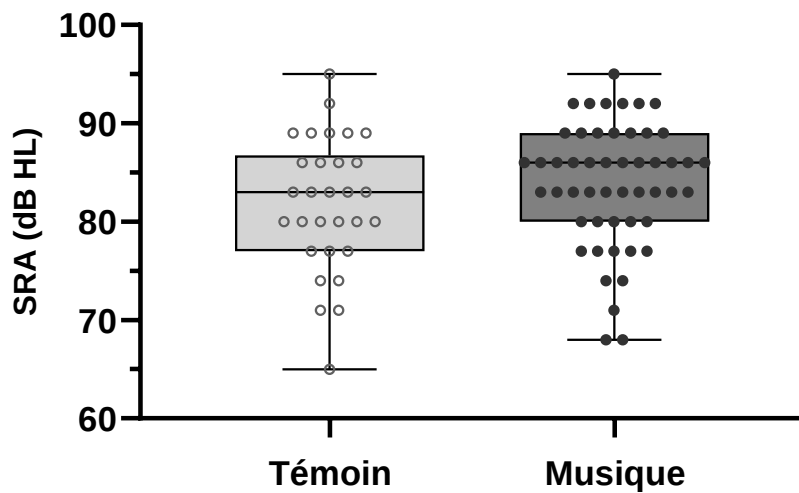


Figure 26 : Seuil du réflexe acoustique (SRA) mesuré par ECHOSCAN® de début de poste de travail. Groupe Musique n = 54 ; Groupe Témoin n = 30.

Groupe	Seuil du réflexe acoustique (dB HL)
Musique n = 54	83,5 ± 6,5
Témoin n = 30	81,9 ± 6,6

Tableau 10 : Valeurs moyennes et écarts-types des seuils du réflexe acoustique mesurés par ECHOSCAN® en début de poste de travail.

Au repos, la valeur moyenne du seuil du réflexe acoustique était 1,6 dB plus élevé pour le groupe Musique que pour le groupe Témoin, mais cette différence n'était pas significative (cf. Tableau 10 et Figure 26).

Lors d'études antérieures, au cours desquelles le prototype EchoScan Audio de l'INRS avait été utilisé à la place du dispositif commercial d'ECHODIA, les seuils du réflexe acoustique déclenché par un bruit de bande à 1000 Hz controlatéral étaient compris entre 80 et 83 dB HL (Venet et al., 2018, 2014b). Les valeurs moyennes des seuils acoustiques mesurés au cours de ces travaux de thèse sont donc très proches. Ils sont également proches du seuil de déclenchement du réflexe auditif de l'oreille moyenne (réflexe stapédien) mesuré par tympanométrie (admittance à 226 Hz) qui est de 85 dB HL (Dobie and Hemel, 2004).

8.3 Homogénéité des groupes Musique et Témoin

L'homogénéité des performances auditives des groupes Témoin et Musique a été vérifiée en début de poste de travail. Ces analyses portent uniquement sur les volontaires inclus ayant réalisés toutes les mesures d'ATL ($n = 86$) ou de SRA ($n = 79$).

Afin de tenir compte de la répétition des mesures ATL aux 7 différentes fréquences (de 500 à 8000 Hz) pour un même volontaire, l'homogénéité des groupes a été testée par un modèle mixte ayant 2 facteurs à effet fixe (fréquence et groupe) et un facteur à effet aléatoire (volontaire). Ce modèle mixte indique que le facteur fixe fréquence et le facteur aléatoire individu étaient significatifs ($p < 0,001$), mais pas le facteur groupe ni les interactions.

Le seuil audiométrique en début de poste était donc dépendant de la fréquence et des individus, mais pas des groupes. Le seuil auditif entre groupe n'était pas non plus dépendant de la fréquence (interaction groupe-fréquence). Les seuils auditifs des 2 groupes étaient donc équivalents en début de poste de travail. L'analyse du SRA a été réalisée par une analyse de variance (ANOVA) à un facteur (groupe) pour les 79 volontaires inclus. Elle ne fait apparaître aucune différence significative entre groupes ($p = 0,19$).

Que ce soit pour l'ATL ou le SRA, les performances auditives des deux groupes étaient donc équivalentes en début de poste de travail.

8.4 Troubles auditifs déclarés et performances auditives au repos

Des analyses non paramétriques (test de Kruskal-Wallis) ont été réalisées pour rechercher des liens entre les troubles auditifs déclarés lors du questionnaire et les performances auditives mesurées au repos. Le seuil de déclenchement du réflexe était indépendant des troubles auditifs déclarés. En revanche, chez les 96 volontaires pour lesquels des mesures d'audiométrie tonale ont été réalisées en début de poste, le seuil auditif à 8000 Hz était significativement plus élevé ($p = 0,03$) chez les personnes déclarant un problème de compréhension dans le bruit (13 ± 16 dB HL) que chez celles n'en déclarant pas (22 ± 19 dB HL). Le seuil audiométrique à 250 Hz était plus bas ($p = 0,02$) chez les personnes déclarant des acouphènes post-exposition sonore (0 ± 8 dB HL) que chez ceux n'en déclarant pas (4 ± 8 dB HL). Enfin, le seuil auditif à 4000 Hz était plus élevé ($p = 0,01$) chez les volontaires déclarant des acouphènes post-exposition (18 ± 18 dB HL) que chez ceux n'en déclarant pas (8 ± 10 dB HL).

8.5 Exposition sonore

Les expositions sonores des 86 volontaires ayant réalisé l'intégralité du protocole de mesure ont été analysées.

Les indicateurs réglementaires de l'exposition sonore

La directive « Bruit » 2003/10/CE du Parlement européen, transposée en droit français dans le code du travail aux articles R. 4431-1 à R. 4437-4 définit des valeurs de l'exposition sonore quotidienne moyennée sur 8 heures ($L_{EX,8h}$) ou hebdomadaire moyennée sur 40 h déclenchant des actions de prévention (80 et 85 dB(A)) ainsi qu'une valeur limite (87 dB(A)) à ne pas dépasser. Ces valeurs d'exposition journalière sont complétées par un second critère, le niveau de pression acoustique de crête $L_{p,Cpeak}$ exprimé en dB(C) dont les valeurs d'action basse et haute sont définies à 135 dB(C) et 137 dB(C). La valeur limite est quant à elle fixée à 140 dB(C). Le $L_{p,Cpeak}$ est dédié aux bruits à caractère impulsionnel. Ce dernier est néanmoins plus difficile à utiliser que le L_{eq} , car il est soumis à plus d'aléas métrologiques (chocs léger sur le microphone, bourrasques de vent).

Le $L_{EX,8h}$ est calculé à partir de la moyenne des $L_{Aeq,1s}$ mesurés par exposimétrie. Cette moyenne est normalisée sur une durée de 8h, durée de travail "normale", en utilisant une règle d'iso-énergie soit +3 dB par doublement de la durée d'exposition. La dose de bruit journalière est calculée par la formule :

$$L_{EX,8h} = L_{Aeq,TE} + 10 \lg(T_E/T_0)$$

Avec	T_E	durée effective de la mesure
	T_0	durée de référence fixée à 8h
	$L_{Aeq,TE}$	niveau acoustique continu équivalent de la mesure

En fonction du $L_{EX,8h}$ calculé ou du dépassement d'un seuil de niveau de pression acoustique de crête $L_{p,Cpeak}$, la réglementation définit des actions de prévention.

8.5.1 Indicateurs réglementaires de l'exposition sonore

8.5.1.1 Dépassement des niveaux sonores de crête

Le Tableau 11 recense le nombre de volontaires qui ont été exposés à des bruits impulsionnels dépassant les seuils de la réglementation (Cf. Encadré *Les indicateurs réglementaires de l'exposition sonore ci-avant*).

Groupe		Effectif	Nombre de dépassements $L_{p,Cpeak} \geq 135$ dBC	Nombre de dépassements $L_{p,Cpeak} \geq 137$ dBC	Nombre de dépassements $L_{p,Cpeak} \geq 140$ dBC
Musique n = 55	Autres exposés	12	0	0	0
	Techniciens	43	7	1	0
	Ensemble	55	7	0	0
Témoin n = 31		31	1	0	0

Tableau 11 : Nombre de sujets dont le niveau sonore de crête a dépassé les seuils définis par la réglementation bruit au travail.

Les niveaux sonores de crête supérieurs à 135 dB(C) ont été relevés chez 16% des techniciens. Pour 5 personnes, il s'agissait de bruits impulsionnels générés par des chocs lors de la manutention de caisses ou d'estrades. Pour deux autres techniciens son, les bruits impulsionnels provenaient de la batterie dont ils se trouvaient très proches afin d'ajuster et connecter les microphones. Chez l'un des deux techniciens son, le bruit de la batterie a dépassé 137 dB(C). Un seul sujet du groupe Témoin a été exposé à un niveau sonore de crête dépassant 135 dB(C). Ce bruit s'est produit lors d'un choc isolé.

La Figure 27 montre des exemples de niveaux de crête mesurés chez des techniciens son.

8.5.1.2 Exposition sonore journalière

Le Tableau 12 fait la synthèse des expositions sonores journalières mesurées chez les 86 volontaires inclus ayant réalisé l'ensemble du protocole de mesure de la fatigue auditive.

Groupe		Effectif	Durée de travail h:mm	$L_{EX,8h}$ dB(A)
Musique n = 55	Autres exposés	12	6:17 ± 2:10	87,3 ± 3,8
	Techniciens	43	8:41 ± 3:05	86,8 ± 5,8
	Ensemble	55	8:10 ± 3:02	86,9 ± 5,4
Témoin n = 31		31	6:32 ± 1:27	66,5 ± 4,4

Tableau 12 : Expositions sonores journalières moyennes et écart-types mesurés chez les 86 volontaires inclus.

La Figure 27 donne des exemples de niveaux sonores de crête mesuré par exposimétrie chez deux techniciens son. La Figure 28 montre niveau équivalent podérés A, $L_{Aeq,1s}$, mesurés par chez ces deux mêmes techniciens son.

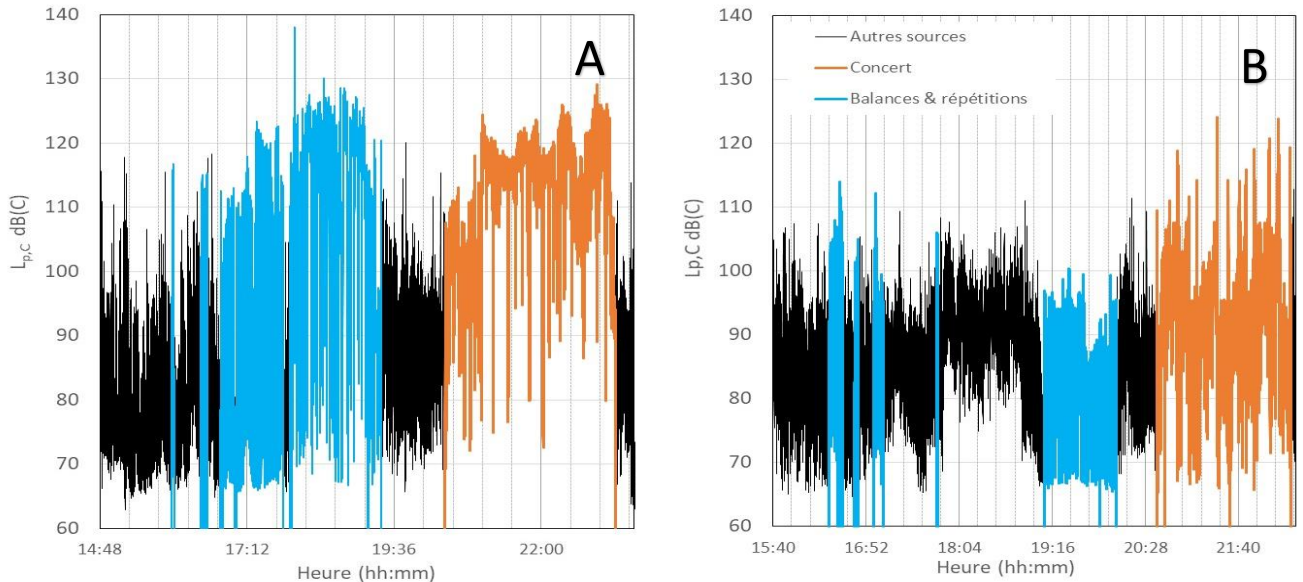


Figure 27 : Évolution temporelle des niveaux sonores de crête ($L_{p,Cpeak}$) mesurés par exposimétrie. Mesure de deux régisseurs son façade (A) lors d'un concert de blues, (B) lors d'un concert de folk.

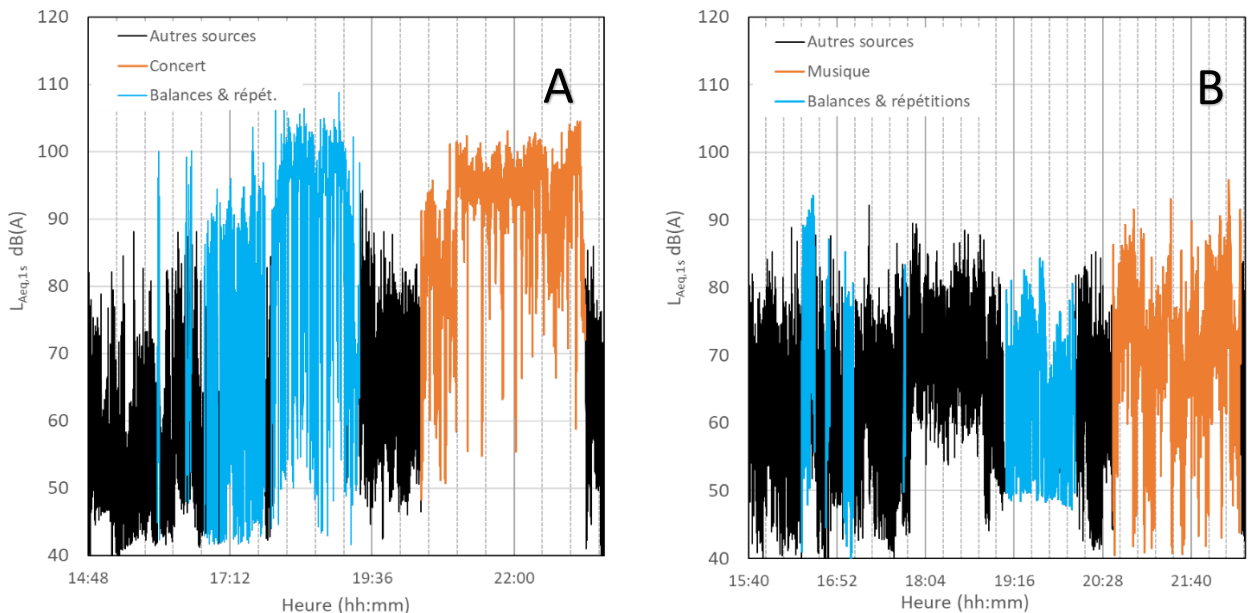


Figure 28 : Évolution temporelle des niveaux sonores équivalents ($L_{Aeq,1s}$) mesurés par exposimétrie. Mesure de deux régisseurs son façade, (A) lors d'un concert de blues, (B) lors d'un concert de folk.

L'exposition sonore journalière moyenne des volontaires exposés à de la musique amplifiée était très proche de la valeur limite réglementaire de 87 dB(A) (Directive, 2003). Cette valeur moyenne masque une grande diversité d'expositions sonores puisque dans le groupe des techniciens, l'étendue des valeurs était comprise entre 73,9 dB(A) pour un technicien plateau lors d'un concert folk guitare-voix et 96,5 dB(A) pour un ingénieur du son au cours d'un concert de rock. Même si certains techniciens avaient des expositions inférieures à 80 dB(A), la différence entre les groupes Musique et Témoin était très significative ($F(1;84) = 331$; $p = 0$) comme l'illustre la Figure 29.

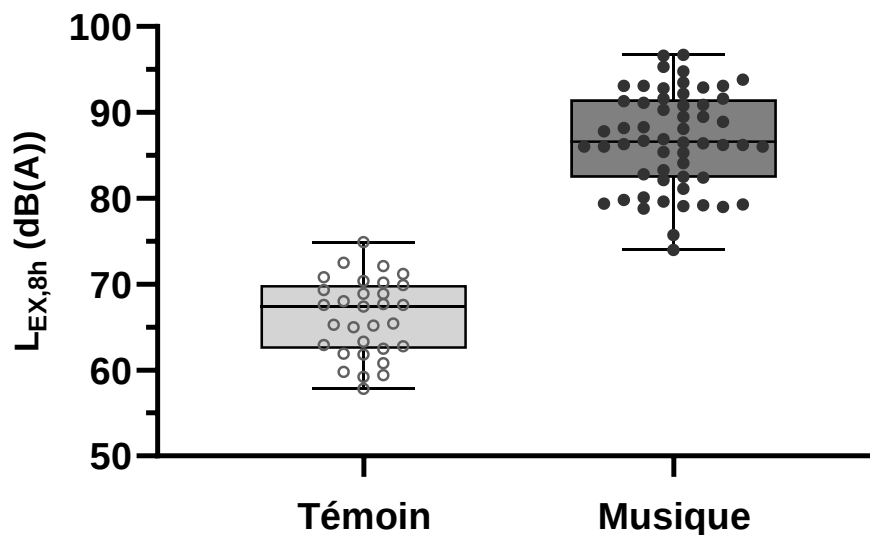


Figure 29 : Valeurs d'exposition sonore journalière mesurées chez les volontaires inclus ($n = 86$).

Parmi les sujets exposés à de la musique, l'exposition sonore moyenne entre les techniciens et les autres personnes exposées était équivalente (Figure 30). Il n'y avait pas non plus de différence significative entre les métiers exercés (Figure 31). Par exemple, les expositions sonores journalières moyennes des ingénieurs du son ($n = 15$) et des techniciens lumière ($n = 18$) étaient respectivement égales à $86,7 \pm 6,7$ dB(A) et $88,0 \pm 5,6$ dB(A).

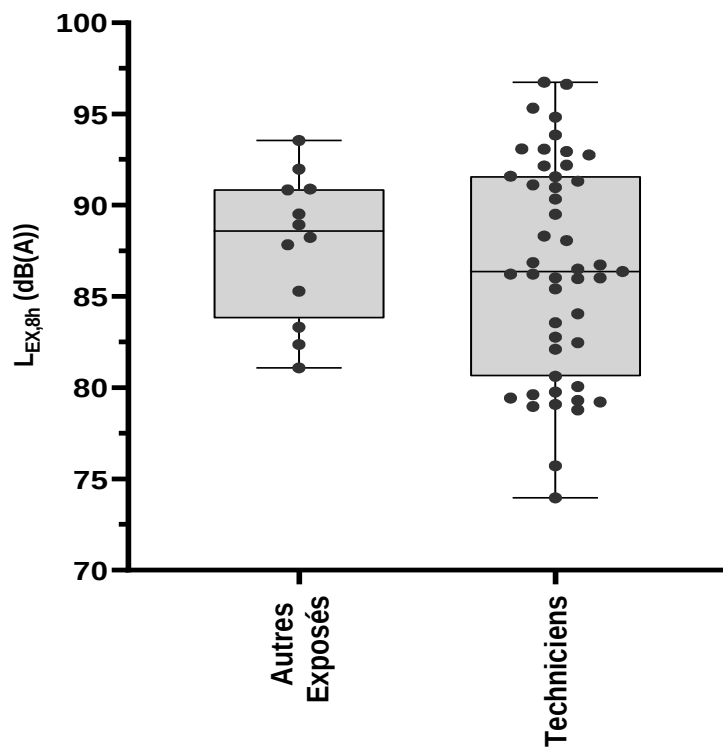


Figure 30 : Expositions sonores parmi le groupe exposé à de la musique, 43 techniciens et 12 autres exposés.

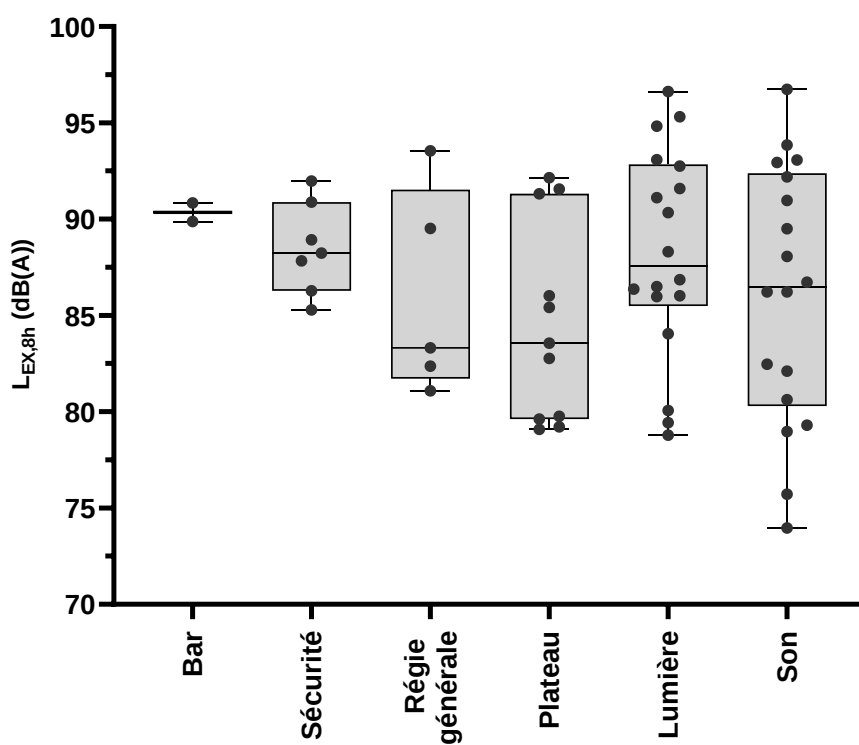


Figure 31 : Expositions sonores en fonction du métier exercé par les volontaires. Mesures réalisées chez les 55 volontaires inclus dans le groupe exposé à de la musique.

Si l'exposition sonore des volontaires du groupe Musique ne dépendait pas de leur activité, en revanche, l'analyse statistique montre que l'exposition sonore journalière était fonction du genre musical ($F = (5,49) = 9,7$; $p = 0$) : rock, rap, blues, pop, jazz ou folk (cf. Figure 32). Un test des étendues multiples appliquant la méthode de Bonferroni indique notamment que le genre folk était significativement différent des genres rap, rock et blues.

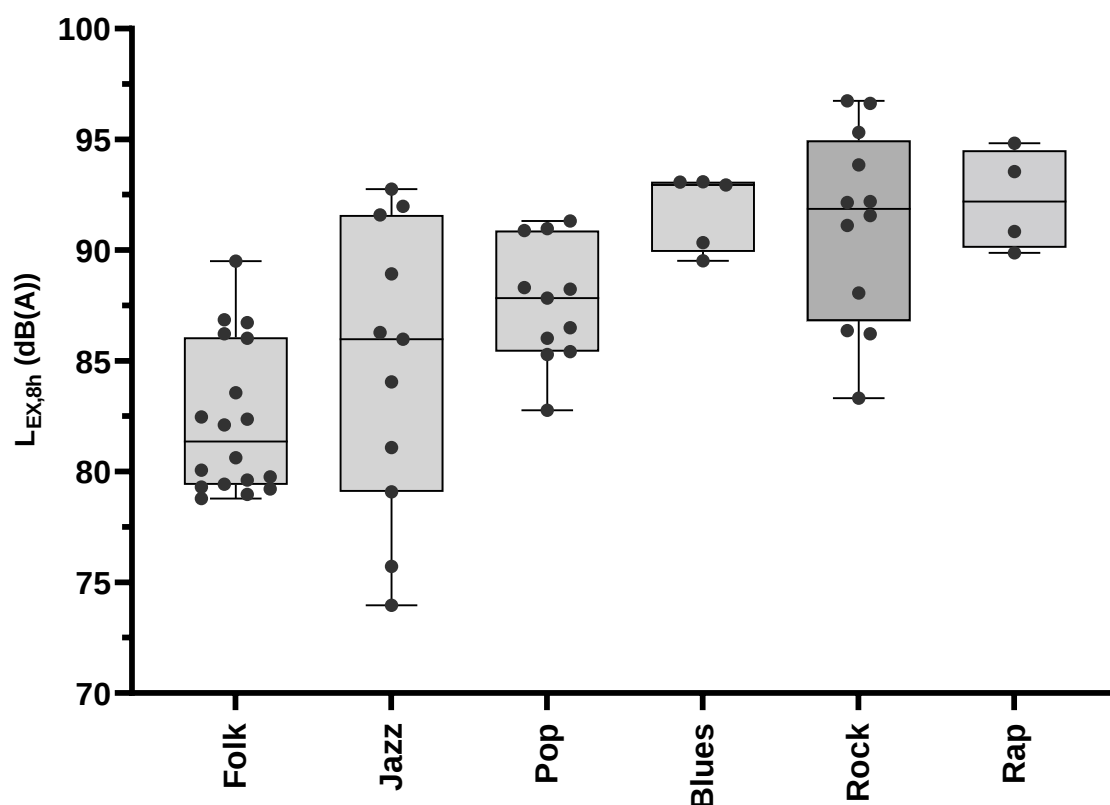


Figure 32 : Expositions sonores en fonction du genre musical. Mesures réalisées chez les 55 volontaires inclus dans le groupe exposé à la musique.

L'analyse détaillée des expositions sonores a permis d'évaluer la contribution sonore de la musique amplifiée par rapport à l'ensemble des autres sources de bruit auxquelles les volontaires du groupe Musique étaient exposés. Le Tableau 13 donne les niveaux sonores moyens des différents styles musicaux rencontrés lors de cette étude. Les niveaux indiqués comprennent l'ensemble des expositions à de la musique au cours de la journée d'observation, à savoir les balances, les répétitions et le concert. La différence entre

l'exposition sonore journalière à de la musique seule et l'exposition à l'ensemble des sources sonores était inférieure à 0,5 dB pour les genres musicaux pop, rock, blues et rap. Dans ces situations, la musique était largement prédominante, on peut considérer que l'exposition sonore résultante n'était due qu'à la musique. Lors de cette étude, des phases de montage de très grandes structures scéniques n'ont pas été observées. Le montage et démontage de ces structures lourdes auraient pu sensiblement accroître l'exposition sonore des techniciens. Ces phases sont généralement réalisées en présence d'engins motorisés et peuvent comporter de nombreux bruits d'impacts occasionnés par le montage de structures métalliques au marteau. Ces sources de bruit ont été rapportées par les techniciens lors du questionnaire d'inclusion.

Musique Genre	Effectif	Durée d'exposition hh:mm	L _{Aeq} musique dB(A)	L _{EX,8h} musique dB(A)	L _{EX,8h} global dB(A)
Folk	16	2:19 ± 1:31	86,4 ± 3,4	81,1 ± 4,7	82,1 ± 3,6
Jazz	10	2:57 ± 1:14	89,4 ± 6,7	85,0 ± 6,6	85,4 ± 6,1
Pop	9	3:38 ± 1:28	90,4 ± 2,2	86,9 ± 2,1	87,0 ± 2
Blues	5	4:14 ± 1:39	94,5 ± 0,5	91,8 ± 1,8	91,7 ± 1,7
Rock	12	3:15 ± 1:17	95,0 ± 4,7	91,1 ± 4,1	90,9 ± 4
Rap	3	4:16 ± 1:14	95,7 ± 2,6	93,0 ± 2,1	92,9 ± 2,1
Ensemble	55	3:08 ± 1:22	90,7 ± 5,3	86,7 ± 6,1	86,9 ± 5,4

Tableau 13 : Niveaux sonores moyens de la musique amplifiée et leur contribution dans l'exposition sonore journalière pour les 55 volontaires inclus dans le groupe Musique.

Trois genres musicaux, rap, blues et rock, avaient une intensité sonore plus élevée que les autres. Le niveau moyen de la musique, comprenant les balances, les répétitions et les concerts, était proche de 95 dB(A) pour ces 3 genres musicaux.

8.5.2 Autres indicateurs d'exposition

D'autres types d'indicateurs, tels que les quantiles ou les kurtosis caractérisant la distribution, ou la pondération fréquentielle C et les bandes d'octave caractérisant la composition en fréquence des sons, ont été calculés. Ces indicateurs ne sont pas exploités dans le cadre de la réglementation du bruit au travail. Néanmoins, ils sont utilisés pour la modélisation de la fatigue auditive car ils détaillent l'exposition sonore dans des champs différents de ceux décrits par le L_{Aeq} et le comptage des dépassements des niveaux de crête. Afin de préciser ces indicateurs peu utilisés pour la prévention du risque auditif et la métrologie du bruit au travail, les paragraphes suivants donnent les résultats de ces principales catégories d'indicateurs.

8.5.2.1 Composition fréquentielle

Le Tableau 14 donne le niveau sonore moyen selon les pondérations A et C. Une grande différence entre les niveaux A et C signifie que le bruit est riche en basses fréquences car la pondération C atténue beaucoup moins les basses fréquences que la pondération A. A 63 Hz par exemple, la pondération A est de -26,2 dB contre seulement -0,8 dB pour la pondération C.

	Genre	Effectif	L_{Aeq} dB(A)	L_{Ceq} dB(C)	Ecart $L_{Ceq} - L_{Aeq}$ dB
Musique	Rap	3	94,0	105,3	11,3
	Blues	5	91,7	101,0	9,3
	Rock	12	90,8	101,6	10,7
	Pop	9	87,0	99,5	12,5
	Jazz	10	86,2	97,3	11,0
	Folk	16	82,6	90,5	7,9
	Ensemble	55	87,2	97,4	10,1
Témoin		31	67,0	73,0	6,0

Tableau 14 : Niveaux sonores équivalents moyens pondérés A et C obtenus sur l'ensemble de la journée de travail des volontaires.

Les écarts en pondération A et C étaient proches de 11 dB pour la plupart des genres musicaux mesurés. Pour le blues, et surtout pour le folk, cet écart était plus faible, se rapprochant de l'écart mesuré dans le groupe Témoin. La Figure 33 met en évidence la différence entre la forme du spectre musical et celle du bruit ambiant auquel le groupe Témoin a été exposé.

À partir de 500 Hz, on observe une pente régulière de -4 dB par octave pour l'ensemble des genres musicaux. Selon l'esthétique musicale recherchée, cette pente dans les basses fréquences peut être plus faible, c'est le cas de la musique folk, maintenue dans le cas de la musique pop ou accentuée pour le rap.

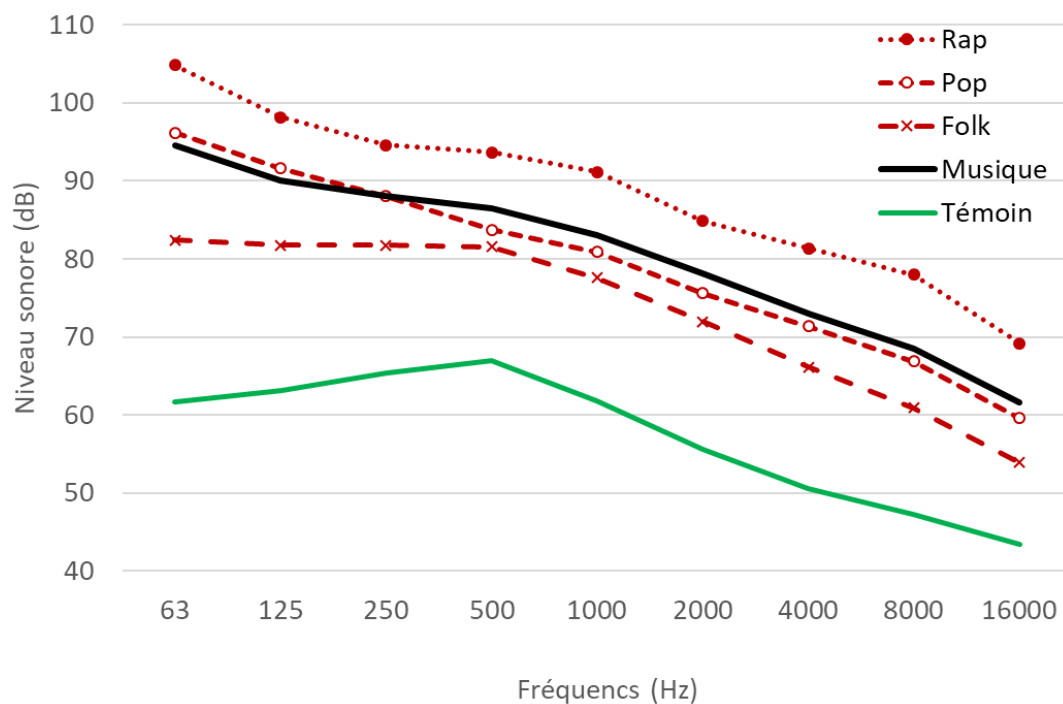


Figure 33 : Analyse spectrale par bande d'octave de l'exposition sonore (moyenne de tout le concert). Trois genres musicaux (folk, pop et rap) sont représentés : folk (le plus faible) et rap (le plus fort) encadrent le niveau moyen de l'ensemble des genres musicaux.

8.5.2.2 Distribution des $L_{Aeq,1s}$ 1 seconde

Le quantile L_{90} des $L_{Aeq,1s}$ permet d'estimer le niveau de bruit de fond d'une exposition sonore, correspondant aux périodes les plus calmes alors que le L_{10} illustre les niveaux les plus intenses. L'écart entre le L_{10} - L_{90} permet d'évaluer l'amplitude de variation des niveaux sonores (cf. Tableau 15). Les écarts de quantile donnent donc une indication sur la stabilité de l'environnement sonore, c'est-à-dire l'alternance de périodes bruyantes et calmes.

Groupe	Quantiles en dB					
	Totalité des mesures			Deux dernières heures des mesures		
	L_{90}	L_{10}	$L_{10} - L_{90}$	L_{90}	L_{10}	$L_{10} - L_{90}$
Musique n = 55	57,9	91,3	33,4	62,9	92,6	29,7
Témoin n = 31	42,7	68,8	26,2	43,4	69	25,6

Tableau 15 : Moyennes des quantiles L_{90} et L_{10} mesurés durant la totalité des périodes de mesure ou durant les deux dernières heures.

Sur l'intégralité de la journée de travail, les L_{90} étaient plus élevés chez les volontaires du groupe Musique que chez ceux du groupe Témoins (+15,2 dB). L'écart entre ces deux groupes était encore plus important pour les intensités les plus fortes puisque l'écart atteignait 22,5 dB. Par conséquent, la dynamique (écart $L_{10} - L_{90}$) des niveaux sonores était beaucoup plus importante pour les volontaires du groupe Musique. En observant uniquement les deux dernières heures de la journée, qui correspondaient à la période du concert pour le groupe Musique, les écarts entre les quantiles des deux groupes augmentaient encore, mais l'amplitude des niveaux était réduite pour le groupe Musique passant de 33,4 dB à 29,7 dB. Pendant la période du concert, les amplitudes les plus élevées des niveaux sonores ont été enregistrées pour le blues et les plus faibles pour le rap.

Le kurtosis des $L_{Aeq,1s}$ informe sur la distribution de ces niveaux. Une distribution uniforme donne une valeur de kurtosis faible (tendant vers zéro), une distribution normale donne une valeur de 3 et des valeurs élevées correspondent à une distribution plutôt resserrée autour d'une valeur ou présentant des valeurs aberrantes (fortes ou faibles). Un environnement sonore très stable présentant des $L_{Aeq,1s}$ presque constants aura donc un kurtosis élevé alors qu'à l'inverse, une faible valeur correspond plutôt à un environnement sonore variable avec une large gamme de niveau sonore sans occurrence particulièrement marquée.

Groupe	Totalité des mesures			Deux dernières heures des mesures		
	Moyen	Maximum	Minimum	Moyen	Maximum	Minimum
Musique n = 55	-0,39	3,89	-1,44	0,47	12,68	-1,30
Témoin n = 31	-0,33	1,26	-1,23	-0,08	2,54	-1,30

Tableau 16 : Kurtosis des $L_{Aeq,1s}$ calculés durant la totalité des mesures ou durant les deux dernières heures des mesures.

Les kurtosis des $L_{Aeq,1s}$ les plus élevés ont été enregistrés parmi les volontaires exposés à la musique (cf. Tableau 16Tableau 17). Cet indicateur pouvait évoluer sensiblement entre les différentes périodes de la journée. Ainsi, durant les 2 dernières heures de travail, qui correspondaient à la période du concert pour les volontaires du groupe Musique, les kurtosis étaient plus élevés, notamment lors des concerts de rap et de rock. Durant ces concerts, le niveau sonore équivalent était relativement stable.

8.5.2.3 Kurtosis du signal audio

Le kurtosis du signal audio est calculé sur des fenêtres de 40 secondes du signal audio capté par le microphone de l'exposimètre. Cet indicateur est notamment utilisé pour caractériser les bruits non gaussiens, c'est-à-dire des bruits dont la distribution des amplitudes de la pression acoustique ne suit pas une distribution gaussienne (Qiu, 2020). Des valeurs extrêmes ou aberrantes par rapport à une distribution gaussienne provoquent une augmentation de la valeur du kurtosis. La valeur du kurtosis augmente donc en présence de bruit impulsionnel, bruit présentant une très forte dynamique.

	Genre	Effectif	Kurtosis		
			Moyen	Maximum	Minimum
Musique	Folk	16	17,9	38,7	11,7
	Rap	3	10,5	16,3	5,8
	Rock	12	9,1	12,8	5,1
	Pop	9	8,8	11,3	6,9
	Jazz	10	8,6	14,2	5,5
	Blues	5	7,6	10,4	4,9
	Ensemble	55	11,4	38,7	4,9
Témoin		31	20,7	63,0	8,5

Tableau 17 : Kurtosis audio moyenné durant les 2 dernières heures des mesures.

Les valeurs de kurtosis audio étaient plus élevées chez les volontaires du groupe Témoin que chez les volontaires du groupe Musique (cf. Tableau 17. Même si cette différence était plus marquée durant les deux dernières heures de travail qui correspondaient à la période du concert pour le groupe Musique, ce constat restait vrai sur l'analyse de l'ensemble de la journée. Les ambiances sonores les plus dynamiques étaient celles qui n'étaient pas (groupe Témoin) ou peu amplifiée (folk).

8.6 Fatigue auditive en fin de poste de travail

8.6.1 Fatigue auditive mesurée par audiométrie tonale

La fatigue auditive mesurée par ATL a pu être réalisée pour 86 volontaires dont 55 dans le groupe Musique et 31 dans le groupe Témoin. En raison d'un bruit de fond trop important lors des mesures d'ATL en fin de poste de travail, 6 volontaires parmi le groupe Musique n'ont pu être mesurés à 250 Hz et 4 à 500 Hz. Il s'agissait uniquement de volontaires mesurés lors de festivals en plein air.

Afin de tenir compte de la répétition des mesures aux 7 différentes fréquences (500 à 8000 Hz) pour un même volontaire, l'effet de la fatigue auditive entre groupes a été testé par un modèle mixte ayant 2 facteurs à effet fixe (fréquence et groupe) et un facteur à effet aléatoire (volontaire).

Ce modèle mixte indique que les facteurs fixes groupe ($p = 0,0008$) et fréquence ($p = 0,04$) étaient significatifs, mais pas l'interaction groupe fréquence.

La fatigue auditive mesurée par ATL était donc significativement différente entre les groupes Musique et Témoin, et la fatigue auditive dépendait de la fréquence.

La fatigue auditive a également été analysée fréquence par fréquence à l'aide d'une procédure non paramétrique. La *Figure 34* montre les résultats de cette analyse.

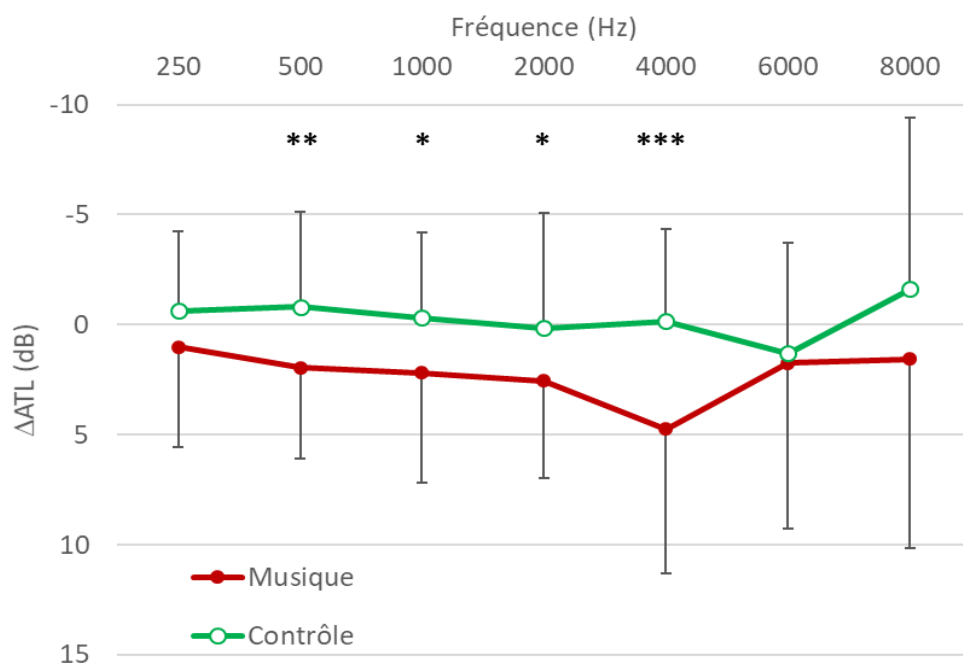


Figure 34 : Variation du seuil auditif (Δ ATL) en fonction des groupes Musique (n = 51) et Témoin (n = 31). Barres d'erreur écart-types. Significativité intergroupe * p < 0,05 ; ** p < 0,01 ; *** p < 0,001.

Comme attendu, la fatigue auditive du groupe témoin était très proche de 0 à toutes les fréquences. L'écart de fatigue auditive entre groupes était significatif de 500 à 4000 Hz. L'effet le plus important a été observé à la fréquence de 4000 Hz. Le Tableau 18 détaille les données à cette fréquence.

Groupe	Effectif	Δ ATL à 4000 Hz en dB				Etendue
		Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum	
Musique	55	4,7	6,6	-5	30	35
Témoin	31	-0,2	4,1	-10	5	15

Tableau 18 : Variation du seuil auditif (Δ ATL) à 4000 Hz.

8.6.2 Fatigue auditive mesurée par ECHOSCAN®

La fatigue auditive a été mesurée par ECHOSCAN® (Δ SRA) chez 79 volontaires dont 49 dans le groupe Musique et 30 dans le groupe Témoin.

Groupe	Effectif	Δ SRA en dB				Etendue
		Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum	
Musique	49	6,7	3,9	0	15	15
Témoin	30	0,3	2,3	-3	6	9

Tableau 19 : Variation du déclenchement du réflexe acoustique (Δ SRA).

La variation du déclenchement du réflexe acoustique du groupe Témoin était nulle alors que celle du groupe Musique atteignait 6,7 dB (cf. Tableau 19, Figure 35). L'exposition à la musique a induit une fatigue significative ($F(1;77) = 65$; $p = 0$).

Bien que la moyenne de Δ SRA du groupe Musique était plus élevée que Δ ATL, l'étendue des variations était moindre pour Δ SRA. Cela se traduit par un écart-type plus faible pour Δ SRA et une significativité plus forte pour Δ SRA par rapport à Δ ATL à 4000 Hz.

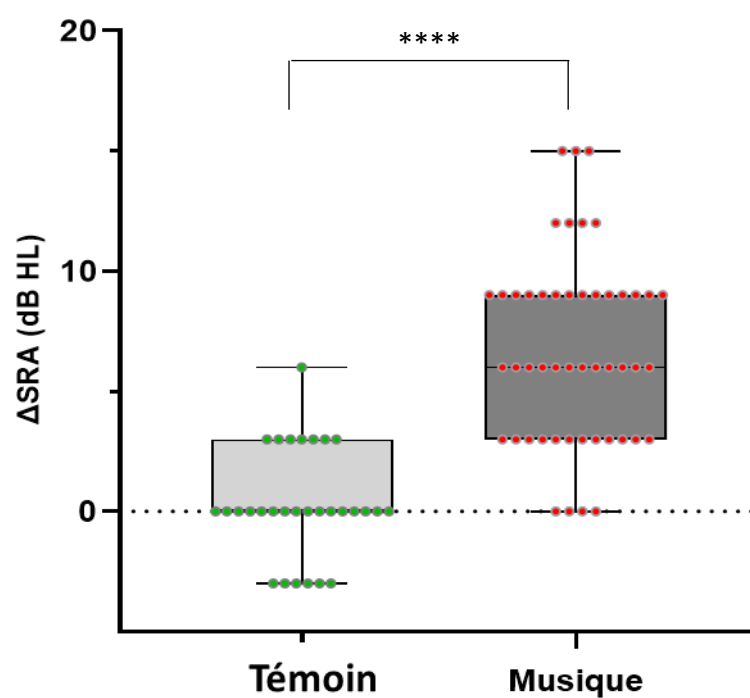


Figure 35 : Variation du seuil de déclenchement du réflexe acoustique (Δ SRA) en fonction des groupes Musique ($n = 49$) et Témoin ($n = 30$). Boite, premier au troisième quartile. Moustaches, étendue minimum à maximum. Significativité intergroupe **** $p < 0,0001$.

8.7 Modélisation de la fatigue auditive

Les modèles de la fatigue auditive comprennent tous des volontaires inclus, qu'ils aient été exposés à de la musique ou non. Ces modèles utilisent d'une part les facteurs d'exposition sonore et d'autre part les renseignements individuels (questionnaires et performance auditive mesurées au repos).

8.7.1 Analyse factorielle

L'analyse factorielle porte sur les 158 indicateurs issus de l'analyse des expositions sonores. Le nombre de mesures dans le jeu de données utilisé pour mener ces analyses était différent pour le réflexe acoustique mesuré par ECHOSCAN® (n = 79) et pour le seuil auditif mesuré par audiométrie tonale (n = 86), mais cet écart de 7 mesures n'a entraîné aucune différence notable au cours de l'analyse factorielle. La définition des facteurs était identique pour les deux jeux de données, seules les charges factorielles des indicateurs d'exposition étaient légèrement différentes. L'analyse factorielle présentée ci-après est celle réalisée sur le jeu de données contenant 86 mesures d'exposition.

Facteur	Valeur propre		Variance	
	Valeur	Différence	Proportion	Cumul
Facteur 1	91,88	73,95	0,58	0,58
Facteur 2	17,93	8,81	0,11	0,70
Facteur 3	9,13	3,66	0,06	0,75
Facteur 4	5,47	0,71	0,03	0,79
Facteur 5	4,77	1,13	0,03	0,82
Facteur 6	3,64	0,28	0,02	0,84
Facteur 7	3,35	0,80	0,02	0,86
Facteur 8	2,55	0,17	0,02	0,88
Facteur 9	2,38	0,48	0,02	0,89
Facteur 10	1,90	0,17	0,01	0,91
Facteur 11	1,73	0,32	0,01	0,92
Facteur 12	1,41	0,03	0,01	0,93
Facteur 13	1,38	0,22	0,01	0,93
Facteur 14	1,16	0,20	0,01	0,94
Facteur 15	0,96	0,04	0,01	0,95

Tableau 20 : Valeur propre des 15 premiers facteurs et proportion de la variance expliquée par ces facteurs.

Quatorze facteurs ont une valeur propre supérieure à 1. On observe une rupture de la décroissance des valeurs propres au niveau du facteur 5 (en gras ; Tableau 20). En

conséquence, seuls 5 facteurs sont retenus pour caractériser les expositions sonores ; à eux seuls ils expliquent 82% de la variance du jeu de données.

L'optimisation des facteurs est réalisée selon une rotation oblique. Après rotation, l'analyse des charges factorielles des indicateurs d'exposition supérieurs à 0,6 a permis d'interpréter les 5 facteurs. Le Tableau 21 fait la synthèse de cette interprétation. La table complète des charges factorielles pour chaque variable est jointe en annexe 3.

	Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3	Facteur 4	Facteur 5
Nom du facteur	Énergie sonore	Dynamique audio large bande	Stabilité sonore	Stabilité sonore dernière heure	Dynamique audio fréquences extrêmes
Type d'indicateur inclus	(+) Leq et quantiles	(+) Kurtosis audio	(+) Ecart de quantiles ; (-) Kurtosis de Leq	(+) Ecart de quantiles ; (-) Kurtosis de Leq(-)	(+) Kurtosis audio (63, 125, 16000 Hz)
Période de la mesure	Toutes	Toutes	3 h avant la fin et totalité	1h avant la fin	Toutes périodes
Gamme fréquentielle	Toutes	Niveaux globaux A C ; octaves 250 à 4000 Hz	Niveaux globaux A C	Niveaux globaux A C	Octaves 63, 125, 16000 Hz
Nombre de variables	83	21	9	7	7
Charge positive	83	21	6	4	7
Charge négative	0	0	3	3	0

Tableau 21 : Interprétation des facteurs. Type d'indicateur, (+) indicateurs dont la charge factorielle est positive, ou (-) négative. Les « périodes de mesure » correspondent soit à la totalité de l'enregistrement sonore, soit aux dernières heures (3h, 2h ou 1h avant la fin). La « gamme fréquentielle » correspond aux pondérations A et C ou aux bandes d'octave de 63 à 16000 Hz. Le « nombre de variables » est le nombre d'indicateurs d'exposition dont la valeur absolue de la charge factorielle est supérieure à 0,6. La « charge positive » est le nombre de variables dont la charge factorielle est supérieure à 0,6. La « charge négative » est le nombre de variables dont la charge factorielle est inférieure à -0,6.

Facteur 1 : Énergie sonore

Il s'agit du facteur le plus important. Avant rotation, ce facteur contenait à lui seul 58% de la variance des données d'exposition sonore. Quarante-trois variables définissent ce facteur.

Les variables d'intérêt de ce facteur sont des variables exprimant l'énergie sonore telles que les Leq globaux (pondérations A ou C) ou par bandes d'octave (63 à 16000 Hz) sur l'ensemble des périodes. Ce facteur contient également les niveaux globaux pondérés de manière exponentielle en fonction du temps et le $L_{EX,8h}$ correspondant à la dose de bruit journalière.

Facteur 2 : Dynamique audio large bande

Ce facteur est composé de 21 variables d'intérêt. Celles-ci correspondent à la distribution audio (kurtosis) sur une large gamme de fréquences (250 à 4000 Hz).

Facteur 3 : Stabilité sonore

Neuf variables correspondant à la distribution énergétique de l'exposition (Leq) composent ce facteur. Les différences de quantile ont des poids positifs tandis que les kurtosis de Leq ont des charges négatives (annexe 3). Les variables de ce facteur couvrent les périodes des 3 dernières heures et la totalité de la mesure d'exposition.

Facteur 4 : Stabilité sonore dernière heure

Ce facteur est composé de 7 variables. A l'instar du facteur 3, le facteur 4 est composé des différences de quantiles ($L_{10}-L_{90}$ et $L_{10}-L_{50}$) qui ont une charge factorielle positive, ainsi que des kurtosis de Leq qui ont une charge négative. Cependant, pour le facteur 5, toutes les variables correspondent à la dernière heure de travail avant la mesure auditive réalisée en fin de poste. Ce facteur correspond donc à la stabilité sonore durant la dernière heure d'exposition.

Facteur 5 : Dynamique audio fréquences extrêmes

Ce facteur est composé de 7 variables. Ces variables sont des kurtosis du signal audio filtré sur les bandes d'octave 63, 125 et 16000 Hz. Les périodes couvertes sont les 3 dernières, les 2 dernières et la dernière heure de mesure d'exposition sonore. Ce facteur représente donc la dynamique audio aux fréquences extrêmes de la gamme auditive.

8.7.2 Modèle de la fatigue mesurée par audiométrie tonale

Des modèles de ΔATL ont été réalisés aux fréquences pour lesquelles l'écart entre les groupes Musique et Témoin était significatif, c'est-à-dire 500, 1000, 2000 et 4000Hz.

8.7.2.1 Modèle Δ ATL à 500 Hz

Variables	Coefficient	Erreur standard	Probabilité
Facteur 1			
Energie sonore	1,58	0,42	< 0,0001
Facteur 5			
Dynamique audio fréquences extrêmes	-1,36	0,41	0,001
Audition compréhension	1,91	0,86	0,03
Constante	0,29	0,52	0,581
R² = 0,29		RMSE = 3,9 dB	

Tableau 22 : Modèle de la variation du seuil auditif à 500 Hz.

Trois variables définissent le modèle de Δ ATL à 500 Hz (cf. Tableau 22).

- **Facteur 1, énergie sonore.** Ce facteur tend logiquement à augmenter la variation du seuil auditif à 500 Hz. Il s'agit du facteur qui a le plus de poids dans la variation du seuil et dont la significativité est la plus forte.
- **Facteur 5, dynamique audio aux fréquences extrêmes.** Le coefficient négatif de ce facteur signifie que l'augmentation de la dynamique audio aux extrêmes du spectre tend à réduire Δ ATL à 500 Hz.
- **Audition compréhension.** Cette variable est issue du questionnaire. Selon ce modèle, un problème de compréhension dans le bruit déclaré par les volontaires tend à augmenter Δ ATL à 500 Hz. Cette variable est celle qui a le moins de poids sur Δ ATL à 500 Hz.

Qualité du modèle

Bien que l'erreur quadratique moyenne soit inférieure au pas de mesure de l'ATL (5 dB), le coefficient de corrélation n'est que de 0,3. Cela signifie qu'une part importante de Δ ATL à 500 Hz n'est pas prise en compte par les variables explicatives mesurées. D'autres paramètres, non pris en compte, ont donc une importance majeure sur Δ ATL à 500 Hz. De plus, les résidus de ce modèle ne suivent pas une distribution normale (aplatissement non asymptotique). Ce modèle est donc peu satisfaisant.

8.7.2.2 Modèle Δ ATL à 1000 Hz

Variables	Coefficient	Erreur standard	Probabilité
Facteur 1	1,95	0,46	< 0,0001
Énergie sonore			
Audition problème	-3,01	1,03	0,005
Audition compréhension	2,24	1,02	0,032
Constante	1,59	0,62	0,012
R² = 0,24		RMSE = 4,3 dB	

Tableau 23: Modèle de la variation du seuil auditif à 1000 Hz.

Trois variables définissent le modèle de Δ ATL à 1000 Hz (cf. Tableau 23).

- **Facteur 1, énergie sonore.** Comme pour le modèle Δ ATL à 500 Hz, ce facteur tend à augmenter la variation du seuil auditif à 1000 Hz. Il s'agit à la fois du facteur qui a le plus de poids dans la variation du seuil et celui dont la significativité est la plus forte.
- **Audition problème.** Cette variable est issue du questionnaire. Le coefficient de cette variable est négatif ce qui signifie que les volontaires ayant déclaré un problème auditif ont une Δ ATL à 1000 Hz plus faible.
- **Audition compréhension.** Cette variable est issue du questionnaire. Selon ce modèle, un problème de compréhension dans le bruit déclaré par les volontaires tend à augmenter Δ ATL à 1000 Hz. Cette variable est celle qui a le moins de poids.

Qualité du modèle

Le modèle n'explique que 24% de la variabilité de Δ ATL à 1000 Hz. Même si les résidus ont une distribution normale et si l'erreur quadratique moyenne est inférieure au pas de mesure de l'ATL, ce modèle reste peu satisfaisant. La variation moyenne de Δ ATL à 1000 Hz n'était que de 2,2 dB pour le groupe Musique. Même si cette variation était significative par rapport au groupe Témoin, cette faible variation limite également l'intérêt du modèle.

8.7.2.3 Modèle Δ ATL à 2000 Hz

Variables	Coefficient	Erreur standard	Probabilité
Facteur 2 Dynamique audio large bande	-1,63	0,48	0,001
Facteur 3 Stabilité sonore	-1,15	0,48	0,018
Sexe	2,47	1,05	0,021
Constante	-0,01	0,85	0,989
R² = 0,24		RMSE = 4,4 dB	

Tableau 24 : Modèle de la variation du seuil auditif à 2000 Hz.

Trois variables définissent le modèle de Δ ATL à 2000 Hz (cf. Tableau 24).

- **Facteur 2, dynamique audio large bande.** Le coefficient négatif signifie que les sons ayant un kurtosis audio élevé tendent à réduire Δ ATL à 2000 Hz. Ce coefficient est celui qui a le plus de poids sur Δ ATL à 2000 Hz même si pour ce modèle les poids des 3 variables sont proches.
- **Facteur 3, stabilité sonore.** Le coefficient négatif de ce facteur signifie que les ambiances sonores avec une très large gamme de niveaux, comme une alternance de bruit de forte et faible intensités tendent à réduire la fatigue auditive mesurée à 2000 Hz.
- **Sexe.** Le sexe femme/homme ayant été codifié par 0/1, le coefficient positif de cette variable signifie qu'être un homme tend à accroître Δ ATL à 2000 Hz.

Qualité du modèle

Le coefficient de régression de Δ ATL à 2000 Hz n'est que de 0,24. Les résidus de ce modèle ne suivent pas une distribution normale en raison du critère d'aplatissement non asymptotique. Comme pour la fatigue mesurée à 1000 Hz, la variation moyenne du seuil à 2000 Hz dans le groupe exposé était significative mais de faible ampleur (2,5 dB). L'intérêt de ce modèle reste également limité.

8.7.2.4 Modèle Δ ATL à 4000 Hz

Variables	Coefficient	Erreur standard	Probabilité
Facteur 1	2,9	0,56	< 0,0001
Énergie sonore			
Facteur 3	-1,33	0,56	0,019
Stabilité sonore			
Seuil auditif 2000 Hz début de poste	-0,15	0,06	0,027
Sexe	3,14	1,24	0,013
Constante	1,11	1,04	0,287
R² = 0,39		RMSE = 5,2 dB	

Tableau 25 : Modèle de la variation du seuil auditif à 4000 Hz.

Quatre variables définissent le modèle de Δ ATL à 4000 Hz (cf. Tableau 25).

- **Facteur 1, énergie sonore.** Ce facteur est à la fois celui ayant la meilleure probabilité et celui ayant le plus de poids. L'impact de ce facteur est plus de deux fois supérieur aux autres variables du modèle qui ont des poids équivalents. Le coefficient de ce facteur est logiquement positif ce qui signifie que les fortes expositions sonores tendent à augmenter la fatigue auditive mesurée à 4000 Hz.
- **Facteur 3, stabilité sonore.** Le coefficient de ce facteur est négatif. Les ambiances sonores présentant une large gamme de niveaux contribuent à réduire Δ ATL à 4000 Hz.
- **Seuil auditif 2000 Hz en début de poste.** Le coefficient négatif du seuil auditif mesuré à 2000 Hz au repos, avant le début de la journée de travail, signifie qu'un seuil élevé à cette fréquence est associé à une réduction de la fatigue auditive mesurée à 4000 Hz.
- **Sexe.** Comme pour le modèle Δ ATL à 2000 Hz, le sexe est corrélé à la fatigue auditive mesurée à 4000 Hz. Les hommes sont associés à une augmentation de la fatigue mesurée indépendamment du niveau d'exposition sonore représenté par le facteur 1.

Qualité du modèle

Le modèle explique près de 40% de la variabilité de Δ ATL à 4000 Hz ce qui est bien supérieur aux modèles réalisés aux autres fréquences. Les résidus de ce modèle ne suivent pas tout à

fait une distribution normale en raison du critère d'aplatissement ($p = 0,03$, pour un seuil fixé à $p = 0,05$). L'erreur quadratique moyenne (5,2 dB) est de l'ordre du pas de mesure (5 dB). Le modèle de Δ ATL à 4000 Hz est le plus intéressant des modèles expliquant les variations de seuil auditif. C'est également à cette fréquence que la variation de seuil était la plus élevée pour le groupe Musique (4,7 dB) et la plus significative par rapport au groupe Témoin ($p < 0,001$).

Effet Sexe

La proportion de femmes étant plus élevée dans le groupe Témoin (42%) que dans le groupe Musique (26%), des analyses complémentaires ont été menées pour étudier un biais éventuel dû à la sous-représentation des femmes parmi les volontaires les plus exposés au bruit.

Un modèle de Δ ATL à 4000 Hz intégrant l'interaction des variables facteur 1 et sexe sur l'ensemble de la population ($n = 86$) a donc été réalisé. Ce modèle montre que l'interaction est significative. Les variables facteur 1 et sexe ne peuvent donc pas être analysées indépendamment car le coefficient du facteur 1, représentant l'énergie sonore, dépend du sexe. L'analyse de Δ ATL à 4000 Hz a donc été effectuée en fonction du sexe en réalisant un modèle pour les femmes et un autre pour les hommes.

Pour les hommes, le modèle intègre les mêmes variables facteur 1, facteur 3 et seuil auditif 2000 Hz en début de poste. Les coefficients évoluent peu par rapport au modèle intégrant le sexe. En revanche, pour les femmes, le coefficient du facteur 1 est très faible (cf. Figure 36). Chez les femmes, la fatigue auditive mesurée à 4000 Hz n'est d'ailleurs pas significative entre les groupes Musique et Témoin.

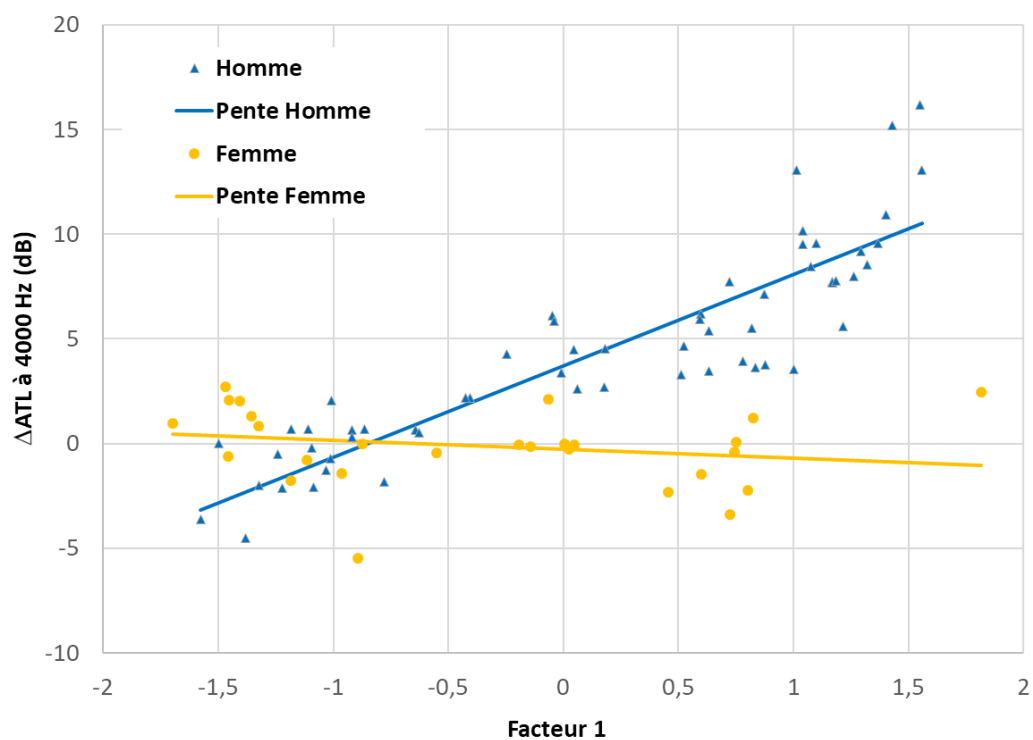


Figure 36 : Valeurs et pentes "a" du Facteur 1 en fonction de la variation du seuil auditif à 4000 Hz modélisée par régression ($\Delta ATL_{4000} = a.Facteur1 + b.Facteur3 + c.ATL_{2000} + Constante$).

8.7.2.5 Modèle de la variation du seuil de déclenchement du réflexe acoustique

Variables	Coefficient	Erreur standard	Probabilité
Facteur 1 Énergie sonore	3,53	0,34	< 0,0001
Facteur 3 Stabilité sonore	-0,85	0,33	0,013
Seuil auditif 250 Hz début de poste	-0,32	0,08	0
Seuil auditif 500 Hz début de poste	0,16	0,08	0,037
Seuil auditif 6000 Hz début de poste	0,06	0,03	0,04
Constante	3,43	0,47	0
R² = 0,63		RMSE = 3,1 dB	

Tableau 26 : Modèle de variation du seuil de déclenchement du réflexe acoustique.

Cinq variables définissent le modèle de Δ SRA (cf. Tableau 26).

- **Facteur 1, énergie sonore.** Ce facteur est celui qui a le plus de poids sur Δ SRA. Comme attendu, son coefficient est positif, ce qui signifie que l'augmentation de l'énergie sonore contribue à augmenter l'amplitude de la fatigue auditive mesurée par ECHOSCAN®.
- **Facteur 3, stabilité sonore.** Comme pour les modèles Δ ATL à 2000 et 4000 Hz, le coefficient négatif de ce facteur signifie que les ambiances sonores avec une large gamme de niveaux sonores, comme une alternance de périodes calmes et bruyantes, contribuent à réduire Δ SRA. Inversement, les ambiances sonores très stables contribueront à augmenter l'amplitude de la fatigue auditive mesurée par ECHOSCAN®. Le poids de cette variable est cependant 3 fois plus faible que celui du facteur 1.
- **Seuil auditif à 250 Hz en début de poste.** Le coefficient négatif de cette variable indique qu'une bonne perception auditive à 250 Hz (faible seuil) est associé à une augmentation de Δ SRA. Inversement, les personnes ayant une mauvaise perception à 250 Hz seraient associées à une fatigue moindre. Le poids de ce facteur sur Δ SRA est le second plus important après le facteur 1.

- Seuils auditifs à 500 Hz et 6000 Hz en début de poste.** Ces deux variables ont un coefficient positif, ce qui implique qu'une personne ayant une mauvaise perception auditive à ces fréquences serait associée à une fatigue de plus grande amplitude. L'effet de ces deux variables est donc opposé à celui du seuil auditif mesuré à 250 Hz. De plus, la somme des poids des variables des seuils auditifs mesurés à 500 et 6000 Hz est équivalente en valeur absolue mais de signe opposé au poids de la variable du seuil auditif à 250 Hz. Ainsi, pour une personne ayant des seuils auditifs uniformes à toutes les fréquences, les effets des trois variables se compensent et ΔSRA n'est alors dépendant que des facteurs 1 et 3 exprimant respectivement à l'énergie sonore et à la stabilité de l'ambiance sonore. A l'inverse, pour les personnes ayant un seuil auditif à 250 Hz bas, mais des seuils plus élevés à 500 et 6000 Hz, l'amplitude de la fatigue auditive serait accrue. Cette situation est typique des personnes présentant un scotome centré sur 4000 ou 6000 Hz se prolongeant sur les moyennes fréquences comme illustré par la Figure 37. Les scotomes auditifs sont caractéristiques des pertes auditives liées à une surexposition sonore répétée. Dans les exemples illustrés par la Figure 37, ΔSRA mesuré pour le volontaire 51 était de 9 dB pour une exposition sonore journalière de 89,5 dB(A) alors que ΔSRA du volontaire 59 était de 15 dB pour une exposition sonore journalière de 88,5 dB(A).

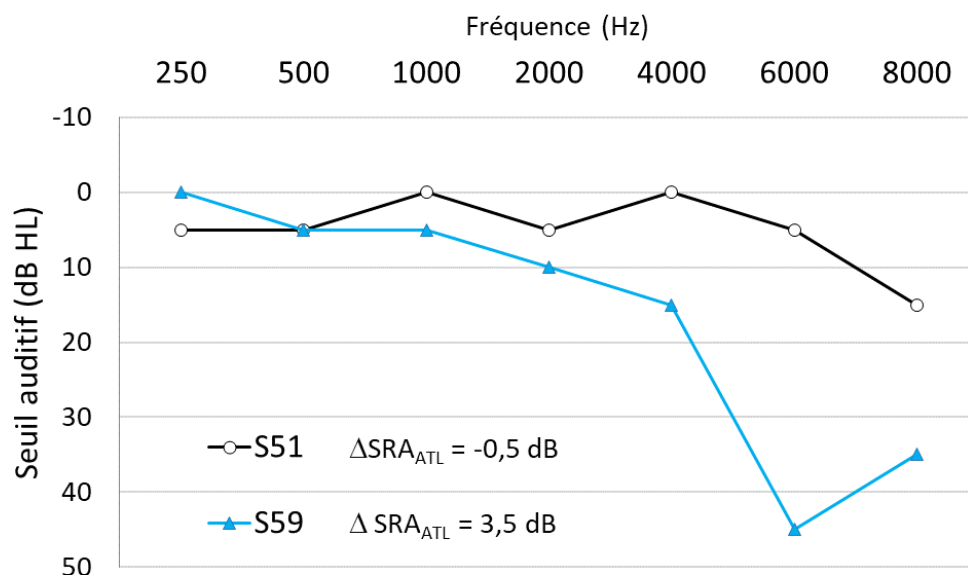


Figure 37 : Audiogramme des volontaires S51 et S59 mesurés au repos et calcul de l'effet de ces seuils à 250, 500 et 6000 Hz (ΔSRA_{ATL}) dans le modèle ΔSRA . Volontaire S51 : faible effet de diminution de ΔSRA en fin de poste de travail : Volontaire S59 : augmentation de ΔSRA de 3,5 dB.

Qualité du modèle.

Le modèle Δ SRA explique 63% de la variabilité de la fatigue auditive mesurée par ECHOSCAN®. Les résidus de ce modèle suivent une distribution normale et l'erreur quadratique moyenne est de 3,1 dB soit équivalente au pas de mesure du seuil de déclenchement du réflexe acoustique (3 dB). Ce modèle est, de loin, le plus satisfaisant de tous ceux présentés au-dessus. Il explique mieux la fatigue mesurée que les modèles Δ ATL.

8.7.3 Exemples de modèles utilisant les indicateurs d'expositions mesurés

Afin d'appréhender les paramètres d'exposition intervenant dans les modèles présentés ci-avant, des modèles ont été calculés en remplaçant les facteurs d'exposition par une sélection d'indicateurs d'exposition contenus dans ces facteurs. Cette sélection a été réalisée sur la base des indicateurs ayant les plus fortes charges factorielles.

- Pour le facteur 1 « énergie sonore », l'indicateur $L_{EX,8h}$ a été retenu.
- Pour le facteur 3 « stabilité sonore », les indicateurs L_{10-L50} des $L_{Aeq,1s}$ des 3 dernières heures de travail et le kurtosis des $L_{Aeq,1s}$ de la totalité de la mesure ont été retenus. Ces 2 indicateurs ont été sélectionnés car ils expriment un contraste du facteur 3 : L_{10-L50} a une charge factorielle positive alors que le kurtosis a une charge factorielle négative.

Seuls les deux meilleurs modèles, Δ ATL à 4000 Hz et Δ SRA, ont été recalculés avec les indicateurs mesurés.

- Δ ATL à 4000 Hz

Variables	Coefficient	Erreur standard	Probabilité
$L_{EX,8h}$	0,27	0,05	< 0,0001
$L_{10}-L_{50}$	-0,31	0,1	0,002
Seuil auditif 2000 Hz début de poste	-0,15	0,06	0,02
Sexe	2,64	1,21	0,032
Constante	-15,66	3,92	0
$R^2 = 0,41$		RMSE = 5,0 dB	

Tableau 27 : Modèle de la variation du seuil auditif à 4000 Hz calculé avec une sélection d'indicateurs d'exposition sonore. $L_{10}-L_{50}$ est la différence des quantiles des $L_{Aeq,1s}$ durant les 3 dernières heures de travail.

Le modèle calculé avec les variables mesurées (cf. Tableau 27) est très proche de celui calculé avec les facteurs (cf. Tableau 25). Le coefficient de régression est de 0,41 contre 0,39 pour le modèle avec facteurs et le RMSE est de 5 dB contre 5,2. Les résidus ne suivent pas une distribution normale, mais en sont très proches.

- Δ SRA

Variables	Coefficient	Erreur standard	Probabilité
$L_{EX,8h}$	0,31	0,03	0,039
$L_{10}-L_{50}$	-0,16	0,06	0
Seuil auditif 250 Hz début de poste	-0,3	0,08	0
Seuil auditif 500 Hz début de poste	0,16	0,08	0,033
Seuil auditif 6000 Hz début de poste	0,05	0,03	0,081
Constante	-18,64	2,5	0,08
$R^2 = 0,60$		RMSE = 3,1 dB	

Tableau 28 : Modèle de variation du seuil de déclenchement du réflexe acoustique calculé avec une sélection d'indicateurs d'exposition sonore. $L_{10}-L_{50}$ est la différence des quantiles des $L_{Aeq,1s}$ durant les 3 dernières heures de travail.

Les performances du modèle Δ SRA calculé avec les indicateurs mesurés (cf. Tableau 28) sont équivalentes à celles du modèle utilisant les facteurs issus de l'analyse factorielle. Le modèle avec facteurs a un coefficient de corrélation de 0,63 contre 0,6 pour le modèle utilisant les indicateurs d'exposition, le RMSE est identique. Les résidus suivent une distribution normale.

Dans les deux cas, Δ ATL à 4000 Hz et Δ SRA, les performances des modèles utilisant les indicateurs mesurés sont très proches de ceux utilisant les facteurs. Cependant, la sélection de quelques indicateurs mesurés intégrant une plus faible part de la variabilité des données d'exposition, l'application des modèles avec ces indicateurs pourrait être moins pertinente sur d'autres jeux de données d'exposition sonore.

8.8 Récupération de la fatigue auditive

Lorsque la situation le permettait, les mesures auditives, ATL et ECHOSCAN[®], ont été répétées après une durée de récupération. Les mesures de récupération de la fatigue auditive concernent 20 volontaires du groupe Musique. Dix volontaires ont été mesurés avec une durée de récupération longue de plus de 12 heures alors que 10 autres ont été mesurés avec une durée de récupération courte comprise entre 32 minutes et 1h45 après la fin du concert (cf. Tableau 29).

		Durée h:mm	Δ ATL 4000 Hz dB	Δ SRA dB
Durée longue	T1a	0:30 ± 0:22	3,5 ± 3,4 **	5,7 ± 3,0 ***
	T2a	16:29 ± 2:00	- 0,5 ± 4,4	-0,3 ± 3,6
	Evolution T2-T1		-4,0 ± 5,2	-6,0 ± 3,7
Durée courte	T1b	0:16 ± 0:08	4,5 ± 6,0 *	7,8 ± 4,9 ***
	T2b	01:22 ± 0:27	1,0 ± 3,9	2,7 ± 3,3 *
	Evolution T2-T1		-3,5 ± 3,4	-5,1 ± 3,5

Tableau 29 : Valeurs moyennes et écart-types des durées entre la fin du concert et les mesures auditives, des variations de seuil auditif mesurées à 4000 Hz (Δ ATL 4000) et des variations du seuil de déclenchement du réflexe acoustique (Δ SRA). Test de Student, hypothèse d'une moyenne nulle, * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$

Les durées de récupération longues ont permis de vérifier que 16 heures après la fin du concert les volontaires ne souffraient plus de fatigue auditive, qu'elle soit mesurée par ATL ou par le procédé EchoScan.

Les durées de récupération courtes ont montré que la récupération de la fatigue était enclenchée, mais pas achevée pour l'ensemble des volontaires. La moyenne de Δ SRA en T2b

restait significativement différente de 0 ($p = 0,03$). La variation du seuil auditif à 4000 Hz passait de 4,5 à 1,0 dB alors que la variation du seuil du réflexe passait de 7,8 à 2,7 dB.

La cinétique de récupération de la fatigue a été estimée par un ajustement de courbe exponentielle sur les durées courtes car la récupération de la fatigue auditive a une allure multi-exponentielle (Mills et al., 1970; Patuzzi, 1998). Les paramètres des courbes exponentielles de récupération sont notés dans le Tableau 30. Ces courbes sont représentées sur la Figure 38.

$Y = Y_0 \exp(-t/T)$	Récupération de ΔATL 4000 Hz	Récupération de ΔSRA
Ordonnée à l'origine Y_0	7,5 dB	11 dB
Constante de temps T	72 min	51 min
Demi-vie	50 min	36 min

Tableau 30 : Paramètres des courbes de décroissance exponentielle en fonction du temps de la fatigue auditive mesurée par audiométrie tonale (ΔATL) à 4000 Hz et par ECHOSCAN® (ΔSRA).

La récupération de la fatigue auditive mesurée par ΔATL à 4000 Hz paraît être plus rapide que celle mesurée par ΔSRA . Cependant, le faible nombre d'observations oblige à considérer ces résultats avec précaution.

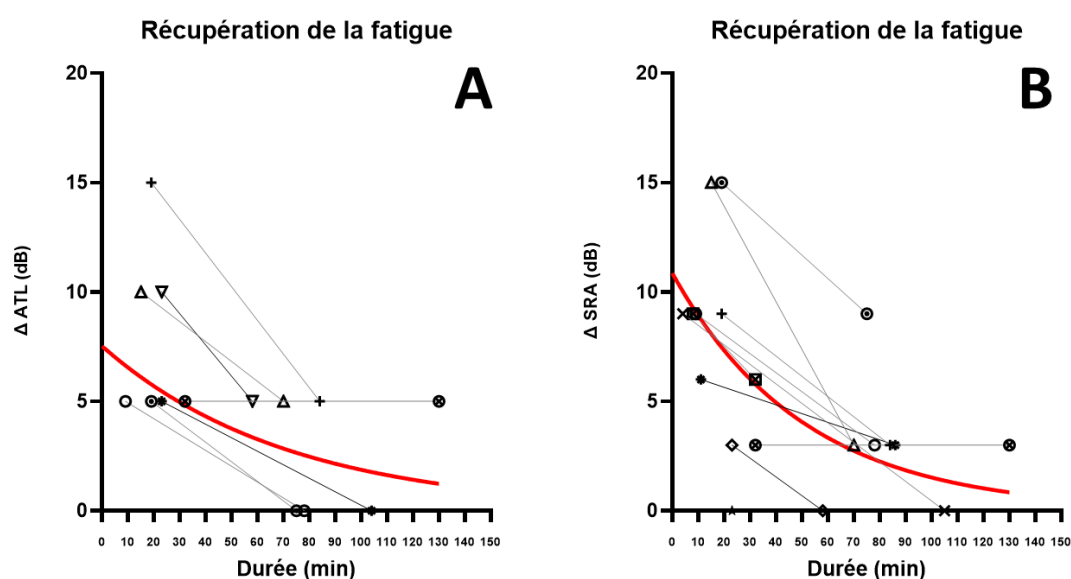


Figure 38: Fatigue auditive mesurée en fin d'exposition et après une courte période de récupération chez 10 volontaires du groupe Musique. En rouge, courbes de décroissance exponentielle en fonction

du temps. A) fatigue auditive mesurée par audiométrie tonale (Δ ATL). B) fatigue mesurée par ECHOSCAN® (Δ SRA).

9 Discussion

9.1 Population et limitations dans l'analyse des données

Parmi les 100 personnes s'étant portées volontaires pour participer à l'étude "Musique amplifiée et fatigue auditive", 14 ont été exclues pour différentes raisons : un seuils auditifs trop élevés, un niveau de PDA faible, un seuil de déclenchement du réflexe élevé, ou tout simplement d'une indisponibilité du volontaire au moment de la mesure. La multiplicité des raisons au regard du nombre d'exclus ont fait qu'il est difficile d'analyser et classifier ces causes d'exclusion. Cependant, ni l'âge ni la durée de l'expérience professionnelle n'ont été des facteurs responsables de l'exclusion. Tout au plus, on a constaté que les seuils auditifs à 4000 et 6000 Hz étaient significativement plus élevés chez les volontaires exclus que chez les inclus.

Les femmes sont peu nombreuses parmi les métiers qui correspondent au groupe Musique (régisseur son ou lumière, agent de sécurité...). Malgré les efforts réalisés lors du recrutement de volontaires, il n'a pas été possible d'équilibrer le sex-ratio du groupe Musique ; ce dernier était composé de 75% d'hommes. L'écart n'est cependant pas significatif avec le groupe Témoin légèrement surreprésenté en homme (58%). En plus du déséquilibre du sex-ratio, les femmes au sein du groupe Musique ont également tendance à être moins exposées que les hommes. Ainsi, une seule femme a eu une exposition sonore journalière supérieure à 88 dB(A) contre 21 hommes. Ce manque d'informations relatives aux expositions sonores élevées des femmes limite la puissance des interprétations de l'effet sexe mis en évidence par le modèle de Δ ATL à 4000 Hz et impose une grande prudence envers ces résultats même si l'effet illustré en Figure 36 paraît important.

9.2 Exposition sonore

Au cours des mesures réalisées dans le cadre de cette thèse, 47% des volontaires du groupe Musique ont été exposés à des doses journalières de bruit supérieures à 87 dB(A), qui est la valeur limite d'exposition sonore réglementaire au travail. Compte tenu du fait que l'intensité de l'exposition sonore des journées de travail était qualifiée de « normales » par les

volontaires, on peut en déduire que ceux-ci y étaient exposés de manière régulière. On constate cependant que les niveaux d'exposition étaient très variables d'un volontaire à l'autre : ils s'échelonnaient de 74 à 96,5 dB(A). Pourtant, de manière assez surprenante, l'exposition sonore ne dépendait pas de la fonction assurée par les sujets. En revanche, l'exposition sonore relevait du genre musical. Tous les salariés travaillant dans l'espace de diffusion de la musique, quelle que soit leur activité, encourrent donc un risque pour leur audition.

La littérature ne reporte pas cette différence en fonction du genre musical, elle souligne plutôt une différence en fonction du métier car la plupart des études ont été menées dans des situations extrêmes, principalement lors de concerts de rock ou en discothèque (Trompette and Venet, 2020). La présente étude s'étant attachée à illustrer la diversité des expositions sonores rencontrées dans ce secteur, sans se focaliser pour autant sur les plus intenses, les écarts entre métiers étaient alors faibles par rapport aux écarts entre les différents genres musicaux. Il est également logique que l'exposition moyenne mesurée au cours de cette étude sur un large éventail de genres musicaux (du folk au rock) ait été inférieure à celles rapportées dans la littérature. Deux autres points peuvent aussi expliquer cette différence.

Premièrement, un décret français a récemment abaissé la limite des niveaux sonores maximums autorisés pour le public à 102 dB(A) ou 118 dB(C) (moyenne glissante calculée sur une période de 15 minutes), alors qu'elle était auparavant de 105 dB(A).

Deuxièmement, les expositions sonores mesurées dans cette étude prenaient en compte l'intégralité de la journée de travail et non pas seulement les périodes de concert, comme c'est le cas dans la plupart des articles de la littérature. Or, les périodes d'exposition à de la musique (balances, répétitions, concerts) ne représentaient qu'une partie de la durée de travail, en moyenne 3h sur une journée de 8h. En dehors des phases d'exposition à de la musique, les volontaires du groupe Musique étaient exposés à des niveaux moyens de faible intensité, proches de 70 dB(A), c'est-à-dire comparables aux niveaux d'exposition du groupe Témoin. L'exposition sonore journalière des volontaires exposés était donc arithmétiquement plus faible que le niveau sonore de la musique comme le montre le Tableau 13 (différence entre L_{Aeq} musique et $L_{EX,8h}$).

L'écart de niveaux sonores entre les périodes d'exposition à de la musique et les autres moments était si grand que la dose de bruit journalière n'était due qu'aux phases musicales. En conséquence, puisque l'exposition journalière de ces professionnels n'était fonction que du niveau sonore de la musique et de sa durée, la connaissance de ces deux valeurs suffit donc pour estimer l'exposition sonore journalière. C'était notamment le cas pour la pop, le rock, le blues et le rap car, pour ces genres musicaux, les niveaux moyens de la musique dépassaient systématiquement 90 dB(A). Seuls les niveaux sonores moyens de la musique folk, et parfois du jazz, étaient suffisamment faibles (inférieurs à 85 dB(A)) pour que les périodes hors exposition à la musique puissent contribuer significativement à la dose de bruit globale. Dans de nombreuses situations, une réduction suffisante de l'exposition sonore de ces professionnels ne pourrait donc être obtenue qu'en abaissant le niveau d'exposition à la musique, soit en réduisant le niveau sonore de la musique diffusée, soit en portant un protecteur auditif. Mais la réduction de la durée d'exposition n'aurait qu'un effet limité puisqu'une réduction de moitié n'entraînerait qu'une diminution de 3 dB (taux d'échange durée/niveau de 3 dB selon la réglementation Européenne). Il est à noter que, lors de cette étude, aucun volontaire n'a eu à réaliser des montages de structures scéniques lourdes. Or, ces montages ont été mentionnés par les volontaires comme une source d'exposition sonore majeure en raison des nombreux chocs métalliques (utilisation de marteau). Ces phases de montage auraient pu augmenter l'exposition sonore des techniciens plateaux, notamment lorsque les niveaux d'exposition à la musique étaient modérés (folk ou jazz). Ces phases de montage les auraient également probablement exposés à des niveaux de crêtes de fortes intensités.

Parmi les 55 volontaires du groupe Musique, aucun n'a été exposé à des niveaux de crêtes supérieurs à 135 dB(C) produits par de la musique amplifiée. Lors des concerts ou répétitions, les niveaux de crêtes étaient compris entre 120 et 125 dB(C), ils n'ont jamais dépassé 130 dB(C), que ce soit en salle ou en plein air, y compris pour des agents de sécurité se tenant juste devant la scène, à proximité des caissons de basses fréquences très puissants. Lorsque des sujets volontaires ont été exposés à des niveaux de crêtes supérieurs à 135 ou 137 dB(C), il s'agissait du son direct, non amplifié de la batterie. Cela s'est produit, comme on peut le voir sur la Figure 27 lors de répétitions ou balances, alors que le technicien intervenait sur la batterie pendant que le batteur jouait. Les autres situations, durant lesquelles des volontaires

ont été exposés à des niveaux de crêtes supérieurs à 135 dB(C), se sont produites lors de chocs à l'occasion de la manipulation de caisses ou d'éléments de structure scénique. Le risque d'exposition à des niveaux de crêtes supérieurs à 135 dB(C) était donc relativement faible pour les professions suivies au cours de cette étude (techniciens, agents de sécurité, barmen) et limité à certaines opérations spécifiques. En revanche, comme le confirme la littérature, ce risque est beaucoup plus important pour les musiciens, et notamment pour les batteurs, même si ces derniers jouent sans amplification (Axelsson and Lindgren, 1977; Fearn, 1993; Kähäri et al., 2003).

9.3 Fatigue auditive

La fatigue auditive mesurée en fin de poste de travail est significative chez les volontaires exposés à de la musique. Avec une variation de 4,7 dB, c'est à 4000 Hz que la Δ ATL est la plus importante confirmant d'une part, les résultats d'une étude précédente réalisée dans le secteur industriel (Venet et al., 2014a), et d'autre part, ceux obtenus par Axelsson et Lindgren, en 1981, chez 30 musiciens. Pour un diagnostic de la fatigue auditive en milieu professionnel par audiométrie tonale, il conviendrait donc de réaliser les mesures auditives à 4000 Hz.

Selon Axelsson et Lindgren (1981), la fatigue auditive, évaluée après 2 heures de concert par la moyenne des variations de seuils entre 1000 et 8000 Hz, n'apparaissait qu'à partir de 98 dB(A) pour les musiciens et 93 dB(A) pour le public. Dans la population étudiée dans ce travail de thèse, la fatigue auditive, qu'elle soit mesurée uniquement par la Δ ATL à 4000 Hz ou par une moyenne entre 1000 et 8000 Hz, apparaissait entre 85 et 90 dB(A). Cette susceptibilité accrue à la fatigue obtenue dans la présente étude par rapport à celle d'Axelsson et Lindgren pourrait s'expliquer par l'évolution du spectre sonore de la musique amplifiée depuis 1981. En effet, l'énergie en basses fréquences a augmenté à un tel point qu'elle est devenue prépondérante, excepté pour le folk. Dans une moindre mesure, les niveaux sonores des fréquences élevées ont également augmenté. Or, la pondération A traduit mal l'énergie sonore aux fréquences extrêmes et notamment dans les basses fréquences où, par exemple, l'atténuation atteint 26,2 dB à 63 Hz. Le niveau sonore en dB(A) a donc peu évolué entre cette étude et celle d'Axelsson et Lindgren tandis que les intensités sonores à 125 et 63 Hz ont fortement augmenté (cf. Figure 39). L'autre différence entre ces deux études est le niveau de

référence utilisé pour quantifier la Δ ATL. Dans la présente étude, la mesure servant de référence est réalisée à l'arrivée des professionnels, avant qu'ils ne commencent à travailler. Cette mesure était donc généralement effectuée en fin de matinée ou en début d'après-midi, avant toute exposition sonore importante. En revanche, Axelsson et Lindgren ne précisent pas à quel moment la mesure de référence a été réalisée. Leurs analyses étant basées uniquement sur la période du concert, la mesure de référence pourrait très bien intégrer la fatigue auditive provoquée par la journée et notamment celle engendrée par d'éventuelles répétitions ou balances, ce qui amputerait la Δ ATL en fin de concert. De même, l'audition du public mesurée avant le concert pourrait également présenter un degré de fatigue lié à l'exposition au bruit au cours de la journée écoulée.

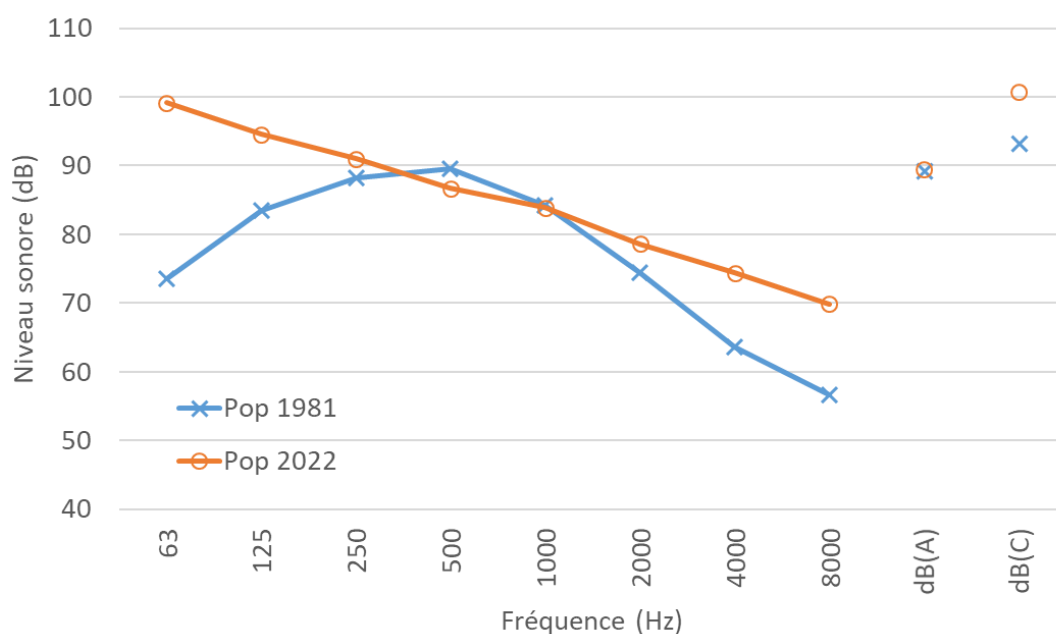


Figure 39 : Comparaison des spectres sonores moyens de musique pop mesurés par Axelsson et Lindgren, 1981 (pop 1981) et au cours de la présente étude (pop 2022).

Si la Δ ATL à 4000 Hz apparaît plus sensible dans la présente étude que dans celle réalisée par Axelsson et Lindgren, la fatigue auditive mesurée par le procédé EchoScan l'est encore davantage. En effet, la valeur moyenne de la Δ SRA calculée pour le groupe Musique est de 6,7 dB. Comme l'avait déjà montré les résultats de (Venet et al., 2014a), cette technique est également plus spécifique puisque par exemple, le nombre de variations inférieures ou égales à zéro dans le groupe Musique était égal à 19 pour la Δ ATL à 4000 Hz contre seulement 4 pour

la Δ SRA. Cela se traduit par des valeurs de Δ SRA moins dispersées que celles de Δ ATL, l'écart-type de la Δ SRA n'étant que de 3,9 dB contre 6,9 dB pour Δ ATL. L'étude de Venet et al., en 2014, avait été réalisée avec une cohorte de salariés de l'industrie et du BTP en utilisant un dispositif différent puisque le SRA avait été mesurés avec le prototype développé par l'INRS et non le dispositif commercial d'ECHODIA. La concordance en terme de sensibilité et spécificité de la mesure de la fatigue entre la présente étude et celle de Venet et al., 2014a montre que c'est bien le procédé EchoScan avec lequel on mesure le seuil de déclenchement du réflexe acoustique basé sur les mesures de PDA qui permet cet avantage par rapport à l'audiométrie tonale liminaire et non le dispositif matériel.

Cette meilleure sensibilité que l'audiométrie tonale pour mesurer la fatigue peut s'expliquer principalement par deux mécanismes développés au paragraphe 4.

Premièrement, la mesure du seuil de déclenchement du réflexe acoustique est une mesure non assujettie aux mécanismes de plasticité pouvant compenser une baisse de l'efficacité du récepteur périphérique (Venet et al., 2012, 2011). En revanche, la plasticité peut moduler les résultats de l'audiométrie tonale liminaire et pourrait ainsi compenser les dysfonctionnements subtils de l'oreille, ou la fatigue, pour maintenir un haut niveau de sensibilité (Kaltenbach and Zhang, 2007b; W. H. a. M. Mulders and Robertson, 2013; Noreña and Eggermont, 2003)

Deuxièmement, la mesure de déclenchement du seuil du réflexe auditif nécessite des stimulations sonores généralement comprises entre 75 et 90 dB HL tandis que l'audiométrie tonale est réalisée avec de faibles stimulations autour du seuil d'audition. Or, les fibres nerveuses afférentes à bas taux de décharges spontanées des CCI, fibres ayant un seuil de déclenchement sonore élevé, sont les premières fibres touchées lors d'expositions sonores (Furman et al., 2013). Une oreille interne dont le nombre de fibres à bas taux de décharges est réduit, aura par conséquent une réponse dégradée dans les intensités sonores élevées tout en présentant un fonctionnement normal aux faibles intensités (fibre à haut taux de décharges spontanées). Ce mécanisme est à l'origine du concept des pertes auditives masquées, concept largement étudié au cours de cette dernière décennie (Kobel et al., 2016; Liberman and Kujawa, 2017; Viana et al., 2015; Wu et al., 2019).

La mesure du seuil auditif qui est issue d'une réponse complexe est donc plus difficile à appréhender avec un modèle simple. L'ATL est également une mesure subjective faisant

intervenir la coopération du sujet testé, alors que le procédé EchoScan est une mesure objective. Cette différence joue également en faveur du modèle Δ SRA. Enfin, la mesure par le procédé EchoScan est moins sensible au bruit ambiant car les mesures sont réalisées avec des sondes émettant des niveaux sonores entre 40 et 60 dB pour mesurer les otoémissions du côté ipsilatéral et entre 68 et 98 dB HL pour déclencher le réflexe du côté controlatéral. De plus, les bouchons audiométriques utilisés pour les mesures EchoScan isolent les oreilles du bruit. Pour l'ATL, les niveaux sont beaucoup plus faibles, souvent compris entre -5 et 20 dB HL. Même si les écouteurs étaient protégés par des coques anti-bruit, l'ATL reste plus vulnérable au bruit ambiant que ne l'est le procédé EchoScan. En conséquence, la qualité de la mesure ATL peut être altérée par le bruit ambiant qui peut alors dégrader la modélisation de Δ ATL. D'ailleurs, 6 mesures d'ATL, réalisées lors d'un festival, n'ont pu être exploitées à 250 Hz en raison de basses fréquences provenant de la diffusion de musique dans une salle pourtant située à une centaine de mètres.

Toutes ces différences physiologiques et métrologiques entre les deux types de mesure sont les raisons pour lesquelles le modèle de Δ SRA, issu des mesures ECHOSCAN®, explique beaucoup mieux la fatigue mesurée (R^2 plus élevé et RMSE plus faible) que les modèles Δ ATL.

En revanche, la principale limite du procédé EchoScan est de requérir des volontaires ayant de bonnes performances à au moins une oreille. En effet, cette mesure nécessite un niveau de PDA supérieur à 6 dB (entre 4000 et 5000Hz). Un tel niveau n'est souvent plus atteint chez les personnes ayant un seuil auditif supérieur à 35 dB HL entre 4000 et 6000 Hz. Il s'agit de la principale raison expliquant la différence entre le nombre de volontaires ayant réalisé les mesures d'ATL ($n = 86$) par rapport à celui ayant réalisé les mesures du seuil du réflexe ($n = 79$).

Lors d'une étude précédente menée dans des conditions similaires chez des salariés du secteur de l'industrie et du BTP (Venet et al., 2014b), les variations des seuils auditifs et des seuils de déclenchement du réflexe acoustique étaient proches de celles obtenues dans cette étude, alors que l'exposition sonore moyenne des salariés ($L_{EX,8h} = 85,0 \pm 3,0$ dB(A)) était 2 dB(A) inférieure à celle mesurée chez les professionnels du secteur de la musique amplifiée ($L_{EX,8h} = 86,9 \pm 5,4$ dB(A)). La Δ ATL à 4000 Hz était de $5,0 \pm 4,9$ dB dans l'industrie par rapport à $4,7 \pm 6,6$ dB dans le secteur de la musique tandis que la Δ SRA était de $8,6 \pm 6,4$ dB dans l'industrie contre $6,7 \pm 3,9$ dB dans le secteur de la musique.

Quelles sont les différences qui pourraient expliquer ces degrés de fatigue équivalents malgré une exposition sonore plus élevée pour les professionnels du secteur de la musique?

Les périodes sans musique amplifiée représentaient 60% de la durée de travail du groupe Musique. Ces périodes entrecoupant la musique ont permis de réduire l'exposition sonore journalière d'environ 3 dB(A), mais elles ont également offert des périodes de récupération pour le système auditif. Cette configuration pourrait être un élément favorable pour les professionnels du secteur de la musique comparativement aux salariés d'ateliers industriels dans lesquels le bruit est généralement plus stable. L'alternance de périodes très bruyantes (musique amplifiée supérieure à 95 dB(A)) et de périodes calmes (proches de 70 dB(A)), très caractéristique des expositions sonores des professionnels du secteur de la musique amplifiée, pourrait contribuer à limiter la fatigue auditive à dose de bruit équivalente. D'ailleurs, cette hypothèse est confortée par les modélisations de la fatigue auditive. Même si, logiquement, l'énergie sonore (facteur 1) est la variable qui a le plus de poids sur la fatigue mesurée par Δ SRA ou Δ ATL, la stabilité de l'exposition sonore (facteur 3) entre systématiquement en jeu. Ainsi, une valeur élevée du facteur 3, ce qui correspond à de grandes différences des quantiles des $L_{eq,1s}$ (i.e. $L_{10} - L_{90}$ ou $L_{10} - L_{50}$), ou en d'autres termes, à une large distribution des $L_{eq,1s}$, réduit l'amplitude de la fatigue mesurée. L'instabilité de l'exposition sonore est donc un paramètre qui contribue à réduire la fatigue. Des périodes calmes, même de courtes durées, pourraient ainsi permettre une récupération partielle de la fatigue et limiter son accumulation en fin de journée de travail.

Dans l'article "Parameters influencing auditory fatigue among professionals working in the amplified music sector: noise exposure and individual factors", soumis à International Journal of Audiology, le jeu de données exploitées était un peu plus restreint que celui analysé dans ce travail de thèse. Dans cet article, le facteur 2 (dynamique audio large bande) est utilisé dans le modèle de Δ SRA à la place du facteur 3. Ce facteur indique que même l'instabilité audio limiterait la fatigue auditive. En d'autres termes, les contenus audio ayant beaucoup de dynamiques permettraient de limiter l'accumulation de la fatigue auditive. À l'inverse, les contenus peu dynamiques qui caractérisent la musique fortement compressée, très courante dans les musiques actuelles, tendent à augmenter la fatigue auditive (Vickers, 2010). Ces conclusions peuvent sembler en contradiction avec celles de Fuente et al., 2018, qui ont montré l'existence d'une corrélation positive entre le déficit auditif permanent à 6000 Hz et

le kurtosis audio dans un contexte de bruit industriel. Mais, dans l'article de Fuente et al., 2018, les valeurs de kurtosis élevées résultent de la présence de bruits impulsionnels dont l'intensité était très élevée. Or, ces bruits impulsionnels, tels que les bruits d'impact, sont reconnus pour leur nuisance élevée dans l'oreille interne et pour les pertes auditives définitives qu'ils provoquent (Henderson and Hamernik, 1986; Lie et al., 2016). Dans le cadre de ce travail de thèse, les bruits à caractère impulsionnel de hautes intensités étaient très rares, les niveaux de crête générés par la musique amplifiée étaient compris entre 120 et 125 dB(C). Le kurtosis audio était donc plus un indicateur de la dynamique de l'environnement sonore qu'un indicateur de danger lié aux bruits impulsionnels de fortes intensités.

Les performances auditives au repos jouent également sur la fatigue mesurée mais de manière différente selon l'examen réalisé pour le diagnostic. Pour la Δ ATL, un seuil auditif élevé à 2000 Hz est associé à une réduction de la fatigue mesurée à 4000 Hz. Les personnes ayant une mauvaise audition développeraient donc une moindre variation de seuil. L'effet est plus subtil si on utilise EchoScan. Comme pour l'audiométrie tonale, le seuil à 250 Hz est corrélé négativement à la fatigue auditive, mais les seuils auditifs au repos à 500 et 6000 Hz sont, quant à eux, positivement corrélés à la fatigue auditive. On constate alors que pour les personnes ayant des seuils équivalents à toutes les fréquences, ce qui est souvent le cas des sujets ayant une bonne audition, la somme de ces trois variables se compense et l'effet dans le modèle Δ SRA s'annule. En revanche, les personnes ayant une mauvaise audition, avec un scotome déjà bien élargi jusqu'à 500 Hz, sont associées à une augmentation de la fatigue mesurée par EchoScan. Cet effet n'est pas lié à un biais d'observation puisque les pertes auditives mesurées en moyennes et hautes fréquences en début de poste de travail sont indépendantes du niveau d'exposition sonore des volontaires. L'hypothèse d'une fatigue auditive accrue chez les personnes souffrant de pertes auditives a souvent été proposée, la revue de Holman et al., 2020 en témoigne. Toutefois, les preuves manquent encore et la fatigue auditive étudiée dans cette revue bibliographique est une fatigue centrale plutôt que périphérique.

Le sexe est l'une des variables du modèle de régression de la variation de seuil auditif à 4 kHz. Les femmes développeraient une moindre variation de seuil que les hommes à exposition équivalente (*Figure 34 : Variation du seuil auditif (Δ ATL) en fonction des groupes Musique ($n = 51$) et Témoin ($n = 31$). Barres d'erreur écart-types. Significativité intergroupe * $p < 0,05$; ***

$p < 0,01$; *** $p < 0,001$. Figure 34). Le fait que la variation du seuil de déclenchement du réflexe acoustique ne soit pas corrélée au sexe indique que le mécanisme mis en évidence par la corrélation de $\Delta\text{ATL}_{4\text{kHz}}$ se produit probablement sur des voies auditives empruntées par la perception sonore et non par celles impliquées dans le réflexe acoustique. Ces structures pourraient être les noyaux cochléaire dorsaux et les colliculus inférieurs ainsi que les structures avales du système nerveux central (Figure 7). Les structures impliquées pourraient également être les fibres à haut taux de décharge spontanée qui sont sollicitées lors des mesures au seuil auditif. La meilleure efficacité du système GABAergique lié au cycle ostrogénique pourrait être l'une des raisons expliquant cette différence entre hommes et femmes (Jiang et al., 2019; McEwen and Milner, 2017). La fonction inhibitrice, médiée par le GABA à différents niveaux des voies auditives, pourrait permettre une résilience accrue du système auditif chez les femmes.

Les mesures de récupération de la fatigue auditive ont montré qu'après plus de 12h de repos, la récupération fonctionnelle était complète. En revanche, environ 1h30 après la fin du concert, la récupération était importante bien qu'incomplète, notamment lorsque la mesure était effectuée par ECHOSCAN®. La cinétique de récupération de la fatigue semble néanmoins relativement rapide puisque la demi-vie de la ΔSRA est estimée à 36 minutes. Elle serait un peu moins rapide, de l'ordre de 50 minutes, pour ΔATL . Comme décrit précédemment, les mécanismes de la fatigue auditive sont nombreux et ils dépendent à la fois de l'intensité et de la durée de l'exposition. La récupération de la fatigue mesurée est donc une superposition de la restauration des fonctions altérées par ces différents mécanismes. Dans le cadre de cette étude, les mécanismes les plus longs, comme une excitotoxicité massive conduisant à une dégradation synaptique sous les CCI, ne sont sans doute pas impliqués dans la fatigue mesurée chez les volontaires du groupe Musique. En revanche, les mécanismes dont la cinétique est plus rapide tels que la régulation du potentiel endocochléaire (Thorne et al., 2004) ou la modulation du taux de décharge spontané des fibres afférentes (Costalupes et al., 1984; Furman et al., 2013; Kim et al., 2005) sont probablement engagés chez ces personnes.

Bien que la récupération fonctionnelle soit totale le lendemain de l'exposition sonore, des auteurs ont montré que, dans certaines situations, les pertes induites étaient masquées et pouvaient se révéler tardivement (Kujawa and Liberman, 2009; Viana et al., 2015; Wu et al., 2019). Chez les volontaires du groupe Musique, on ne peut donc pas écarter l'apparition de

dommages à plus long terme, dommages qui seraient la conséquence de l'accumulation de fatigue au cours du temps. Au regard des modèles de Δ SRA et Δ ATL ainsi que de la cinétique de récupération de la fatigue auditive, des "pauses calmes", dans un environnement sonore inférieur à 70 dB(A), seraient bénéfiques pour empêcher l'accumulation de fatigue auditive en fin de journée et réduire par là-même le risque auditif.

9.4 Prévention du risque auditif

Selon la littérature (Di Stadio et al., 2018; Trompette and Venet, 2020), les déficits auditifs des personnes exposées à de la musique (musiciens et techniciens) seraient inférieurs à ceux attendus, c'est-à-dire d'une amplitude moins importante que celle mesurée dans une population exposée à un bruit industriel de même énergie sonore. Cette comparaison avec l'exposition en milieu industriel est souvent prise comme référence, car cette population a été largement étudiée. C'est d'ailleurs en se référant à ce type d'exposition que les réglementations limitant le bruit au travail ont été définies. Dans le secteur de la musique, Axelsson et Lindgren (1981) ont proposé une valeur limite de 100 dB(A) durant 2 h au regard des variations temporaires du seuil d'audition. Cette dose de bruit correspond à une exposition journalière de 94 dB(A) si l'on se rapporte au principe d'équivalence énergétique sur lequel s'appuie la réglementation européenne. En se basant sur les recommandations du Swedish National Board of Health and Welfare, Kähäri et al. (2003) considèrent que, pour un même niveau de risque auditif, l'exposition sonore à de la musique amplifiée peut être 5 dB plus élevée que celui provoqué par un bruit industriel, ce qui les conduit à préconiser un niveau sonore maximal de 100 dB(A) pour un concert d'une heure. Ces recommandations doivent être considérées avec beaucoup de prudence. D'une part, les fatigues auditives importantes mesurées au cours de la présente étude l'ont été pour des niveaux d'expositions sonores souvent inférieurs à ceux des recommandations précédemment citées, d'autre part, l'ATL utilisée par ces auteurs n'est pas l'examen le plus sensible aux atteintes périphériques temporaires, comme le montrent les résultats de la présente étude.

Dans la population étudiée, les performances auditives des volontaires des groupes Musique et Témoin étaient équivalentes en début de poste de travail, et celles des sujets exclus n'étaient pas non plus significativement différentes des sujets inclus. Ce constat tendrait à confirmer que les professionnels exposés à de la musique amplifiée souffrent de pertes plus faibles que les niveaux d'exposition ne le laissent supposer. Cependant, cette conclusion doit

être nuancée par la comparaison des seuils auditifs du groupe Musique par rapport à ceux définis par la norme ISO 1999:2013 estimant les pertes auditives engendrées par une exposition à un bruit de type industriel. Cette comparaison montre que les courbes des déficits estimés par la norme sont très proches de ceux mesurés (cf. Figure 40). À 6000 Hz, le seuil auditif du groupe Musique est même plus élevé de 5 dB alors que la norme ISO 1999 est établie pour une exposition de 5 jours par semaine et que les professionnels sont en moyenne exposés 3 jours par semaine.

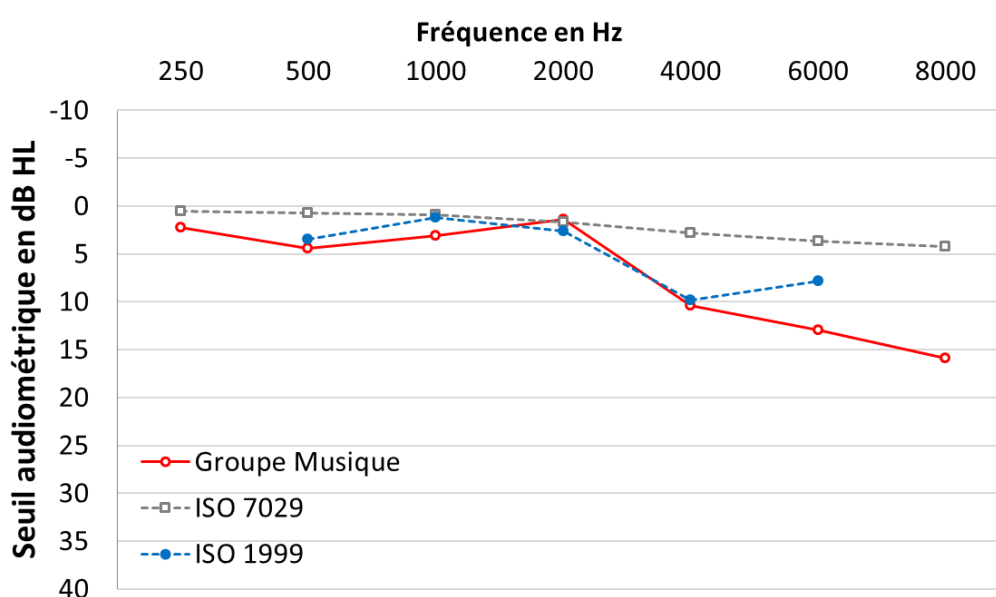


Figure 40 : Seuils auditifs au repos du groupe Musique comparé aux valeurs médianes des normes ISO 7029:2017 (homme de 36 ans non exposé au bruit) et ISO 1999:2013 (homme de 36 ans ayant une exposition professionnelle de 87 dB(A) durant 10 ans).

Néanmoins, pour expliquer les déficits auditifs plus faibles qu'attendus au regard des expositions sonores, certains auteurs mettent en avant le caractère intermittent de la musique par opposition au profil stable et continu d'un bruit industriel. Les durées d'exposition à de la musique sont entrecoupées de périodes calmes, ce qui permettrait une meilleure récupération de la fatigue, et donc une perte moindre à long terme (Axelsson and Lindgren, 1977; SAMELLI et al., 2012). Les modèles de fatigue auditive développés dans cette étude confirment cette hypothèse. En conséquence, ce résultat tend à promouvoir des pauses de récupération auditive dans des espaces calmes, c'est-à-dire dans des espaces où le niveau sonore est inférieur à 70 dB(A). Cependant, ces pauses auditives ne permettront pas à elles

seules de réduire le risque auditif pour les professionnels du secteur de la musique amplifiée. En effet, l'exposition à la musique ne représentait que 40% de la durée de travail et les niveaux sonores moyens mesurés sont très élevés pour le rap, le rock et le blues (95 dB(A)). La réduction des niveaux d'exposition sonore des professionnels s'avère également indispensable.

Si 90% des volontaires du groupe exposé à de la musique ont indiqué être conscients que leur activité engendrait un risque pour leur audition, le port de protecteurs restait malgré tout rare. En effet, moins de 5 % de ces volontaires n'ont porté que ponctuellement un PICB, et aucun n'en a porté systématiquement durant les phases de forte exposition à de la musique, alors que plus de la moitié déclarait être équipée de PICB. Ces pratiques observées sont sans doute représentatives de leur quotidien puisque les volontaires du groupe Musique ont jugé que l'exposition sonore à laquelle ils avaient été exposés durant la journée de mesure correspondait à une intensité sonore habituelle. Si l'on conçoit aisément que le port d'un PICB est peu compatible avec l'activité d'un technicien son, ce n'est pas le cas pour les autres métiers. Un large éventail de protecteurs adaptés aux différentes contraintes existent. On peut citer par exemple pour les techniciens lumière ou plateau qui travaillent sans liaison radio les bouchons moulés individuels équipés de filtre à atténuation uniforme qui permettent d'entendre l'environnement sonore sans trop de déformation. Pour les personnes travaillant avec une radio, des versions communicantes de casques ou de bouchons existent. Pour les barmen ou agents d'accueil se déplaçant de zones calmes à des zones bruyantes, des bouchons actifs restituant plus ou moins l'environnement sonore seraient bien adaptés.

Rappelons qu'en France l'employeur est responsable de la sécurité de ses employés et qu'il doit, à ce titre, les équiper de protections adéquates. Toutefois, dans le secteur de la musique, la proportion de travailleurs indépendants travaillant pour un grand nombre d'employeurs est importante et constitue un frein pour les actions de prévention. Ainsi, seulement 57% des volontaires du groupe Musique étaient équipés de PICB, dont la moitié les avaient achetés par leurs propres moyens, souvent par le biais d'opérations de prévention et de subvention réalisées par l'association AGI SON.

En plus des problèmes de pertes auditives, les résultats du questionnaire confirment la forte prévalence des acouphènes reportée dans la littérature (Barlow and Castilla-Sanchez, 2012; Halevi-Katz et al., 2015; Helena Mendes et al., 2007). Les conséquences de ces acouphènes

sont parfois dramatiques pour ces professionnels du secteur de la musique car ils peuvent conduire à une inaptitude au travail et à un arrêt de l'activité professionnelle, notamment chez les musiciens (Størmer et al., 2015b). Parmi le groupe des techniciens, 42% des professionnels étaient atteints d'acouphènes chroniques qu'ils percevaient même au repos. Pour le groupe non exposé, ils étaient 21%, ce qui est légèrement supérieur à la proportion de 15 à 20% de la population générale (Baguley et al., 2013; Halevi-Katz et al., 2015; Langguth et al., 2013). On rappelle que le groupe Témoin était constitué de personnes travaillant dans les établissements de spectacle (manager, agent culturel, personnel administratif...) qui n'étaient pas exposées à de la musique amplifiée le jour des mesures mais qui, au cours de leurs activités professionnelles passées ou présentes, pouvaient avoir été ou être exposées à de la musique amplifiée.

Les acouphènes aigus, c'est-à-dire apparaissant de manière temporaire à la suite d'une forte exposition sonore, étaient extrêmement fréquents chez les techniciens (67%), mais ces acouphènes n'étaient pas rapportés comme un problème auditif par ces personnes. Le caractère réversible de ces acouphènes conduit sans doute ces techniciens à en minimiser l'importance. Ils peuvent considérer ces acouphènes aigus comme une conséquence normale de leur activité professionnelle dans laquelle ils ne voient pas l'indication d'une souffrance de leur système auditif.

La fréquence d'épisodes d'hyperacousie (15% chez les techniciens) était plus faible que celle reportée dans les rares études ayant étudié cette question chez les professionnels du secteur de la musique amplifiée, à savoir Axelsson et al., 1995 et Kähäri et al., 2003 qui ont dénombré respectivement 20 et 39% de cas d'hyperacousie. La fréquence des distorsions auditives était de 10% parmi les techniciens alors que Kähäri et al., 2003, en avait dénombré une proportion supérieure chez des musiciens de rock ou de jazz (17%). Enfin, la diplacousie est un trouble dont l'occurrence est marginale puisque 2% des techniciens ont déclaré ce trouble contre 3% des musiciens de l'étude de Kähäri et al., 2003. En raison du handicap causé par l'ensemble de ces troubles pour continuer à exercer une profession dans le secteur de la musique, notamment pour les musiciens et techniciens du son, il est probable que la prévalence de ces pathologies soit sous-estimée lorsqu'on interroge des professionnels en activité. On peut également observer une forme de déni de la santé auditive dans le groupe Musique. En effet, parmi les 36 volontaires du groupe Musique ayant répondu non à la question « Pensez-vous

avoir des problèmes d'audition ? », 40 troubles auditifs ont pourtant été déclarés aux questions suivantes « souffrez-vous de ... ? », soit un taux de 111% tandis que dans le groupe Témoin ce taux n'était que de 24%. Finalement, seuls 21% des volontaires du groupe Musique n'ont déclaré aucun trouble auditif.

Seules trois relations significatives ont été trouvées entre les seuils auditifs mesurés au repos et les troubles auditifs déclarés : les seuils auditifs à 8000 Hz étaient plus élevés parmi les personnes ayant déclaré avoir un problème de perception dans le bruit, les seuils à 4000 Hz étaient plus élevés chez les personnes déclarant des acouphènes chroniques et les seuils à 250 Hz étaient plus faibles chez les personnes déclarant souffrir d'acouphènes post-exposition. Si l'ATL peut fournir quelques indices sur une probabilité de troubles auditifs autres que la perte auditive, cet examen ne permet pas un diagnostic de ces troubles. Il serait essentiel que ces troubles soient identifiés lors du suivi individuel de santé au travail au regard de la fréquence et des conséquences sur l'activité professionnelle de cette population. Les acouphènes chroniques, l'hyperacousie et les distorsions auditives devraient être des troubles auditifs pris en compte pour la prévention du risque auditif et la reconnaissance de maladie professionnelle dans le secteur de la musique. Cette recommandation se heurte cependant à un premier écueil : la production musicale et le secteur du spectacle, ne font pas partie des activités citées dans le tableau 42 "Atteinte auditive provoquée par les bruits lésionnels" du code de la sécurité sociale. À ce jour, les professionnels du secteur de la musique ne peuvent donc pas obtenir une reconnaissance de surdité professionnelle au titre du tableau 42. Cette reconnaissance par le tableau 42 doit être un préalable avant la prise en compte des autres troubles auditifs (acouphènes, hyperacousie).

Enfin, la formation des professionnels est un bon vecteur pour faire évoluer les pratiques, y compris en prévention. Aussi, est-il préoccupant de constater que parmi les trois volontaires du groupe Musique ayant répondu que leur activité professionnelle n'engendrait pas de risque pour leur audition, deux étaient de jeunes techniciens achevant leur formation. Pour avoir de bons professionnels qui pourront exercer durablement leur activité, il conviendrait donc d'insister davantage sur la prévention du risque auditif au cours de leur formation initiale, pour le public mais également pour leur propre santé.

10 Conclusion et perspectives

L'ensemble du travail de thèse a été intégré dans un projet mené à l'INRS ; ce projet impliquait deux partenaires faisant partie du réseau prévention du secteur du spectacle vivant : Thalie Santé, le service de santé au travail désigné par les organisations professionnelles du spectacle pour assurer le suivi des professionnels du spectacle au niveau national, et AGI-SON, une association reconnue pour son engagement dans la sensibilisation et la prévention des risques auditifs auprès des professionnels de la musique amplifiée. En accord avec les objectifs de l'INRS et de ses deux partenaires, le travail réalisé au cours de cette thèse avait pour finalité d'améliorer la prévention du risque auditif pour les salariés de ce secteur. Pour cela, il s'agissait de mieux comprendre les pratiques et d'étudier les relations de cause à effet entre les expositions sonores et les conséquences immédiates sur l'audition des travailleurs.

Parallèlement à ce travail, l'INRS a participé à l'écriture d'un guide de prévention du risque auditif à destination des salariés du secteur de la musique et du divertissement. Ce guide sera édité par la Direction Générale du Travail au cours de l'année 2022. En fournissant des données actuelles et objectives d'exposition et de fatigue auditive, les résultats obtenus dans cette thèse auront permis de nourrir ce guide pendant sa conception.

Cette étude confirme que l'intensité de l'exposition sonore des professionnels du secteur de la musique amplifiée est très élevée puisque près de la majorité des professionnels rencontrés était exposée à plus de 87 dB(A) : valeur limite réglementaire de l'exposition sonore journalière. Cependant, les intensités des expositions sonores mesurées pour différents genres musicaux sont, dans l'ensemble, plus faibles que celles reportées dans la bibliographie (Trompette and Venet, 2020). Les résultats de cette thèse mettent en évidence que l'exposition sonore est dépendante du genre musical, mais pas de la fonction occupée. Ainsi, tous les professionnels travaillant dans l'espace de diffusion de la musique amplifiée doivent être considérés comme des personnes dont l'audition est menacée, qu'ils concourent directement à la performance artistique ou qu'ils assurent des missions d'accueil, de sécurité ou de service.

À la fin de leur journée de travail, ces professionnels présentent une fatigue auditive avérée qui traduit la souffrance de leur système auditif. L'énergie sonore à laquelle ces professionnels

sont exposés est le principal facteur responsable de la fatigue auditive. Toutefois, la structure temporelle de l'exposition joue un rôle non négligeable. À niveau global équivalent, les ambiances sonores offrant une grande dynamique de niveaux permettent de réduire la fatigue tandis que celles qui sont peu dynamiques, c'est-à-dire ayant des niveaux stables, contribuent à augmenter la fatigue. Les modèles de la fatigue auditive réalisés dans ce travail de thèse confirment l'hypothèse, souvent émise, que l'instabilité des expositions sonores des professionnels exposés à de la musique permettrait de réduire le risque auditif par rapport à une exposition industrielle de même énergie. Enfin, la fatigue auditive est également corrélée aux seuils auditifs au repos. Par ailleurs, l'amplitude de la variation des seuils auditifs pourrait être liée au sexe : les femmes développeraient une moindre variation de seuil auditif à 4 kHz que les hommes. Néanmoins, afin de conforter cette dernière conclusion, le recueil de données supplémentaires chez des femmes exposées à plus de 87 dB(A) serait nécessaire.

Au regard des travaux réalisés durant cette thèse, quels sont les axes de prévention qui nécessiteraient d'être développés ?

Presque tous les professionnels rencontrés sont conscients que leur activité fait courir un risque à leur audition (perte auditive, acouphènes...). Malgré tout, le port de PICB est rare dans le secteur de la musique amplifiée alors que, pour de nombreuses fonctions, les protecteurs individuels sont tout à fait compatibles avec l'activité réalisée, y compris pour les musiciens. D'ailleurs, Mendes et al., 2007, a montré que plus de 40% des musiciens préféraient continuer à jouer avec des PICB après les avoir essayés durant 4 mois, notamment parce qu'ils avaient moins d'acouphènes. Bien que les solutions de prévention collective doivent être privilégiées par rapport aux solutions de prévention individuelle, les PICB restent un moyen efficace de réduire les risques encourus par les personnels contraints à des expositions sonores élevées. Leur utilisation doit être promue et leur accessibilité doit être renforcée car la plupart des intermittents ne sont pas équipés de PICB personnels et lorsqu'ils le sont, ils les ont le plus souvent financés eux-mêmes.

Les modèles de fatigue auditive développés au cours de ce travail de thèse confirment le fait que l'énergie sonore est le principal facteur responsable de la fatigue auditive. Cette fatigue peut néanmoins être réduite grâce à une grande dynamique des niveaux sonores, comme lors d'une alternance de périodes bruyantes et calmes. La prise de pauses dans une ambiance sonore dont l'intensité serait inférieure à 70 dB(A) permettrait de

réduire l'exposition sonore journalière, mais surtout elle offrirait des périodes de récupération et limiterait donc l'accumulation de fatigue auditive. Des zones calmes accessibles et bien identifiées permettraient aux techniciens d'accorder à leurs oreilles un temps de récupération dans de bonnes conditions. Une rotation des agents de sécurité entre différents postes très exposés (en salle) et plus calmes (aux abords de la salle), serait aussi un moyen d'aménager des pauses auditives au bénéfice de ces personnes. Des pauses fréquentes de courtes durées pourraient être efficaces, mais ces paramètres de fréquence et de durée devront être étudiés de manière plus approfondie pour optimiser la récupération et empêcher l'accumulation de fatigue, tout en étant objectivement applicables en situation de travail. C'est justement l'un des enjeux du projet ANR Fatigaudit qui a débuté en mai 2022 et auquel l'INRS participera en partenariat avec l'Institut de l'Audition à Paris ainsi que l'Institut des Neurosciences et le CHU de Montpellier jusqu'en 2027.

Les travaux réalisés au cours de cette thèse rappellent que les professionnels du secteur de la musique amplifiée sont une population dont l'audition court un risque. Une forte proportion de ces travailleurs développe des pertes auditives au cours de leur carrière, mais également d'autres troubles comme les acouphènes et l'hyperacousie. L'ensemble de ces effets a un impact important sur la qualité de vie et l'activité professionnelle, tout particulièrement pour les personnes dont les oreilles sont leur principal « outil de travail ». Pourtant, les activités du spectacle ne sont pas référencées dans le tableau 42 listant les travaux susceptibles d'engendrer des atteintes auditives provoquées par des bruits lésionnels. L'inscription des activités du spectacle au tableau 42, ainsi qu'une meilleure prise en compte des acouphènes et de l'hyperacousie dans le suivi médical de cette population, sont également des perspectives ouvertes par cette thèse.

11 Références bibliographiques

- Aibara, R., Welsh, J.T., Puria, S., Goode, R.L., 2001. Human middle-ear sound transfer function and cochlear input impedance. *Hear. Res.* 152, 100–109. [https://doi.org/10.1016/S0378-5955\(00\)00240-9](https://doi.org/10.1016/S0378-5955(00)00240-9)
- Amellya, D., Hajar Haryuna, T.S., Riawan, W., 2021. Correlation of signal to noise ratio (SNR) value on distortion product otoacoustic emission (DPOAE) and expression of nuclear factor erythroid 2-related factor 2 (NRF2) in cochlear organ of Corti in rat exposed to noise. *Med. Glas. Off. Publ. Med. Assoc. Zenica-Doboj Cant. Bosnia Herzeg.* 18, 102–106. <https://doi.org/10.17392/1292-21>
- Avan, P., Bonfils, P., Mom, T., 2001a. Correlations among Distortion Product Otoacoustic Emissions, Thresholds and Sensory Cell Impairments. *Noise Health* 3, 1–18.
- Avan, P., Bonfils, P., Mom, T., 2001b. Correlations among Distortion Product Otoacoustic Emissions, Thresholds and Sensory Cell Impairments. *Noise Health* 3, 1–18.
- Avan, P., Büki, B., Petit, C., 2013. Auditory Distortions: Origins and Functions. *Physiol. Rev.* 93, 1563–1619. <https://doi.org/10.1152/physrev.00029.2012>
- Axelsson, A., Eliasson, A., Israelsson, B., 1995. Hearing in pop/rock musicians: a follow-up study. *Ear Hear.* 16, 245–253.
- Axelsson, A., Lindgren, F., 1981. Pop music and hearing. *Ear Hear.*, testxx 2, 64–69.
- Axelsson, A., Lindgren, F., 1977. Factors Increasing the Risk for Hearing Loss in ‘POP’ Musicians. *Scand. Audiol.* 6, 127–131. <https://doi.org/10.3109/01050397709043112>
- Baguley, D., McFerran, D., Hall, D., 2013. Tinnitus. *The Lancet* 382, 1600–1607. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(13\)60142-7](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(13)60142-7)
- Barlow, C., Castilla-Sanchez, F., 2012. Occupational noise exposure and regulatory adherence in music venues in the United Kingdom. *Noise Health* 14, 86. <https://doi.org/10.4103/1463-1741.95137>
- Beavers, A.S., Lounsbury, J.W., Richards, J.K., Huck, S.W., Skolits, G.J., Esquivel, S.L., 2013. Practical Considerations for Using Exploratory Factor Analysis in Educational Research. *Pract. Assess. Res. Eval.* 18, 6.
- Bohne, B.A., Kenworthy, A., Carr, C.D., 1982. Density of myelinated nerve fibers in the chinchilla cochlea. *J. Acoust. Soc. Am.* 72, 102. <https://doi.org/10.1121/1.387994>
- Bonfils, P., Avan, P., Elbez, M., Deys, S., Erminy, M., François, M., 1994. Auditory Threshold Evaluation by Distortion-product Oto-acoustic Emissions Using Decision Support System. *Acta Otolaryngol. (Stockh.)* 114, 360–365. <https://doi.org/10.3109/00016489409126070>
- Brown, A.M., Harris, F.P., Beveridge, H.A., 1996. Two sources of acoustic distortion products from the human cochlea. *J. Acoust. Soc. Am.* 100, 3260–3267.
- Campo, P., Venet, T., Rumeau, C., Thomas, A., Rieger, B., Cour, C., Cosnier, F., Parietti-Winkler, C., 2011. Impact of noise or styrene exposure on the kinetics of presbycusis. *Hear. Res.* 280, 122–132. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2011.04.016>
- Campo, P., Venet, T., Thomas, A., Cour, C., Brochard, C., Cosnier, F., 2014. Neuropharmacological and cochleotoxic effects of styrene. Consequences on noise

- exposures. *Neurotoxicol. Teratol.* 44, 113–120.
<https://doi.org/10.1016/j.ntt.2014.05.009>
- Carreres Pons, M., Chalansonnet, M., Venet, T., Thomas, A., Nunge, H., Merlen, L., Cosnier, F., Llorens, J., Campo, P., 2017. Carbon disulfide potentiates the effects of impulse noise on the organ of Corti. *Neurotoxicology* 59, 79–87.
<https://doi.org/10.1016/j.neuro.2017.02.003>
- Caruel, E., Pardonnet, R., 1995. Mesurages de bruit dans une sale de type Zenith.
- Cavanaugh, J.W., 1989. Residential neighbors and outdoor concert facilities, are they compatible ? A case study of the Great Woods Center for the Performing Arts. Presented at the Congrès Inter-Noise INCE, pp. 767–772.
- Cederholm, J.M.E., Ryan, A.F., Housley, G.D., 2019. Onset kinetics of noise-induced purinergic adaptation of the ‘cochlear amplifier.’ *Purinergic Signal.* 15, 343–355.
<https://doi.org/10.1007/s11302-019-09648-3>
- Chen, C., Bobbin, R.P., 1998. P2X receptors in cochlear Deiters’ cells. *Br. J. Pharmacol.* 124, 337–344. <https://doi.org/10.1038/sj.bjp.0701848>
- Clark, W.W., 1991. Recent studies of temporary threshold shift (TTS) and permanent threshold shift (PTS) in animals. *J. Acoust. Soc. Am.* 90, 155–163.
<https://doi.org/10.1121/1.401309>
- Costalupes, J.A., Young, E.D., Gibson, D.J., 1984. Effects of continuous noise backgrounds on rate response of auditory nerve fibers in cat. *J. Neurophysiol.* 51, 1326–1344.
<https://doi.org/10.1152/jn.1984.51.6.1326>
- Davis, B., Qiu, W., Hamernik, R.P., 2004. The use of distortion product otoacoustic emissions in the estimation of hearing and sensory cell loss in noise-damaged cochleas. *Hear. Res.* 187, 12–24. [https://doi.org/10.1016/S0378-5955\(03\)00339-3](https://doi.org/10.1016/S0378-5955(03)00339-3)
- Davis, H., 1983. An active process in cochlear mechanics. *Hear. Res.* 9, 79–90.
[https://doi.org/10.1016/0378-5955\(83\)90136-3](https://doi.org/10.1016/0378-5955(83)90136-3)
- Dewey, J.B., Altoè, A., Shera, C.A., Applegate, B.E., Oghalai, J.S., 2021. Cochlear outer hair cell electromotility enhances organ of Corti motion on a cycle-by-cycle basis at high frequencies in vivo. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 118, e2025206118.
<https://doi.org/10.1073/pnas.2025206118>
- Di Stadio, A., Dipietro, L., Ricci, G., Della Volpe, A., Minni, A., Greco, A., de Vincentiis, M., Ralli, M., 2018. Hearing Loss, Tinnitus, Hyperacusis, and Diplacusis in Professional Musicians: A Systematic Review. *Int. J. Environ. Res. Public. Health* 15, 2120.
<https://doi.org/10.3390/ijerph15102120>
- Dibble, K., 1997. Low Frequency Noise Propagation from Modern Music Making. *J. Low Freq. Noise Vib. Act. Control* 16, 1–12. <https://doi.org/10.1177/026309239701600101>
- Directive, 2003. 2003/10/EC of the European Parliament and of the Council of 6 February 2003 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (noise).
- Dobie, R.A., Hemel, S.V., 2004. Assessment of the Auditory System and Its Functions, Hearing Loss: Determining Eligibility for Social Security Benefits. National Academies Press (US).
- Evans, M.G., 1996. Acetylcholine activates two currents in guinea-pig outer hair cells. *J. Physiol.* 491, 563–578.
- Fearn, R.W., 1993. Hearing Loss in Musicians. *J. Sound Vib.* 163, 372–378.
<https://doi.org/10.1006/jsvi.1993.1174>

- Fernandez, K.A., Guo, D., Micucci, S., De Gruttola, V., Liberman, M.C., Kujawa, S.G., 2020. Noise-induced Cochlear Synaptopathy with and Without Sensory Cell Loss. *Neuroscience* 427, 43–57. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2019.11.051>
- Fernandez, K.A., Jeffers, P.W.C., Lall, K., Liberman, M.C., Kujawa, S.G., 2015. Aging after noise exposure: acceleration of cochlear synaptopathy in “recovered” ears. *J. Neurosci. Off. J. Soc. Neurosci.* 35, 7509–7520. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5138-14.2015>
- Finlayson, P.G., Kaltenbach, J.A., 2009. Alterations in the spontaneous discharge patterns of single units in the dorsal cochlear nucleus following intense sound exposure. *Hear. Res.* 256, 104–117. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2009.07.006>
- Flock, Å., Strelieff, D., 1984. Graded and nonlinear mechanical properties of sensory hairs in the mammalian hearing organ. *Nature* 310, 597–599. <https://doi.org/10.1038/310597a0>
- Fuchs, P.A., Lauer, A.M., 2019. Efferent Inhibition of the Cochlea. *Cold Spring Harb. Perspect. Med.* 9, a033530. <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a033530>
- Fuente, A., Qiu, W., Zhang, M., Xie, H., Kardous, C.A., Campo, P., Morata, T.C., 2018a. Use of the kurtosis statistic in an evaluation of the effects of noise and solvent exposures on the hearing thresholds of workers: An exploratory study. *J. Acoust. Soc. Am.* 143, 1704–1710. <https://doi.org/10.1121/1.5028368>
- Fuente, A., Qiu, W., Zhang, M., Xie, H., Kardous, C.A., Campo, P., Morata, T.C., 2018b. Use of the kurtosis statistic in an evaluation of the effects of noise and solvent exposures on the hearing thresholds of workers: An exploratory study. *J. Acoust. Soc. Am.* 143, 1704–1710. <https://doi.org/10.1121/1.5028368>
- Furman, A.C., Kujawa, S.G., Liberman, M.C., 2013. Noise-induced cochlear neuropathy is selective for fibers with low spontaneous rates. *J. Neurophysiol.* 110, 577–586. <https://doi.org/10.1152/jn.00164.2013>
- Guinan, J.J., 2018. Olivocochlear Efferents: Their action, effects, measurement and uses, and the impact of the new conception of cochlear mechanical responses. *Hear. Res.* 362, 38–47. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2017.12.012>
- Halevi-Katz, D.N., Yaakobi, E., Putter-Katz, H., 2015. Exposure to music and noise-induced hearing loss (NIHL) among professional pop/rock/jazz musicians. *Noise Health* 17, 158. <https://doi.org/10.4103/1463-1741.155848>
- Harris, F.P., Lonsbury-Martin, B.L., Stagner, B.B., Coats, A.C., Martin, G.K., 1989. Acoustic distortion products in humans: systematic changes in amplitudes as a function of f2/f1 ratio. *J. Acoust. Soc. Am.* 85, 220–229. <https://doi.org/10.1121/1.397728>
- Helena Mendes, M., Catalani Morata, T., Mendes Marques, J., 2007. Acceptance of hearing protection aids in members of an instrumental and voice music band. *Braz. J. Otorhinolaryngol.* 73, 785–792. [https://doi.org/10.1016/S1808-8694\(15\)31175-7](https://doi.org/10.1016/S1808-8694(15)31175-7)
- Henderson, D., Hamernik, R.P., 1986. Impulse noise: Critical review. *J. Acoust. Soc. Am.* 80, 569–584. <https://doi.org/10.1121/1.394052>
- Hétu, R., 1982. Temporary threshold shift and the time pattern of noise exposure. *Can. Acoust. Assoc., Canadian acoustics* 10, 36–44.
- Hickman, T.T., Hashimoto, K., Liberman, L.D., Liberman, M.C., 2020. Synaptic migration and reorganization after noise exposure suggests regeneration in a mature mammalian cochlea. *Sci. Rep.* 10, 19945. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76553-w>
- Holman, J.A., Drummond, A., Naylor, G., 2020. The Effect of Hearing Loss and Hearing Device Fitting on Fatigue in Adults: A Systematic Review. *Ear Hear.* 42, 1–11. <https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000000909>

- Housley, G.D., Morton-Jones, R., Vljakovic, S.M., Telang, R.S., Paramananthasivam, V., Tadros, S.F., Wong, A.C.Y., Froud, K.E., Cederholm, J.M.E., Sivakumaran, Y., Snguanwongchai, P., Khakh, B.S., Cockayne, D.A., Thorne, P.R., Ryan, A.F., 2013. ATP-gated ion channels mediate adaptation to elevated sound levels. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 110, 7494–7499. <https://doi.org/10.1073/pnas.1222295110>
- ISO 1999:2013, 2013. Acoustique - Estimation du dommage auditif induit par le bruit.
- ISO 7029:2017, 2017. ISO 7029:2017 - Acoustique -- Distribution statistique des seuils d'audition en fonction de l'âge et du sexe.
- ISO 8253-1:2010, 2010. Acoustique — Méthodes d'essais audiométriques — Partie 1: Audiométrie à sons purs en conduction aérienne et en conduction osseuse.
- Jäger, W., Goiny, M., Herrera-Marschitz, M., Brundin, L., Fransson, A., Canlon, B., 2000. Noise-induced aspartate and glutamate efflux in the guinea pig cochlea and hearing loss. *Exp. Brain Res.* 134, 426–434.
- Jiang, Y., Babic, T., Travagli, R.A., 2019. Sex differences in GABAergic neurotransmission to rat DMV neurons. *Am. J. Physiol.-Gastrointest. Liver Physiol.* 317, G476–G483. <https://doi.org/10.1152/ajpgi.00112.2019>
- Kähäri, K., Zachau, G., Eklöf, M., Sandsjö, L., Möller, C., 2003. Assessment of hearing and hearing disorders in rock/jazz musicians: Evaluación de la audición y de los problemas auditivos en músicos de rock y jazz. *Int. J. Audiol.* 42, 279–288. <https://doi.org/10.3109/14992020309078347>
- Kaltenbach, J.A., Zhang, J., 2007a. Intense sound-induced plasticity in the dorsal cochlear nucleus of rats: Evidence for cholinergic receptor upregulation. *Hear. Res.* 226, 232–243. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2006.07.001>
- Kaltenbach, J.A., Zhang, J., 2007b. Intense sound-induced plasticity in the dorsal cochlear nucleus of rats: Evidence for cholinergic receptor upregulation. *Hear. Res.* 226, 232–243. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2006.07.001>
- Kaltenbach, J.A., Zhang, J., Afman, C.E., 2000. Plasticity of spontaneous neural activity in the dorsal cochlear nucleus after intense sound exposure. *Hear. Res.* 147, 282–292. [https://doi.org/10.1016/S0378-5955\(00\)00138-6](https://doi.org/10.1016/S0378-5955(00)00138-6)
- Keefe, D.H., Bulen, J.C., Arehart, K.H., Burns, E.M., 1993. Ear-canal impedance and reflection coefficient in human infants and adults. *J. Acoust. Soc. Am.* 94, 2617–2638. <https://doi.org/10.1121/1.407347>
- Kemp, D.T., 1978. Stimulated acoustic emissions from within the human auditory system. *J. Acoust. Soc. Am.* 64, 1386–1391. <https://doi.org/10.1121/1.382104>
- Kim, J.S., Nam, E.-C., Park, S.I., 2005. Electrocochleography is More Sensitive than Distortion-Product Otoacoustic Emission Test for Detecting Noise-Induced Temporary Threshold Shift. *Otolaryngol. Neck Surg.* 133, 619–624. <https://doi.org/10.1016/j.otohns.2005.06.012>
- Kobel, M., Le Prell, C.G., Liu, J., Hawks, J.W., Bao, J., 2016. Noise-induced cochlear synaptopathy: Past findings and future studies. *Hear. Res.* <https://doi.org/10.1016/j.heares.2016.12.008>
- Kujawa, S.G., Liberman, M.C., 2009. Adding Insult to Injury: Cochlear Nerve Degeneration after “Temporary” Noise-Induced Hearing Loss. *J. Neurosci.* 29, 14077–14085. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2845-09.2009>
- Langguth, B., Kreuzer, P.M., Kleinjung, T., De Ridder, D., 2013. Tinnitus: causes and clinical management. *Lancet Neurol.* 12, 920–930. [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(13\)70160-1](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(13)70160-1)

- Legendre, K., Petit, C., El-Amraoui, A., 2009. La cellule ciliée externe de la cochlée des mammifères - Un amplificateur aux propriétés exceptionnelles. *médecine/sciences* 25, 117–120. <https://doi.org/10.1051/medsci/2009252117>
- Lewis, R.S., Hudspeth, A.J., 1983. Voltage- and ion-dependent conductances in solitary vertebrate hair cells. *Nature* 304, 538–541. <https://doi.org/10.1038/304538a0>
- Liberman, L.D., Wang, H., Liberman, M.C., 2011. Opposing gradients of ribbon size and AMPA receptor expression underlie sensitivity differences among cochlear-nerve/hair-cell synapses. *J. Neurosci. Off. J. Soc. Neurosci.* 31, 801–808. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3389-10.2011>
- Liberman, M.C., 1988. Physiology of cochlear efferent and afferent neurons: direct comparisons in the same animal. *Hear. Res.* 34, 179–191. [https://doi.org/10.1016/0378-5955\(88\)90105-0](https://doi.org/10.1016/0378-5955(88)90105-0)
- Liberman, M.C., 1987. Chronic ultrastructural changes in acoustic trauma: Serial-section reconstruction of stereocilia and cuticular plates. *Hear. Res.* 26, 65–88. [https://doi.org/10.1016/0378-5955\(87\)90036-0](https://doi.org/10.1016/0378-5955(87)90036-0)
- Liberman, M.C., 1980. Morphological differences among radial afferent fibers in the cat cochlea: An electron-microscopic study of serial sections. *Hear. Res.* 3, 45–63. [https://doi.org/10.1016/0378-5955\(80\)90007-6](https://doi.org/10.1016/0378-5955(80)90007-6)
- Liberman, M.C., 1978. Auditory-nerve response from cats raised in a low-noise chamber. *J. Acoust. Soc. Am.* 63, 442–455. <https://doi.org/10.1121/1.381736>
- Liberman, M.C., Dodds, L.W., 1987. Acute ultrastructural changes in acoustic trauma: Serial-section reconstruction of stereocilia and cuticular plates. *Hear. Res.* 26, 45–64. [https://doi.org/10.1016/0378-5955\(87\)90035-9](https://doi.org/10.1016/0378-5955(87)90035-9)
- Liberman, M.C., Dodds, L.W., 1984. Single-neuron labeling and chronic cochlear pathology. III. Stereocilia damage and alterations of threshold tuning curves. *Hear. Res.* 16, 55–74. [https://doi.org/10.1016/0378-5955\(84\)90025-X](https://doi.org/10.1016/0378-5955(84)90025-X)
- Liberman, M.C., Dodds, L.W., Pierce, S., 1990. Afferent and efferent innervation of the cat cochlea: quantitative analysis with light and electron microscopy. *J. Comp. Neurol.* 301, 443–460. <https://doi.org/10.1002/cne.903010309>
- Liberman, M.C., Guinan, J.J., 1998. Feedback control of the auditory periphery: anti-masking effects of middle ear muscles vs. olivocochlear efferents. *J. Commun. Disord.* 31, 471–482; quiz 483; 553.
- Liberman, M.C., Kujawa, S.G., 2017. Cochlear synaptopathy in acquired sensorineural hearing loss: Manifestations and mechanisms. *Hear. Res.* <https://doi.org/10.1016/j.heares.2017.01.003>
- Lie, A., Skogstad, M., Johannessen, H.A., Tynes, T., Mehlum, I.S., Nordby, K.-C., Engdahl, B., Tambs, K., 2016. Occupational noise exposure and hearing: a systematic review. *Int. Arch. Occup. Environ. Health* 89, 351–372. <https://doi.org/10.1007/s00420-015-1083-5>
- Lin, H.W., Furman, A.C., Kujawa, S.G., Liberman, M.C., 2011a. Primary neural degeneration in the Guinea pig cochlea after reversible noise-induced threshold shift. *J. Assoc. Res. Otolaryngol. JARO* 12, 605–616. <https://doi.org/10.1007/s10162-011-0277-0>
- Lin, H.W., Furman, A.C., Kujawa, S.G., Liberman, M.C., 2011b. Primary Neural Degeneration in the Guinea Pig Cochlea After Reversible Noise-Induced Threshold Shift. *JARO J. Assoc. Res. Otolaryngol.* 12, 605–616. <https://doi.org/10.1007/s10162-011-0277-0>

- McEwen, B.S., Milner, T.A., 2017. Understanding the broad influence of sex hormones and sex differences in the brain: Sex Hormones Affect the Whole Brain. *J. Neurosci. Res.* 95, 24–39. <https://doi.org/10.1002/jnr.23809>
- Mills, J.H., Gengel, R.W., Watson, C.S., Miller, J.D., 1970. Temporary Changes of the Auditory System due to Exposure to Noise for One or Two Days. *J. Acoust. Soc. Am.* 48, 524–530. <https://doi.org/10.1121/1.1912167>
- Mulders, W.H. a. M., Robertson, D., 2013. Development of hyperactivity after acoustic trauma in the guinea pig inferior colliculus. *Hear. Res.* 298, 104–108. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2012.12.008>
- Mulders, W.H.A.M., Robertson, D., 2013. Development of hyperactivity after acoustic trauma in the guinea pig inferior colliculus. *Hear. Res.* 298, 104–108. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2012.12.008>
- Muñoz, D.J.B., Thorne, P.R., Housley, G.D., Billett, T.E., Battersby, J.M., 1995. Extracellular adenosine 5'-triphosphate (ATP) in the endolymphatic compartment influences cochlear function. *Hear. Res.* 90, 106–118. [https://doi.org/10.1016/0378-5955\(95\)00152-3](https://doi.org/10.1016/0378-5955(95)00152-3)
- NF EN ISO 9612 - Acoustique - Détermination de l'exposition au bruit en milieu de travail - Méthode d'expertise, 2009.
- NF ISO 226:2003, n.d. Lignes isosoniques normales.
- Nieder, P., Nieder, I., 1970. Stimulation of efferent olivocochlear bundle causes release from low level masking. *Nature* 227, 184–185. <https://doi.org/10.1038/227184a0>
- Nordmann, A.S., Bohne, B.A., Harding, G.W., 2000. Histopathological differences between temporary and permanent threshold shift11A portion of this study formed the basis of a pre-doctoral M.A. thesis in Biological Sciences, Washington University School of Medicine (A.S.N.). This study was presented in part at the 22nd Midwinter Research Meeting of the Association for Research in Otolaryngology, February 1999. *Hear. Res.* 139, 13–30. [https://doi.org/10.1016/S0378-5955\(99\)00163-X](https://doi.org/10.1016/S0378-5955(99)00163-X)
- Noreña, A.J., Eggermont, J.J., 2003. Changes in spontaneous neural activity immediately after an acoustic trauma: implications for neural correlates of tinnitus. *Hear. Res.* 183, 137–153. [https://doi.org/10.1016/S0378-5955\(03\)00225-9](https://doi.org/10.1016/S0378-5955(03)00225-9)
- Observatoire des métiers du spectacle vivant, 2018. Tableau de bord statistique : Les employeurs et l'emploi dans le spectacle vivant.
- Ono, M., Ito, T., 2018. Inhibitory Neural Circuits in the Mammalian Auditory Midbrain. *J. Exp. Neurosci.* 12, 1179069518818230. <https://doi.org/10.1177/1179069518818230>
- Pack, A., Relkin, E., Macrae, T.H., Slepecky, N., 1998. Changes in distribution of tubulin isoforms in the organ of corti following a sound exposure that causes protection from loud noise. *Mol. Biol. Cell* 9Suppl 272.
- Patuzzi, R., 1998. Exponential onset and recovery of temporary threshold shift after loud sound: evidence for long-term inactivation of mechano-electrical transduction channels. *Hear. Res.* 125, 17–38. [https://doi.org/10.1016/s0378-5955\(98\)00126-9](https://doi.org/10.1016/s0378-5955(98)00126-9)
- Pickles, J.O., 2015. Chapter 1 - Auditory pathways: anatomy and physiology, in: Aminoff, M.J., Boller, F., Swaab, D.F. (Eds.), *Handbook of Clinical Neurology, The Human Auditory System*. Elsevier, pp. 3–25. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-62630-1.00001-9>
- Pouyatos, B., Campo, P., Lataye, R., 2002. Use of DPOAEs for assessing hearing loss caused by styrene in the rat. *Hear. Res.* 165, 156–164. [https://doi.org/10.1016/S0378-5955\(02\)00298-8](https://doi.org/10.1016/S0378-5955(02)00298-8)

- Prabhu, P., Divyashree, K.N., Neeraja, R., Akhilandeshwari, S., 2015. Effect of Contralateral Noise on Acoustic Reflex Latency Measures. *J. Int. Adv. Otol.* 11, 243–247. <https://doi.org/10.5152/iao.2015.1583>
- Puel, C, G. d'Aldin, M, E., R, P., Saffiedine, 1995. Synaptic regeneration and functional recovery after excitotoxic injury in the guinea pig cochlea. *C. R. Acad. Sci. III* 318, 67–75.
- Puel, J.-L., Pujol, R., Tribillac, F., Ladrech, S., Eybalin, M., 1994. Excitatory amino acid antagonists protect cochlear auditory neurons from excitotoxicity. *J. Comp. Neurol.* 341, 241–256. <https://doi.org/10.1002/cne.903410209>
- Puel, J.-L., Ruel, J., d'Aldin, C.G., Pujol, R., 1998. Excitotoxicity and repair of cochlear synapses after noise-trauma induced hearing loss. *NeuroReport* 9, 2109–2114.
- Pujol, R., 1991. Sensitive Development Period and Acoustic Trauma : Facts and Hypothesis. *Noiseinduced Hear. Loss* 196–203.
- Pujol, R., Lenoir, M., 1986. The four types of synapses in the organ of corti. *Altschuler R R P Bobbin W Hoffman Ed Neurobiol. Hear.* 490161–172.
- Pujol, R., Lenoir, M., Robertson, D., Eybalin, M., Johnstone, B.M., 1985. Kainic acid selectively alters auditory dendrites connected with cochlear inner hair cells. *Hear. Res.* 18, 145–151. [https://doi.org/10.1016/0378-5955\(85\)90006-1](https://doi.org/10.1016/0378-5955(85)90006-1)
- Pujol, R., Puel, J.-L., D'aldin, C.G., Eybalin, M., 1993. Pathophysiology of the Glutamatergic Synapses in the Cochlea. *Acta Otolaryngol. (Stockh.)* 113, 330–334. <https://doi.org/10.3109/00016489309135819>
- Qiu, W., 2020. Kurtosis: A New Tool for Noise Analysis. *Acoust. Today* 16, 39. <https://doi.org/10.1121/AT.2020.16.4.39>
- Qiu, W., Hamernik, R.P., Davis, R.I., 2013. The value of a kurtosis metric in estimating the hazard to hearing of complex industrial noise exposures. *J. Acoust. Soc. Am.* 133, 2856–2866. <https://doi.org/10.1121/1.4799813>
- Rabbitt, R.D., Brownell, W.E., 2011. EFFERENT MODULATION OF HAIR CELL FUNCTION. *Curr. Opin. Otolaryngol. Head Neck Surg.* 19, 376–381. <https://doi.org/10.1097/MOO.0b013e32834a5be1>
- Rajan, R., 1988. Effect of electrical stimulation of the crossed olivocochlear bundle on temporary threshold shifts in auditory sensitivity. I. Dependence on electrical stimulation parameters. *J. Neurophysiol.* <https://doi.org/10.1152/jn.1988.60.2.549>
- Ramakrishnan, N.A., Drescher, M.J., Drescher, D.G., 2009. Direct Interaction of Otoferlin with Syntaxin 1A, SNAP-25, and the L-type Voltage-gated Calcium Channel CaV1.3. *J. Biol. Chem.* 284, 1364–1372. <https://doi.org/10.1074/jbc.M803605200>
- Reichenbach, T., Stefanovic, A., Nin, F., Hudspeth, A.J., 2012. Waves on Reissner's Membrane: A Mechanism for the Propagation of Otoacoustic Emissions from the Cochlea. *Cell Rep.* 1, 374–384. <https://doi.org/10.1016/j.celrep.2012.02.013>
- Reiter, E.R., Liberman, M.C., 1995. Efferent-mediated protection from acoustic overexposure: relation to slow effects of olivocochlear stimulation. *J. Neurophysiol.* 73, 506–514. <https://doi.org/10.1152/jn.1995.73.2.506>
- Robertson, D., 1983. Functional significance of dendritic swelling after loud sounds in the guinea pig cochlea. *Hear. Res.* 9, 263–278. [https://doi.org/10.1016/0378-5955\(83\)90031-X](https://doi.org/10.1016/0378-5955(83)90031-X)
- Robles, L., Ruggero, M.A., 2001. Mechanics of the mammalian cochlea. *Physiol. Rev.* 81, 1305–1352.

- Rossi, G., Solero, P., 2009. Acoustic Reflex Patterns According to Different Intensity and Different Duration of White Noise (WN) Stimuli. *Acta Otolaryngol. (Stockh.)*. <https://doi.org/10.3109/00016488309139451>
- Ruel, J., Chen, C., Pujol, R., Bobbin, R.P., Puel, J.L., 1999. AMPA-preferring glutamate receptors in cochlear physiology of adult guinea-pig. *J. Physiol.* 518, 667–680. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7793.1999.0667p.x>
- SAMELLI, Alessandra G., MATAS, C.G., CARVALLO, R.M.M., GOMES, R.F., BEIJA, C.S. de, MAGLIARO, F.C.L., RABELO, C.M., 2012. Audiological and electrophysiological assessment of professional pop/rock musicians. *NOISE Health* 14, 6–12.
- Sergeyenko, Y., Lall, K., Liberman, M.C., Kujawa, S.G., 2013. Age-related cochlear synaptopathy: an early-onset contributor to auditory functional decline. *J. Neurosci. Off. J. Soc. Neurosci.* 33, 13686–13694. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1783-13.2013>
- Shera, C.A., Guinan, J.J., 1999. Evoked otoacoustic emissions arise by two fundamentally different mechanisms: a taxonomy for mammalian OAEs. *J. Acoust. Soc. Am.* 105, 782–798. <https://doi.org/10.1121/1.426948>
- Shi, L., Liu, K., Wang, H., Zhang, Y., Hong, Z., Wang, M., Wang, X., Jiang, X., Yang, S., 2015. Noise induced reversible changes of cochlear ribbon synapses contribute to temporary hearing loss in mice. *Acta Otolaryngol. (Stockh.)* 135, 1093–1102. <https://doi.org/10.3109/00016489.2015.1061699>
- Shi, L., Liu, L., He, T., Guo, X., Yu, Z., Yin, S., Wang, J., 2013. Ribbon synapse plasticity in the cochleae of Guinea pigs after noise-induced silent damage. *PloS One* 8, e81566. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0081566>
- Stamatakis, S., Francis, H.W., Lehar, M., May, B.J., Ryugo, D.K., 2006. Synaptic alterations at inner hair cells precede spiral ganglion cell loss in aging C57BL/6J mice. *Hear. Res.* 221, 104–118. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2006.07.014>
- Størmer, C.L., Laukli, E., Høydal, E., Stenklev, N., 2015a. Hearing loss and tinnitus in rock musicians: A Norwegian survey. *Noise Health* 17, 411. <https://doi.org/10.4103/1463-1741.169708>
- Størmer, C.L., Laukli, E., Høydal, E., Stenklev, N., 2015b. Hearing loss and tinnitus in rock musicians: A Norwegian survey. *Noise Health* 17, 411. <https://doi.org/10.4103/1463-1741.169708>
- Su, E., Leung, J.H., Morton, R.P., Dickinson, L.J., Vandal, A.C., Balisa, N.B., Purdy, S.C., 2021. Feasibility of a hearing screening programme using DPOAEs in 3-year-old children in South Auckland. *Int. J. Pediatr. Otorhinolaryngol.* 141, 110510. <https://doi.org/10.1016/j.ijporl.2020.110510>
- Suhr, D.D., 2006. Exploratory or confirmatory factor analysis?
- Syka, J., 2002. Plastic changes in the central auditory system after hearing loss, restoration of function, and during learning. *Physiol. Rev.* 82, 601–636. <https://doi.org/10.1152/physrev.00002.2002>
- Szydlowska, K., Tymianski, M., 2010. Calcium, ischemia and excitotoxicity. *Cell Calcium, Calcium and Neurological Diseases* 47, 122–129. <https://doi.org/10.1016/j.ceca.2010.01.003>
- Thorne, P.R., Muñoz, D.J.B., Housley, G.D., 2004. Purinergic Modulation of Cochlear Partition Resistance and Its Effect on the Endocochlear Potential in the Guinea Pig. *JARO J. Assoc. Res. Otolaryngol.* 5, 58–65. <https://doi.org/10.1007/s10162-003-4003-4>

- Tolomeo, J.A., Holley, M.C., 1997. Mechanics of microtubule bundles in pillar cells from the inner ear. *Biophys. J.* 73, 2241–2247.
- Tonndorf, J., 1980. Acute Cochlear Disorders: The Combination of Hearing Loss, Recruitment, Poor Speech Discrimination, and Tinnitus. *Ann. Otol. Rhinol. Laryngol.* 89, 353–358. <https://doi.org/10.1177/000348948008900411>
- Trompette, N., Venet, T., 2020. Exposition sonore et risque auditif pour les professionnels de la musique et du son : revue bibliographique - Publication scientifique - INRS (Note scientifique INRS No. NS 370).
- Ulfendahl, M., 1997. Mechanical responses of the mammalian cochlea. *Prog. Neurobiol.* 53, 331–380. [https://doi.org/10.1016/S0301-0082\(97\)00040-3](https://doi.org/10.1016/S0301-0082(97)00040-3)
- Ulualp, S.O., Biswal, B.B., Yetkin, F.Z., Kidder, T.M., 2016. Assessment of auditory cortex activation with functional magnetic resonance imaging: *Otolaryngol. Neck Surg.* [https://doi.org/10.1016/S0194-5998\(00\)70247-6](https://doi.org/10.1016/S0194-5998(00)70247-6)
- Venet, T., Bey, A., Ducourneau, J., Mifsud, Q., Hoffmann, C., Thomas, A., Mouzé-Amady, M., Parietti-Winkler, C., 2018. Auditory fatigue among call dispatchers working with headsets. *Int. J. Occup. Med. Environ. Health.* <https://doi.org/10.13075/ijomeh.1896.01131>
- Venet, T., Campo, P., Rumeau, C., Eluecque, H., Parietti-Winkler, C., 2012. EchoScan: A new system to objectively assess peripheral hearing disorders. *Noise Health* 14, 253. <https://doi.org/10.4103/1463-1741.102964>
- Venet, T., Campo, P., Rumeau, C., Thomas, A., Parietti-Winkler, C., 2014a. One-day measurement to assess the auditory risks encountered by noise-exposed workers. *Int. J. Audiol.* 53, 737–744. <https://doi.org/10.3109/14992027.2014.913210>
- Venet, T., Campo, P., Rumeau, C., Thomas, A., Parietti-Winkler, C., 2014b. One-day measurement to assess the auditory risks encountered by noise-exposed workers. *Int. J. Audiol.* 53, 737–744. <https://doi.org/10.3109/14992027.2014.913210>
- Venet, T., Rumeau, C., Campo, P., Rieger, B., Thomas, A., Cour, C., 2011. Neuronal circuits involved in the middle-ear acoustic reflex. *Toxicol. Sci. Off. J. Soc. Toxicol.* 119, 146–155. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfq312>
- Venet, T., Thomas, A., Wathier, L., Pouyatos, B., 2021. DPOAEs for the Assessment of Noise- or Toxicant-Induced Cochlear Damage in the Rat, in: Llorens, J., Barenys, M. (Eds.), *Experimental Neurotoxicology Methods, Neuromethods*. Springer US, New York, NY, pp. 91–108. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1637-6_5
- Viana, L.M., O'Malley, J.T., Burgess, B.J., Jones, D.D., Oliveira, C.A.C.P., Santos, F., Merchant, S.N., Liberman, L.D., Liberman, M.C., 2015. Cochlear neuropathy in human presbycusis: Confocal analysis of hidden hearing loss in post-mortem tissue. *Hear. Res.* 327, 78–88. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2015.04.014>
- Vickers, E., 2010. The Loudness War: Background, Speculation and Recommendations. *J. Audio Eng. Soc.* 27.
- Wang, J.C.-C., Raybould, N.P., Luo, L., Ryan, A.F., Cannell, M.B., Thorne, P.R., Housley, G.D., 2003. Noise induces up-regulation of P2X2 receptor subunit of ATP-gated ion channels in the rat cochlea. *NeuroReport* 14, 817–823.
- Wang, Y., Hirose, K., Liberman, M.C., 2002. Dynamics of noise-induced cellular injury and repair in the mouse cochlea. *J. Assoc. Res. Otolaryngol. JARO* 3, 248–268. <https://doi.org/10.1007/s101620020028>
- Ward, W.D., 1970. Temporary threshold shift and damage-risk criteria for intermittent noise exposures. *J. Acoust. Soc. Am.* 48, 561–574. <https://doi.org/10.1121/1.1912172>

- Weiss, T.F., Leong, R., 1985. A model for signal transmission in an ear having hair cells with free-standing stereocilia. IV. Mechanoelectric transduction stage. *Hear. Res.* 20, 175–195. [https://doi.org/10.1016/0378-5955\(85\)90167-4](https://doi.org/10.1016/0378-5955(85)90167-4)
- Weisz, C., Glowatzki, E., Fuchs, P., 2009. The postsynaptic function of type II cochlear afferents. *Nature* 461, 1126–1129. <https://doi.org/10.1038/nature08487>
- Werner, L.A., Levi, E.C., Keefe, D.H., 2010. Ear-Canal Wideband Acoustic Transfer Functions of Adults and Two- to Nine-Month-Old Infants. *Ear Hear.* 31, 587–598. <https://doi.org/10.1097/AUD.0b013e3181e0381d>
- White, J.S., Warr, W.B., 1983. The dual origins of the olivocochlear bundle in the albino rat. *J. Comp. Neurol.* 219, 203–214. <https://doi.org/10.1002/cne.902190206>
- Wilson, R.H., McBride, L.M., 1978. Threshold and growth of the acoustic reflex. *J. Acoust. Soc. Am.* 63, 147–154. <https://doi.org/10.1121/1.381706>
- Winter, I.M., Robertson, D., Yates, G.K., 1990. Diversity of characteristic frequency rate-intensity functions in guinea pig auditory nerve fibres. *Hear. Res.* 45, 191–202. [https://doi.org/10.1016/0378-5955\(90\)90120-e](https://doi.org/10.1016/0378-5955(90)90120-e)
- Wu, P.Z., Liberman, L.D., Bennett, K., de Gruttola, V., O'Malley, J.T., Liberman, M.C., 2019. Primary Neural Degeneration in the Human Cochlea: Evidence for Hidden Hearing Loss in the Aging Ear. *Neuroscience, Hearing Loss, Tinnitus, Hyperacusis, Central Gain* 407, 8–20. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2018.07.053>

12 Annexes

Annexe 1 : Lettre d'information aux volontaires _____	pg 149
Annexe 2 : Questionnaire d'inclusion des volontaires _____	pg 153
Annexe 3 : Table des variables issues de l'analyse de l'exposition sonore _____	pg 157
Annexe 4 : Exemples de kurtosis calculés sur le signal audio ou sur des Leq _____	pg 165
Annexe 5 : Venet, T., Thomas, A., Wathier, L., Pouyatos, B., 2021. DPOAEs for the Assessment of Noise- or Toxicant-Induced Cochlear Damage in the Rat. In J. Llorens & M. Barenys, eds. Experimental Neurotoxicology Methods. Neuromethods. New York, NY: Springer US, pp. 91–108. DOI: 10.1007/978-1-0716-1637-6_5 _____	pg 169
Annexe 6 : Venet T., Thomas A., Merlen L., Boucard S., Wathier L., Remy A., Pouyatos B. Parameters influencing auditory fatigue among professionals working in the amplified music sector: noise exposure and individual factors. International Journal of Audiology ; peer review 22/4/2022. _____	pg 189

Annexe 1 : Lettre d'information aux volontaires

LETTRE D'INFORMATION AUX PARTICIPANTS

Lisez attentivement cette notice et posez toutes les questions qui vous sembleront utiles.
Vous pourrez alors décider si vous voulez participer à cette recherche ou non.

« Evaluation de la fatigue auditive chez les professionnels exposés à la musique amplifiée »

Nom du Promoteur : Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS)

Adresse du promoteur : 1 rue du Morvan, CS 60027, 54519 Vandœuvre les Nancy cedex

L'INRS est un organisme généraliste en santé et sécurité au travail, qui a pour mission la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles. L'un de ses modes d'action est la réalisation d'études et recherches dans les entreprises.

L'INRS vous propose de participer à une étude visant à mieux **comprendre la fatigue auditive engendrée par l'exposition à la musique amplifiée** chez des professionnels travaillant dans le secteur du spectacle.

Dans cet objectif, deux groupes de personnes seront constitués : un groupe de 70 personnes exposées à la musique amplifiée et un autre de 40 sujets non-exposés.

Informations générales

Vous serez en permanence en contact avec l'équipe de recherche. N'hésitez pas à nous questionner. Nous vous répondrons le plus clairement possible et sommes à votre disposition pour que cette étude se déroule le mieux possible.

Votre participation, bien que facultative, est importante pour la qualité de l'étude et la fiabilité des résultats. **Vous pouvez cependant refuser de participer à l'étude ou la quitter à tout moment, sans avoir à vous justifier et sans aucune conséquence.** Les données recueillies préalablement au retrait de consentement pourront ne pas être effacées et pourront continuer à être traitées dans les conditions prévues par la recherche, sauf demande explicite de votre part.

Ce protocole a reçu un avis favorable de la part du Comité de Protection des Personnes Sud-Est II.

L'ensemble des données recueillies est couvert par le secret professionnel et rendu anonyme par un codage numérique. Toutes les analyses et publications de résultats ne s'appuieront que sur les données anonymes.

Cette étude a fait l'objet d'une déclaration de conformité à la Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés (CNIL) selon la Méthodologie de Référence MR-001. Conformément à cette méthodologie, vos données personnelles seront conservées deux ans après la dernière publication des résultats de la recherche

Vous disposez d'un droit d'accès, de rectification et d'effacement de vos données personnelles ainsi que des droits d'opposition et de limitation au traitement de celles-ci. A ce titre, vous pouvez exercer ces droits en vous adressant au coordonnateur (Dr Thierry BOULANGER, coordonnées en fin de lettre). Vous aurez également le droit d'introduire une réclamation auprès de la CNIL à l'adresse suivante : <https://www.cnil.fr/fr/plaintes>.

Objectifs

L'objectif principal de cette recherche est :

- L'évaluation de l'impact de la **musique amplifiée** sur le système auditif en mesurant la **fatigue auditive périphérique**. Celle-ci sera quantifiée par une mesure du **seuil de déclenchement du réflexe auditif** réalisé avec le dispositif ECHOSCAN®.

Les objectifs secondaires sont :

- l'évaluation de la **fatigue auditive globale** mesurée par **audiométrie tonale** ;
- l'évaluation de la **cinétique de récupération de la fatigue** mesurée grâce au réflexe auditif et grâce à l'audiométrie tonale ;
- le recueil des **données d'exposition sonore** afin d'enrichir la connaissance de l'exposition professionnelle due à la musique et améliorer les préconisations pour la réduction du risque auditif ;
- la recherche **d'indicateurs d'exposition** corrélés à la fatigue auditive ;
- la **promotion d'actions de prévention** auprès de l'ensemble des acteurs du spectacle.

Descriptif du protocole

La totalité du protocole se déroule sur votre lieu de travail. Votre participation, sur la base du volontariat, se présentera selon le planning suivant :

- **Phase d'information**

Un investigateur vous informera du protocole et du cadre de l'étude. L'investigateur est à votre écoute pour répondre à vos interrogations. C'est à cette occasion que la présente lettre d'information vous est transmise. La durée de cette phase sera d'environ **10 min**. A votre demande, vous pourrez disposer d'un délai de réflexion de 24 heures avant de participer à la phase d'inclusion.

- **Phase d'inclusion au protocole**

Cette phase permettra de vérifier que votre situation satisfait les critères d'inclusion dans l'étude. Vous signerez alors un formulaire de consentement. Vous pourrez cependant quitter ce protocole de recherche à tout moment en le signifiant à l'un des investigateurs. La durée de la phase d'inclusion sera d'environ **20 min**.

- **Phase de mesures**

Cette phase se déroulera sur **une journée d'activité normale**. Votre audition sera évaluée par deux tests auditifs différents, une **audiométrie tonale** et un test du **réflexe auditif**. Pour déterminer la fatigue, deux mesures sont nécessaires : une **mesure de référence en début de poste** (durée environ **30 min**) et une **seconde mesure en fin de poste de travail** (durée environ **15 min**). Nous vous équiperons d'un **exposimètre** pour mesurer l'exposition sonore durant la journée.

Optionnel :

L'évaluation de la **récupération de la fatigue auditive** nécessite de répéter la seconde mesure avec différentes périodes de récupération. Les périodes programmées sont 30 min, 1 h, 2 h, 4 h et 12 h. Vous pouvez **choisir librement de participer à tout ou partie de la séquence de récupération** de la fatigue et n'être mesuré, par exemple, que le lendemain soit environ 12 h après la fin de l'exposition. Ces mesures répétées ayant pour but d'évaluer la cinétique de récupération de la fatigue auditive, vous ne serez concerné que si vous êtes exposé à la musique amplifiée.

Dispositifs de mesure

- **Mesure du réflexe auditif**

Il s'agit d'un test auditif objectif mesurant le seuil de déclenchement du réflexe auditif. ECHOSCAN® mesure le produit de distorsion acoustique de votre oreille (droite ou gauche) en émettant deux sifflements de faible intensité. Simultanément, un son d'intensité croissante est envoyé dans l'autre oreille pour déclencher le réflexe auditif. Le seuil de déclenchement du réflexe est très sensible à la fatigue auditive. En mesurant le seuil du réflexe auditif avant et après une activité, on peut déterminer la fatigue induite par celle-ci. Cette fatigue est dite périphérique car pour un individu, le seuil du réflexe dépend des performances du système auditif périphérique (les oreilles) et de l'arc réflexe court. Durant cette mesure, vous serez assis dans une pièce calme avec dans une oreille la sonde de mesure du produit de distorsion (sifflement de faible intensité) et dans l'autre un écouteur (bruit d'intensité croissante). Le produit de distorsion acoustique et le réflexe sont des réponses naturelles et spontanées du système auditif. Vous n'aurez donc pas à répondre volontairement aux stimulations sonores.



- **Audiométrie tonale liminaire**

Il s'agit du test auditif le plus couramment réalisé. Ce test permet de déterminer votre seuil de perception auditive. La mesure de variation du seuil de perception permet d'évaluer une fatigue auditive générale. Durant cette mesure, vous serez assis dans une pièce calme avec un casque audio sur la tête. Ce casque délivrera de très faibles sons à la limite de votre perception auditive. Vous signifierez la perception des sons en cliquant sur l'appareil (écran tactile ou bouton filaire).



- **Exposimètre sonore**

L'exposimètre sonore permet de connaître précisément la dose de bruit sur la totalité de votre journée. Cet appareil enregistre le niveau sonore chaque seconde. Le microphone est placé à proximité de l'oreille gauche ou droite (fixé sur l'épaule ou le col) afin d'être le plus représentatif possible du niveau sonore perçu par votre oreille. Vous serez équipé de cet appareil à la suite des mesures auditives en début de poste de travail. L'exposimètre sera récupéré en fin de poste.



Gestion des données : confidentialité et diffusion des résultats

- **Données recueillies**

L'analyse des données portera sur :

- ✓ les performances auditives mesurées et leurs variations au cours de la journée ;
- ✓ l'exposition sonore journalière.

Vos réponses au questionnaire seront traitées de manière anonyme pour permettre l'analyse des données mesurées. Les résultats des mesures pourront être ré-exploités dans le cadre des futures activités de recherche de l'INRS de façon totalement anonyme.

Aucun transfert des données à caractère personnel ne sera fait hors de France.

- **Confidentialité**

La confidentialité de la recherche est assurée par le **codage des informations** concernant les participants, de manière à assurer un **total anonymat**. La correspondance entre les résultats des analyses et l'identité des participants **ne sera connue que des investigateurs**.

- **Diffusion des résultats individuels**

Les résultats individuels des tests auditifs et votre niveau d'exposition sonore vous seront communiqués à la fin des mesures. Ces résultats seront transmis au **médecin que vous aurez personnellement désigné** dans votre formulaire de consentement. L'analyse de l'exposition sonore a posteriori peut entraîner une correction de la valeur brute annoncée à la fin de la mesure (élimination de bruits parasites). Ces résultats stabilisés pourront vous être remis sur simple demande auprès du coordonnateur (Dr Thierry BOULANGER), ou par l'intermédiaire du médecin que vous aurez personnellement désigné, en application des dispositions de l'article L1111-7 du Code de la Santé Publique. Ces droits s'exercent auprès de Dr Thierry BOULANGER à l'adresse suivante : SIST CMB - 26 rue Notre-Dame des Victoires - 75086 Paris cedex 02.

- **Diffusion des résultats anonymisés**

Les résultats anonymisés, fatigue auditive et exposition sonore, feront l'objet d'un rapport d'intervention à l'établissement et pourront éventuellement être **présentés lors d'une réunion de restitution** auprès des partenaires sociaux en Comité Social d'Entreprise, s'il existe, des responsables de l'entreprise et des salariés. Ces résultats pourront également être **publiés par l'INRS** dans des revues scientifiques ou lors de congrès scientifiques, toujours dans le respect de l'anonymat.

Coordonnées du coordonnateur et des investigateurs du projet

Investigateur coordonnateur

Dr Thierry BOULANGER

Médecin du travail

Médecine et santé au travail

SIST CMB

Tél : 01 49 27 60 11

Courriel : t.boulanger@cmb.asso.fr

Investigateur

Benoit POUYATOS

Neurotoxicologue

Département Toxicologie et

Biométrie

INRS

Tél : 03 83 50 21 02

Courriel : benoit.pouyatos@inrs.fr

Investigateur

Thomas VENET

Ingénieur

Département Toxicologie et

Biométrie

INRS

Tél : 03 83 50 85 08

Courriel : thomas.venet@inrs.fr

Annexe 2 : Questionnaire d'inclusion des volontaires

Questionnaire d'inclusion

Nous vous remercions de bien vouloir remplir ce questionnaire **avec le soutien d'un médecin investigateur**. Ce questionnaire contribuera à une meilleure interprétation des résultats des analyses.

Les réponses à ce questionnaire seront traitées de façon strictement anonyme.

Identifiant : sujet n° _ _ _

Date du questionnaire : _ _ / _ _ / _ _ _ _

Informations générales

Sexe ☐ M

☐ F

Année de naissance : : _ _ _ _

Bruit au travail

Poste de travail antérieur

Avant d'occuper votre poste, quel était votre travail précédent ?

Etiez-vous exposé au bruit ?

☐ oui

☐ non

Si oui, quelles en étaient les sources ?

Combien de temps y êtes-vous resté ? _ _ ans

Poste de travail actuel

Quelle est votre fonction actuelle ?

Depuis quand occupez vous cette fonction ? _ _ ans

Etes-vous exposé au bruit ?

☐ oui

☐ non

Si oui, quelles en sont les sources ?

Quelle est la fréquence de cette exposition ?

Heures par jour

Jours par semaine

Avez-vous des protections auditives (EPI) ?

☐ oui

☐ non

Si oui : qui vous les a fournis ?

les portez-vous ?

☐ jamais

☐ parfois

☐ toujours

Modèle d'EPI :

☐ casque

☐ bouchon moulé

☐ bouchon jetable

☐ autre (préciser)

Pensez-vous que votre activité habituelle présente un risque pour votre audition ? ☐ oui

☐ non

Bruit dans les loisirs

Avez-vous pratiqué ou pratiquez-vous le tir ? (ball trap / tir / armée)

☐ oui

☐ non

Si oui, pendant combien de temps ? _ _ ans

Avez-vous des loisirs bruyants ? (musique / concert / discothèque / ...) ☐ oui ☐ non

Si oui, combien de fois par mois ? __ __ fois par mois

Antécédents ORL

Avez-vous été opéré pour un problème aux oreilles ? ☐ oui ☐ non

Si oui pour quel problème ?

Avez-vous subi une intervention ORL durant la dernière année ? ☐ oui ☐ non

Actuellement, prenez-vous un traitement médicamenteux ? ☐ oui ☐ non

Aspirine (>4g/j) ☐ Myorelaxants ☐

Diurétiques ☐ Anticancéreux ☐

Antibiotiques (aminoglycosides) ☐

Dans le passé, avez-vous pris des aminoglycosides ou des anticancéreux ?

☐ oui ☐ non ☐ je ne sais pas

Audition

Pensez-vous avoir des problèmes d'audition ? ☐ oui ☐ non

Si oui préciser :

Avez-vous des problèmes de compréhension dans le bruit ? ☐ oui ☐ non

Souffrez-vous d'acouphènes (bourdonnements ou sifflements) ?

- Après une exposition sonore intense ☐ oui ☐ non

- Au repos ☐ oui ☐ non

Souffrez-vous d'hyperacousie (hyper sensibilité à des intensités modérées) ? ☐ oui ☐ non

Souffrez-vous de diplacousie (perception d'un timbre différent entre les oreilles droite et gauche pour un même son) ? ☐ oui ☐ non

Souffrez-vous de distorsion auditive (modification du timbre, son peu clair, déformé ou désaccordé) ? ☐ oui ☐ non

Annexe 3 : Table des variables issues de l'analyse de l'exposition
sonore

Liste des 158 indicateurs calculés à partir des expositions sonores

Partie 1/7

				Charge factorielle sur les 5 premiers facteurs				
Type d'indicateur	Pondération fréquentielle	Moyenne temporelle ou pondération temporelle	Nom de la variable	Factor1	Factor2	Factor3	Factor4	Factor5
Niveau sonore	A	Dose de bruit journalière (8h)	lexdba	0,96	-0,03	0,03	0,06	0,04
Niveau sonore	A	Pondération exponentielle, constante de temps 60 minutes	laexpo60	0,99	0,01	0,03	0,01	0,02
Niveau sonore	C	Pondération exponentielle, constante de temps 60 minutes	lcexpo60	0,97	-0,02	0,06	-0,02	0,00
Niveau sonore	A	Pondération exponentielle, constante de temps 90 minutes	laexpo90	1,00	0,01	0,02	0,03	0,02
Niveau sonore	C	Pondération exponentielle, constante de temps 90 minutes	lcexpo90	0,97	-0,02	0,05	-0,01	0,01
Niveau sonore	A	Pondération exponentielle, constante de temps 180 minutes	laexpo180	0,97	-0,02	0,01	0,06	0,03
Niveau sonore	C	Pondération exponentielle, constante de temps 180 minutes	lcexpo180	0,95	-0,05	0,03	0,01	0,02
Niveau sonore	A	Pondération exponentielle, constante de temps 360 minutes	laexpo360	0,97	-0,02	-0,01	0,08	0,03
Niveau sonore	C	Pondération exponentielle, constante de temps 360 minutes	lcexpo360	0,95	-0,05	0,02	0,03	0,02
Niveau sonore	Oct. 63 Hz	Moyenne de la dernière heure	leq631h	0,85	-0,12	0,09	-0,08	-0,08
Niveau sonore	Oct. 125 Hz	Moyenne de la dernière heure	leq1251h	0,88	-0,10	0,08	-0,07	-0,05
Niveau sonore	Oct. 250 Hz	Moyenne de la dernière heure	leq2501h	0,94	-0,03	0,05	-0,02	-0,02
Niveau sonore	Oct. 500 Hz	Moyenne de la dernière heure	leq5001h	0,95	-0,01	0,04	0,02	0,06
Niveau sonore	Oct. 1 kHz	Moyenne de la dernière heure	leq1k1h	0,96	-0,01	0,02	0,01	0,06
Niveau sonore	Oct. 2 kHz	Moyenne de la dernière heure	leq2k1h	0,95	-0,04	0,03	-0,01	0,05
Niveau sonore	Oct. 4 kHz	Moyenne de la dernière heure	leq4k1h	0,96	-0,02	0,03	-0,03	0,04
Niveau sonore	Oct. 8 kHz	Moyenne de la dernière heure	leq8k1h	0,95	-0,01	0,02	-0,07	0,00
Niveau sonore	Oct. 16 kHz	Moyenne de la dernière heure	leq16k1h	0,94	0,02	0,02	-0,12	-0,01
Niveau sonore	Oct. 63 Hz	Moyenne des 2 dernières heures	leq632h	0,91	-0,06	0,07	0,00	-0,04
Niveau sonore	Oct. 125 Hz	Moyenne des 2 dernières heures	leq1252h	0,93	-0,06	0,05	0,02	-0,03
Niveau sonore	Oct. 250 Hz	Moyenne des 2 dernières heures	leq2502h	0,97	-0,01	0,02	0,05	0,01
Niveau sonore	Oct. 500 Hz	Moyenne des 2 dernières heures	leq5002h	0,97	0,00	0,03	0,08	0,05
Niveau sonore	Oct. 1 kHz	Moyenne des 2 dernières heures	leq1k2h	1,00	0,02	-0,01	0,06	0,04
Niveau sonore	Oct. 2 kHz	Moyenne des 2 dernières heures	leq2k2h	1,00	0,02	0,00	0,02	0,04
Niveau sonore	Oct. 4 kHz	Moyenne des 2 dernières heures	leq4k2h	1,02	0,05	0,00	-0,02	0,04
Niveau sonore	Oct. 8 kHz	Moyenne des 2 dernières heures	leq8k2h	1,04	0,10	-0,02	-0,04	0,01
Niveau sonore	Oct. 16 kHz	Moyenne des 2 dernières heures	leq16k2h	1,01	0,11	-0,02	-0,09	0,00
Niveau sonore	Oct. 63 Hz	Moyenne des 3 dernières heures	leq633h	0,94	-0,03	0,04	-0,02	0,04
Niveau sonore	Oct. 125 Hz	Moyenne des 3 dernières heures	leq1253h	0,95	-0,04	0,04	0,02	0,03

				Charge factorielle sur les 5 premiers facteurs				
Type d'indicateur	Pondération fréquentielle	Moyenne temporelle ou pondération temporelle	Nom de la variable	Factor1	Factor2	Factor3	Factor4	Factor5
Niveau sonore	Oct. 250 Hz	Moyenne des 3 dernières heures	leq2503h	0,98	0,00	0,01	0,06	0,03
Niveau sonore	Oct. 500 Hz	Moyenne des 3 dernières heures	leq5003h	0,99	0,01	0,03	0,09	0,04
Niveau sonore	Oct. 1 kHz	Moyenne des 3 dernières heures	leq1k3h	1,01	0,03	0,01	0,07	0,04
Niveau sonore	Oct. 2 kHz	Moyenne des 3 dernières heures	leq2k3h	1,01	0,03	0,00	0,02	0,04
Niveau sonore	Oct. 4 kHz	Moyenne des 3 dernières heures	leq4k3h	1,01	0,04	-0,01	0,00	0,04
Niveau sonore	Oct. 8 kHz	Moyenne des 3 dernières heures	leq8k3h	1,04	0,09	-0,02	-0,03	0,01
Niveau sonore	Oct. 16 kHz	Moyenne des 3 dernières heures	leq16k3h	1,02	0,10	-0,01	-0,07	0,00
Niveau sonore	Oct. 63 Hz	Moyenne de la totalité de la mesure	leq63total	0,92	-0,07	0,03	0,02	0,06
Niveau sonore	Oct. 125 Hz	Moyenne de la totalité de la mesure	leq125total	0,93	-0,07	0,00	0,06	0,03
Niveau sonore	Oct. 250 Hz	Moyenne de la totalité de la mesure	leq250total	0,96	-0,04	-0,03	0,10	0,02
Niveau sonore	Oct. 500 Hz	Moyenne de la totalité de la mesure	leq500total	0,97	-0,01	-0,01	0,12	0,05
Niveau sonore	Oct. 1 kHz	Moyenne de la totalité de la mesure	leq1ktotal	0,99	0,01	-0,03	0,11	0,04
Niveau sonore	Oct. 2 kHz	Moyenne de la totalité de la mesure	leq2ktotal	0,99	0,01	-0,04	0,06	0,04
Niveau sonore	Oct. 4 kHz	Moyenne de la totalité de la mesure	leq4ktotal	0,99	0,00	-0,05	0,03	0,03
Niveau sonore	Oct. 8 kHz	Moyenne de la totalité de la mesure	leq8ktotal	1,01	0,04	-0,05	-0,01	0,01
Niveau sonore	Oct. 16 kHz	Moyenne de la totalité de la mesure	leq16ktotal	0,95	0,00	0,00	-0,07	-0,01
Niveau sonore	A	Moyenne de la dernière heure	leqa1h1s	0,96	-0,03	0,03	0,00	0,06
Niveau sonore	C	Moyenne de la dernière heure	leqc1h1s	0,92	-0,08	0,07	-0,06	0,00
Niveau sonore	A	Moyenne des 2 dernières heures	leqa2h1s	1,00	0,01	0,01	0,05	0,04
Niveau sonore	C	Moyenne des 2 dernières heures	leqc2h1s	0,96	-0,03	0,05	0,01	-0,01
Niveau sonore	A	Moyenne des 3 dernières heures	leqa3h1s	1,00	0,02	0,02	0,06	0,04
Niveau sonore	C	Moyenne des 3 dernières heures	leqc3h1s	0,98	-0,01	0,04	0,00	0,03
Niveau sonore	A	Moyenne de la totalité de la mesure	leqatotal1s	0,98	-0,01	-0,03	0,10	0,04
Niveau sonore	C	Moyenne de la totalité de la mesure	leqctotal1s	0,96	-0,04	0,01	0,04	0,03
Quantile 10% des Leq 1s	A	Moyenne de la dernière heure	l10a1h1s	0,91	-0,09	0,04	0,05	0,04
Quantile 10% des Leq 1s	C	Moyenne de la dernière heure	l10c1h1s	0,88	-0,13	0,07	-0,01	-0,01
Quantile 90% des Lp,Cpeak 1s	C	Moyenne de la dernière heure	l90pkc1h1s	0,62	-0,22	0,00	-0,51	0,15
Quantile 10% des Lp,Cpeak 1s	C	Moyenne de la dernière heure	l10pkc1h1s	0,91	-0,09	0,08	0,00	0,01
Quantile 90% des Leq 1s	A	Moyenne des 2 dernières heures	l90a2h1s	0,83	-0,14	-0,21	-0,25	0,08

Partie 3/7

				Charge factorielle sur les 5 premiers facteurs				
Type d'indicateur	Pondération fréquentielle	Moyenne temporelle ou pondération temporelle	Nom de la variable	Factor1	Factor2	Factor3	Factor4	Factor5
Quantile 10% des Leq 1s	A	Moyenne des 2 dernières heures	l10a2h1s	0,91	-0,10	0,04	0,08	0,06
Kurtosis des Leq 1s	A	Moyenne des 2 dernières heures	kurtla2h1s	0,61	0,37	-0,58	-0,28	-0,24
Quantile 90% des Leq 1s	C	Moyenne des 2 dernières heures	l90c2h1s	0,82	-0,08	-0,25	-0,30	-0,01
Quantile 10% des Leq 1s	C	Moyenne des 2 dernières heures	l10c2h1s	0,88	-0,14	0,07	0,04	0,02
Quantile 90% des Lp,Cpeak 1s	C	Moyenne des 2 dernières heures	l90pkc2h1s	0,85	-0,09	-0,24	-0,26	0,04
Quantile 10% des Lp,Cpeak 1s	C	Moyenne des 2 dernières heures	l10pkc2h1s	0,91	-0,09	0,07	0,04	0,03
Quantile 90% des Leq 1s	A	Moyenne des 3 dernières heures	l90a3h1s	0,88	-0,11	-0,27	-0,12	0,09
Quantile 10% des Leq 1s	A	Moyenne des 3 dernières heures	l10a3h1s	0,94	-0,06	0,05	0,07	0,05
Quantile 90% des Leq 1s	C	Moyenne des 3 dernières heures	l90c3h1s	0,87	-0,04	-0,33	-0,16	0,00
Quantile 10% des Leq 1s	C	Moyenne des 3 dernières heures	l10c3h1s	0,92	-0,08	0,08	0,01	0,01
Quantile 90% des Lp,Cpeak 1s	C	Moyenne des 3 dernières heures	l90pkc3h1s	0,89	-0,07	-0,29	-0,14	0,05
Quantile 10% des Lp,Cpeak 1s	C	Moyenne des 3 dernières heures	l10pkc3h1s	0,95	-0,04	0,08	0,02	0,02
Quantile 90% des Leq 1s	A	Moyenne de la totalité de la mesure	l90atotal1s	0,72	-0,25	-0,40	0,07	0,20
Quantile 10% des Leq 1s	A	Moyenne de la totalité de la mesure	l10atotal1s	0,95	-0,04	0,01	0,10	0,01
Quantile 90% des Leq 1s	C	Moyenne de la totalité de la mesure	l90ctotal1s	0,69	-0,18	-0,54	0,10	0,11
Quantile 10% des Leq 1s	C	Moyenne de la totalité de la mesure	l10ctotal1s	0,93	-0,07	0,04	0,05	-0,01
Quantile 90% des Lp,Cpeak 1s	C	Moyenne de la totalité de la mesure	l90pkctotal1s	0,74	-0,20	-0,44	0,08	0,16
Quantile 10% des Lp,Cpeak 1s	C	Moyenne de la totalité de la mesure	l10pkctotal1s	0,95	-0,04	0,06	0,05	-0,01
Différence de quantiles L10-L90 des Leq 1s	C	Moyenne de la dernière heure	l10l90leqc1s1h	0,76	-0,03	0,12	0,44	-0,10
Différence de quantiles L10-L90 des Lp,Cpeak 1s	C	Moyenne de la dernière heure	l10l90lpkc1s1h	0,73	0,10	0,13	0,56	-0,16
Différence de quantiles L10-L90 des Leq 1s	C	Moyenne des 2 dernières heures	l10l90leqc1s2h	0,62	-0,16	0,35	0,35	0,04
Différence de quantiles L10-L90 des Leq 1s	C	Moyenne des 3 dernières heures	l10l90leqc1s3h	0,65	-0,09	0,48	0,18	0,02
Différence de quantiles L10-L90 des Leq 1s	A	Totalité de la mesure	l10l90leqa1stotal	0,70	0,27	0,55	0,08	-0,24
Différence de quantiles L10-L90 des Leq 1s	C	Totalité de la mesure	l10l90leqc1stotal	0,84	0,02	0,39	0,00	-0,09

Type d'indicateur	Pondération fréquentielle	Moyenne temporelle ou pondération temporelle	Nom de la variable	Charge factorielle sur les 5 premiers facteurs				
				Factor1	Factor2	Factor3	Factor4	Factor5
Différence de quantiles L10-L90 des Lp,Cpeak 1s	C	Totalité de la mesure	l10l90lpc1stotal	0,82	0,11	0,47	0,00	-0,15
Kurtosis audio	Oct. 250 Hz	Derniere heure; moyenne géométrique	kurtgeo2501h	-0,10	0,77	-0,10	0,17	0,04
Kurtosis audio	Oct. 500 Hz	Derniere heure; moyenne géométrique	kurtgeo5001h	-0,11	0,84	-0,10	0,15	-0,05
Kurtosis audio	Oct. 1 kHz	Derniere heure; moyenne géométrique	kurtgeo1k1h	-0,13	0,79	-0,09	0,12	-0,05
Kurtosis audio	Oct. 2 kHz	Derniere heure; moyenne géométrique	kurtgeo2k1h	-0,16	0,76	-0,10	0,08	-0,03
Kurtosis audio	Oct. 4 kHz	Derniere heure; moyenne géométrique	kurtgeo4k1h	-0,19	0,72	-0,12	0,10	0,13
Kurtosis audio	Oct. 250 Hz	2 dernières heures ; moyenne géométrique	kurtgeo2502h	-0,08	0,79	-0,05	0,05	0,09
Kurtosis audio	Oct. 500 Hz	2 dernières heures ; moyenne géométrique	kurtgeo5002h	-0,11	0,87	-0,06	0,06	-0,05
Kurtosis audio	Oct. 1 kHz	2 dernières heures ; moyenne géométrique	kurtgeo1k2h	-0,14	0,83	-0,06	0,05	-0,04
Kurtosis audio	Oct. 2 kHz	2 dernières heures ; moyenne géométrique	kurtgeo2k2h	-0,16	0,79	-0,07	0,03	-0,01
Kurtosis audio	Oct. 4 kHz	2 dernières heures ; moyenne géométrique	kurtgeo4k2h	-0,12	0,78	-0,09	0,03	0,20
Kurtosis audio	Oct. 250 Hz	3 dernières heures ; moyenne géométrique	kurtgeo2503h	-0,18	0,76	0,01	0,01	0,04
Kurtosis audio	Oct. 500 Hz	3 dernières heures ; moyenne géométrique	kurtgeo5003h	-0,17	0,82	-0,01	0,04	-0,06
Kurtosis audio	Oct. 1 kHz	3 dernières heures ; moyenne géométrique	kurtgeo1k3h	-0,25	0,78	-0,02	0,04	-0,02
Kurtosis audio	Oct. 2 kHz	3 dernières heures ; moyenne géométrique	kurtgeo2k3h	-0,21	0,77	-0,02	0,01	0,02
Kurtosis audio	Oct. 4 kHz	3 dernières heures ; moyenne géométrique	kurtgeo4k3h	-0,19	0,73	-0,02	-0,01	0,22
Kurtosis audio	Oct. 250 Hz	Totalité de la mesure ; moyenne géométrique	kurtgeo250t	-0,23	0,66	0,41	-0,17	-0,04
Kurtosis audio	Oct. 500 Hz	Totalité de la mesure ; moyenne géométrique	kurtgeo500t	-0,28	0,70	0,32	-0,10	-0,08
Kurtosis audio	Oct. 1 kHz	Totalité de la mesure ; moyenne géométrique	kurtgeo1kt	-0,36	0,65	0,29	-0,09	-0,04
Kurtosis audio	Oct. 2 kHz	Totalité de la mesure ; moyenne géométrique	kurtgeo2kt	-0,25	0,70	0,29	-0,14	-0,04
Kurtosis audio	Oct. 4 kHz	Totalité de la mesure ; moyenne géométrique	kurtgeo4kt	-0,21	0,64	0,34	-0,19	0,14
Kurtosis des Leq 1s	C	Moyenne des 2 dernières heures	kurtlc2h1s	0,19	0,63	-0,39	-0,34	-0,40
Kurtosis des Leq 1s	A	Moyenne des 3 dernières heures	kurtla3h1s	0,59	0,32	-0,69	-0,05	-0,17
Kurtosis des Lp,Cpeak 1s	C	Moyenne des 3 dernières heures	kurtpkc3h1s	0,19	0,32	-0,67	-0,16	-0,19
Kurtosis des Leq 1s	A	Moyenne de la totalité de la mesure	kurtlatotal1s	0,06	-0,06	-0,73	0,19	0,08
Différence de quantiles L10-L90 des Leq 1s	A	Moyenne des 3 dernières heures	l10l90leqa1s3h	0,24	0,10	0,66	0,38	-0,07

Partie 5/7

				Charge factorielle sur les 5 premiers facteurs				
Type d'indicateur	Pondération fréquentielle	Moyenne temporelle ou pondération temporelle	Nom de la variable	Factor1	Factor2	Factor3	Factor4	Factor5
Différence de quantiles L10-L50 des Leq 1s	C	Moyenne des 3 dernières heures	l10l50leqc1s3h	0,11	0,05	0,79	0,02	0,08
Différence de quantiles L10-L50 des Lp,Cpeak 1s	C	Moyenne des 3 dernières heures	l10l50lpc1s3h	-0,02	0,15	0,78	0,02	0,01
Différence de quantiles L10-L50 des Leq 1s	A	Totalité de la mesure	l10l50leqa1stotal	0,24	0,27	0,77	-0,02	-0,31
Différence de quantiles L10-L50 des Leq 1s	C	Totalité de la mesure	l10l50leqc1stotal	0,59	0,04	0,71	-0,06	-0,14
Différence de quantiles L10-L50 des Lp,Cpeak 1s	C	Totalité de la mesure	l10l50lpc1stotal	0,48	0,06	0,74	-0,07	-0,19
Kurtosis des Leq 1s	A	Moyenne de la dernière heure	kurtla1h1s	0,30	0,01	-0,09	-0,75	0,00
Kurtosis des Leq 1s	C	Moyenne de la dernière heure	kurtlc1h1s	0,01	0,42	-0,11	-0,60	-0,26
Kurtosis des Lp,Cpeak 1s	C	Moyenne de la dernière heure	kurtlpc1h1s	-0,03	0,05	-0,17	-0,72	-0,13
Différence de quantiles L10-L90 des Leq 1s	A	Moyenne de la dernière heure	l10l90leqa1s1h	0,50	0,21	0,04	0,79	-0,20
Différence de quantiles L10-L90 des Leq 1s	A	Moyenne des 2 dernières heures	l10l90leqa1s2h	0,27	0,05	0,46	0,60	-0,02
Différence de quantiles L10-L50 des Leq 1s	C	Moyenne de la dernière heure	l10l50leqc1s1h	0,20	0,12	0,13	0,72	-0,10
Différence de quantiles L10-L50 des Lp,Cpeak 1s	C	Moyenne de la dernière heure	l10l50lpc1s1h	0,07	0,20	0,14	0,65	-0,15
Kurtosis audio	Oct. 63 Hz	Derniere heure; moyenne géométrique	kurtgeo631h	0,39	0,06	-0,08	0,21	0,69
Kurtosis audio	Oct. 63 Hz	2 dernières heures ; moyenne géométrique	kurtgeo632h	0,29	0,00	-0,01	0,07	0,83
Kurtosis audio	Oct. 125 Hz	2 dernières heures ; moyenne géométrique	kurtgeo1252h	0,01	0,51	-0,14	0,03	0,63
Kurtosis audio	Oct. 16 kHz	2 dernières heures ; moyenne géométrique	kurtgeo16k2h	0,12	0,13	-0,07	-0,23	0,74
Kurtosis audio	Oct. 63 Hz	3 dernières heures ; moyenne géométrique	kurtgeo633h	0,26	-0,05	0,16	-0,03	0,76
Kurtosis audio	Oct. 16 kHz	3 dernières heures ; moyenne géométrique	kurtgeo16k3h	0,15	0,05	0,00	-0,29	0,74
Kurtosis audio	Oct. 16 kHz	Totalité de la mesure ; moyenne géométrique	kurtgeo16kt	0,33	0,10	0,33	-0,23	0,67
Temps		Durée de la mesure d'exposition	dureemesure	0,04	-0,16	0,42	-0,32	0,01
Kurtosis audio	Oct. 125 Hz	Derniere heure; moyenne géométrique	kurtgeo1251h	0,01	0,48	-0,17	0,23	0,51
Kurtosis audio	Oct. 8 kHz	Derniere heure; moyenne géométrique	kurtgeo8k1h	-0,21	0,52	-0,14	0,05	0,38
Kurtosis audio	Oct. 16 kHz	Derniere heure; moyenne géométrique	kurtgeo16k1h	0,10	-0,01	-0,07	-0,26	0,45

				Charge factorielle sur les 5 premiers facteurs				
Type d'indicateur	Pondération fréquentielle	Moyenne temporelle ou pondération temporelle	Nom de la variable	Factor1	Factor2	Factor3	Factor4	Factor5
Kurtosis audio	Z	Derniere heure; moyenne géometrique	kurtgeoglob1h	-0,04	0,55	-0,16	0,27	0,39
Kurtosis audio	Oct. 8 kHz	2 dernières heures ; moyenne géometrique	kurtgeo8k2h	-0,20	0,54	-0,09	0,00	0,43
Kurtosis audio	Z	2 dernières heures ; moyenne géometrique	kurtgeoglob2h	-0,12	0,54	-0,06	0,13	0,42
Kurtosis audio	Oct. 125 Hz	3 dernières heures ; moyenne géometrique	kurtgeo1253h	-0,07	0,50	-0,04	-0,03	0,57
Kurtosis audio	Oct. 8 kHz	3 dernières heures ; moyenne géometrique	kurtgeo8k3h	-0,24	0,47	0,00	-0,07	0,51
Kurtosis audio	Z	3 dernières heures ; moyenne géometrique	kurtgeoglob3h	-0,20	0,49	0,03	0,09	0,41
Kurtosis audio	Oct. 63 Hz	Totalité de la mesure ; moyenne géometrique	kurtgeo63t	0,38	-0,06	0,43	-0,07	0,50
Kurtosis audio	Oct. 125 Hz	Totalité de la mesure ; moyenne géometrique	kurtgeo125t	0,08	0,49	0,47	-0,21	0,36
Kurtosis audio	Oct. 8 kHz	Totalité de la mesure ; moyenne géometrique	kurtgeo8kt	-0,13	0,41	0,47	-0,21	0,39
Kurtosis audio	Z	Totalité de la mesure ; moyenne géometrique	kurtgeoglobt	-0,10	0,41	0,44	-0,04	0,31
Quantile 90% des Leq 1s	A	Moyenne de la dernière heure	l90a1h1s	0,60	-0,25	0,01	-0,51	0,19
Quantile 90% des Leq 1s	C	Moyenne de la dernière heure	l90c1h1s	0,58	-0,19	-0,03	-0,55	0,11
Kurtosis des Lp,Cpeak 1s	C	Moyenne des 2 dernières heures	kurtpkc2h1s	0,27	0,39	-0,53	-0,35	-0,31
Kurtosis des Leq 1s	C	Moyenne des 3 dernières heures	kurtlc3h1s	0,06	0,47	-0,58	-0,13	-0,23
Kurtosis des Leq 1s	C	Moyenne de la totalité de la mesure	kurtlctotal1s	-0,55	0,06	-0,32	-0,02	-0,06
Kurtosis des Lp,Cpeak 1s	C	Moyenne de la totalité de la mesure	kurtpkctotal1s	-0,49	-0,03	-0,45	-0,04	-0,01
Nombre de Lp,Cpeak 1s ≥ 135 dB(C)	C	Moyenne de la dernière heure	nblpkc1351h1s	0,24	0,27	0,10	-0,15	0,01
Nombre de Lp,Cpeak 1s ≥ 135 dB(C)	C	Moyenne des 2 dernières heures	nblpkc1352h1s	0,37	0,27	-0,11	0,06	0,02
Nombre de Lp,Cpeak 1s ≥ 135 dB(C)	C	Moyenne des 3 dernières heures	nblpkc1353h1s	0,38	0,29	-0,11	0,06	0,01
Nombre de Lp,Cpeak 1s ≥ 135 dB(C)	C	Totalité de la mesure	nblpkc135total1s	0,38	0,26	-0,07	0,00	0,00
Différence de quantiles L10-L90 des Leq 1s	C	Moyenne des 2 dernières heures	l10l90lpkc1s2h	0,55	-0,05	0,46	0,41	0,00
Différence de quantiles L10-L90 des Lp,Cpeak 1s	C	Moyenne des 3 dernières heures	l10l90lpkc1s3h	0,58	0,02	0,58	0,23	-0,03
Différence de quantiles L10-L50 des Leq 1s	A	Moyenne de la dernière heure	l10l50leqa1s1h	-0,20	0,37	0,07	0,59	-0,16
Différence de quantiles L10-L50 des Leq 1s	A	Moyenne des 2 dernières heures	l10l50leqa1s2h	-0,35	0,25	0,42	0,23	0,06

				Charge factorielle sur les 5 premiers facteurs				
Type d'indicateur	Pondération fréquentielle	Moyenne temporelle ou pondération temporelle	Nom de la variable	Factor1	Factor2	Factor3	Factor4	Factor5
Différence de quantiles L10-L50 des Leq 1s	C	Moyenne des 2 dernières heures	I10I50leqc1s2h	0,00	-0,08	0,60	0,33	0,17
Différence de quantiles L10-L50 des Leq 1s	C	Moyenne des 2 dernières heures	I10I50lpkc1s2h	-0,10	0,06	0,59	0,30	0,09
Différence de quantiles L10-L50 des Leq 1s	A	Moyenne des 3 dernières heures	I10I50leqa1s3h	-0,33	0,29	0,59	0,03	-0,02

Annexe 4 : Exemples de kurtosis calculés sur des Leq et de kurtosis
calculés sur le signal audio

Kurtosis.

Le kurtosis est un indicateur de la distribution d'une variable réelle. Il indique le degré d'aplatissement de la distribution. Il s'agit du moment d'ordre 4 (l'écart type est le moment d'ordre 2). Le kurtosis d'une distribution normale vaut 3. La distribution est dite platikurtique lorsque le kurtosis est inférieur à 3. La distribution est alors "aplatie". La distribution est dite leptokurtique lorsque le kurtosis est supérieur à 3. La distribution est alors plus «pointue» et présente également des extrémités plus épaisses traduisant un nombre élevé de valeurs anormales comme la présence de clics superposés à un bruit aléatoire.

Kurtosis audio

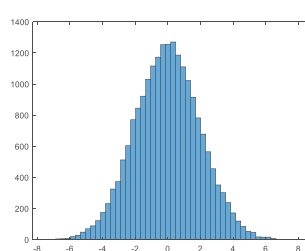
Le kurtosis audio est calculé à partir des valeurs issues de la conversion analogique-numérique de l'audio enregistré par l'exposimètre (fichier Wav). Le kurtosis est calculé sur une durée de 40 s. Les valeurs moyennes sont obtenues par le calcul de moyennes géométriques des kurtosis unitaires de 40 s. Ce type d'application du kurtosis est notamment utilisé pour caractériser la présence de bruit impulsionnels¹.

Exemple de kurtosis

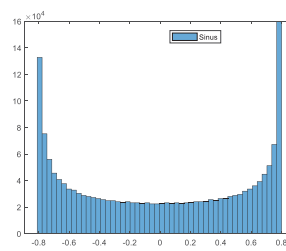
Distribution, forme du signal audio

Valeur de kurtosis

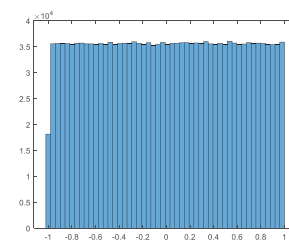
Distribution normale	3
Sinus	1,5
Bruit aléatoire (distribution uniforme)	1,8
Bruit aléatoire -20 dB + 4 clics par seconde 0dB	12
Musique M non compressée	4,2
Musique M compressée (seuil 60dB ; ratio 6:1)	2,9



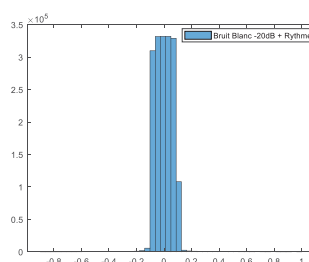
Distribution normale



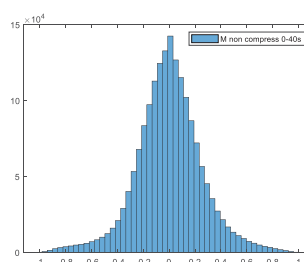
Sinus -2dB



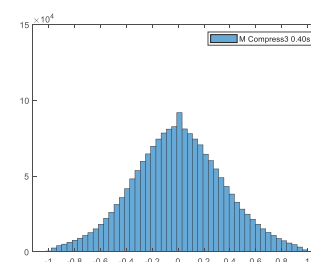
Bruit blanc 0dB



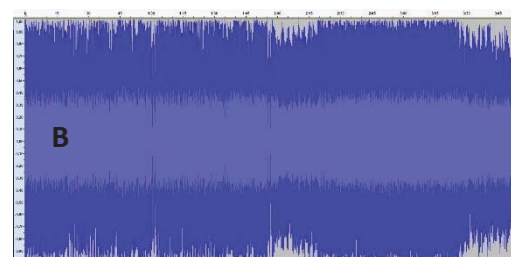
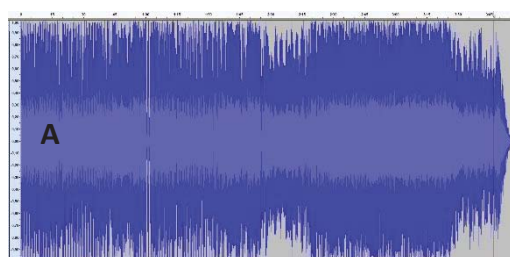
Bruit aléatoire + clic (1/100)



Musique M non compressé



Musique M compressée

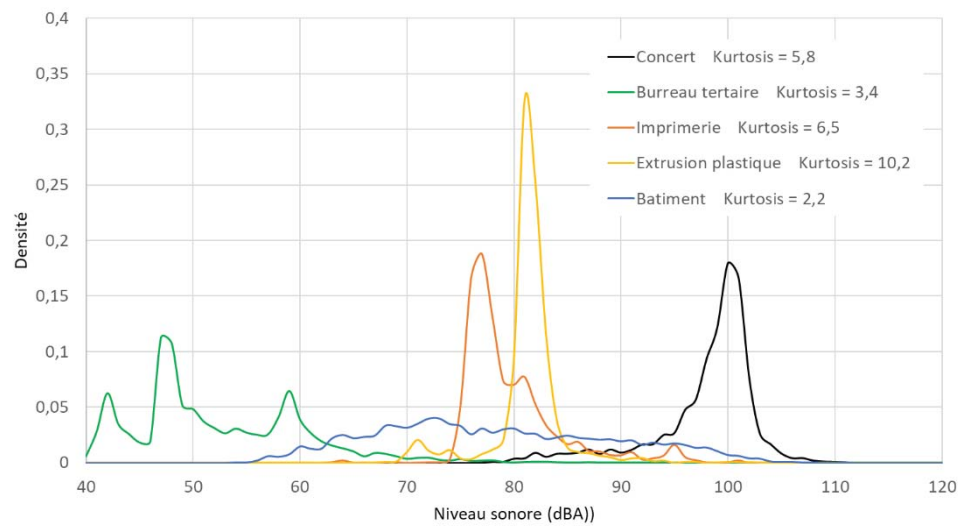


Signal (waveform) de la musique M : A sans compression ; B avec compression

¹ [1] FUENTE, A., QIU, W., ZHANG, M., XIE, H., KARDOUS, C.A., ET AL, 2018. USE OF THE KURTOSIS STATISTIC IN AN EVALUATION OF THE EFFECTS OF NOISE AND SOLVENT EXPOSURES ON THE HEARING THRESHOLDS OF WORKERS: AN EXPLORATORY STUDY. J. ACOUST. SOC. AM., 143(3), p.1704–1710

Kurtosis de Leq

Le kurtosis des valeurs de Leq 1 seconde donne une image de la stabilité des niveaux sonores qui est communément évaluée par la différence d'indices fractiles ou percentiles telle que la différence entre L10 et L50.



Exemple de distribution des LAeq 1s et kurtosis associés mesuré durant 1 heure au poste de travail

Annexe 5 : Article VENET, et al. 2021



Chapter 5

DPOAEs for the Assessment of Noise- or Toxicant-Induced Cochlear Damage in the Rat

Thomas Venet, Aurélie Thomas, Ludivine Wathier, and Benoît Pouyatos

Abstract

Distortion Product Otoacoustic Emissions (DPOAEs) are acoustic responses generated by the inner ear, more specifically the outer hair cells (OHCs), when stimulated simultaneously by two pure tone frequencies. DPOAEs are useful because they are reduced or absent when the OHCs are impaired by noise or ototoxic agents, and they offer an objective and noninvasive assessment of the OHC function, which is not mitigated by central plasticity. Here, we provide a detailed method to measure DPOAEs in rats. We emphasize especially on the calibration of the sound stimulation and the analysis of the otoacoustic emissions, which ensure the reliability of the method.

Key words Otoacoustic emissions, Distortion products, Cochlea, Inner ear, Outer hair cells, Fast Fourier transform

1 Introduction

Cochlear outer hair cells (OHCs), which are distributed along the organ of Corti, have the unique property of being motile. This *electromotility*, achieved by the motor protein called prestin [1], drives cochlear amplification. It is a major contributing factor to the high sensitivity and the extremely sharp frequency tuning of mammalian audition [2]. The cochlea is a nonlinear amplified system, which means that the output is not proportional to the change in the input. This nonlinearity is due to the activity of the above-mentioned “cochlear amplifier” and other cochlear processes, such as the nonlinearities in stereocilia hair bundle deflection [3, 4], the asymmetries in stereocilia stiffness [5], and the opening/closing of mechanically activated ion channels [6].

The mechanical activity of OHCs generates reverse traveling waves that makes the middle ear ossicles and tympanic membrane vibrate, thereby producing sound waves in the ear canal: the acoustic otoemissions (OAEs) [7]. OAEs can be evoked by a sound stimulation (e.g., clicks, single tone, or tone pairs) or occur

spontaneously. Evoked OAEs are efficient, noninvasive, and objective indicators of healthy cochlear function, especially that of OHCs. Indeed, numerous studies have shown that OHC damage reduces or cancels evoked OAEs [8–11].

When two pure tones (f_1 and f_2 , with $f_2 > f_1$), continuous and closely spaced in frequency, are presented to the ear canal, the acoustic response of the cochlea is called a Distortion-Product Otoacoustic Emission (DPOAE). When the two traveling waves induced by these two frequencies interact, they produce a family of intermodulation distortions at different mathematically related frequencies, e.g., the sum and difference of f_1 and f_2 , as well as the sums and differences of multiples of those frequencies. In addition to the distortion phenomenon, a coherent-reflection mechanism also occurs. These complex mechanisms are not the topic of the current chapter and detailed descriptions of the physics of DPOAE generation can be found elsewhere [12].

The most prominent DPOAE that can be measured in both humans and laboratory rodents is often the cubic distortion product $2 \cdot f_1 - f_2$, which explains why it has been the most used in clinical settings and laboratory experiments.

The chapter focuses on the description of a method to record cubic DPOAEs in rats. However, it is worth mentioning that an excellent methodological description of DPOAE recordings in mice is also available [13]. Actually, DPOAEs have been measured in almost all common and exotic laboratory species, including amphibians and birds.

All DPOAE measurement systems are composed of four parts:

1. a frequency synthesizer, coupled to an amplifier, which produces the sinuses for the two pure tones.
2. two speakers, which transduce those frequencies.
3. one microphone, also coupled to an amplifier, which converts the cochlear response into an electrical signal.
4. a spectral analyzer, which allows the averaging and the Fourier transform of electrical signal.

The critical step in recording DPOAEs is the separation of the meaningful DPOAE response from the acoustic noise coming from the environment and the animal. This separation requires the averaging of numerous acquisitions, a pertinent choice of f_1 and f_2 settings, as well as a proper setup of spectral analysis parameters. Since the reliability of DPOAE measurement depends mostly on these parameters, they are detailed in this chapter.

Although DPOAEs can be, in theory, measured in non-anesthetized animals, using habituation and contention (e.g., guinea pigs) or a surgically implanted cranial anchor (e.g., rats), the procedure is much easier and the DPOAEs more stable in ketamine/xylazine anesthetized animals. In addition, the ketamine/

xylazine mixture does not significantly alter DPOAE levels, as opposed to isoflurane [14].

It is important to bear in mind that the OHC function of the low-frequency region of the cochlea (apex) cannot be investigated using DPOAEs. Indeed, the gain of the cochlear amplifier is only a few-fold at the apex of the cochlea against a 1000-fold at the base [15]. Consequently, DPOAEs can only be considered as reliable with $f_2 > 3000$ Hz in rats. The rat being able to hear sounds up to 60 kHz, we do not advise to use human commercial DPOAE systems dedicated to the clinic, which are generally limited to 8 kHz. However, some off-the-shelf systems specifically designed for the measurement of DPOAE in rats are commercially available (*see Note 1*).

2 Materials

- Otoscope.
- Ketamine.
- Xylazine.
- Data acquisition unit (e.g., Brüel & Kjær Type 3560D).
- Two high-sampling, low-distortion signal generators (e.g., Brüel & Kjær Type 3110).
- High-frequency emitters (e.g., Brüel & Kjær Type 4192 microphone capsules) to produce pure tones up to 60 kHz.
- Low-noise microphone (e.g., Knowles FG-23329-CO5).
- Low-distortion amplifier(s) (e.g., Femto DLPVA-100-B Series).
- PC equipped with a software to control the data acquisition system (e.g., Brüel & Kjær PULSE interface).
- Multifunction acoustic calibrator (e.g., Brüel & Kjær Type 4226).
- Sound-attenuating chamber (*see Note 2*).
- Heating pad (e.g., Harvard Apparatus).
- 1/8 inch reference microphone (e.g., Brüel & Kjær Type 4138).
- Home-made cylindrical calibration cavity (0.045 cm^3).
- Small curved forceps and elastic bands.
- Laboratory stand.
- Articulated holder.

3 Methods

3.1 Equipment Setup (Fig. 1)

3.1.1 Generators and Analyzer

DPOAE measurements are performed using a Brüel & Kjær Type 3560D data acquisition unit equipped with two 3110 modules, which offer two signal generators with 204.8 kHz bandwidths and 24-bit D/A convertors, as well as two measurement channels (*see Note 3*). This configuration is therefore perfectly suited for measuring rat's hearing whose audible range extends up to 60 kHz. PULSE software can be controlled by a Visual Basic OLE interface to design automatized measurement sequences. The use of this interface speeds up the measurement and increases the reliability of the data recording. Calibration and periodic checks carried out with a multifunction acoustic calibrator (Brüel & Kjær Type 4226) guarantee a maximum error of ± 0.15 dB up to 4000 Hz and ± 0.20 dB beyond.

3.1.2 DPOAE Measurement Probe

Most DPOAE measurement probes available on the market are dedicated to humans. The upper frequency limit is generally less than 8000 Hz, which is insufficient for the rat. Therefore, we manufactured a probe in the laboratory, which is detailed hereafter (Fig. 2).

This probe uses two and a half inch microphone capsules (Brüel & Kjær Type 4192) as a sound transmitter for f_1 and f_2 . These capsules require a 200 V polarization, which is superimposed on the sinusoidal signal in a conditioner near the probe. Two cascaded amplifiers (voltage gains: $20 + 5$ dB) amplify the sinusoidal signal, allowing an alternative effective voltage of 45 Vrms to be reached. The usable bandwidth ranges from 500 to 30,000 Hz. The microphone used to measure the sound signal is a Knowles FG 23329-C05 miniature microphone. The signal delivered by this microphone is amplified by 40 dB by a conditioner placed near the probe (homemade voltage amplifier whose characteristics are close to those of commercial amplifiers; *see Subheading 2* above) and operating on battery (± 12 V). The bandwidth of this microphone ranges from 100 to 10,000 Hz (± 3 dB). However, by judiciously choosing the frequencies, this custom probe fitted with this microphone allows DPOAE measurements up to 25,000 Hz after calibration. Beyond that, the sensitivity of the assembly (probe + microphone) is too low and this device is no more usable.

The different elements of this device (probe, conditioner, amplifiers) are periodically checked and calibrated. The quality of the electrical connections and even more of the mechanical

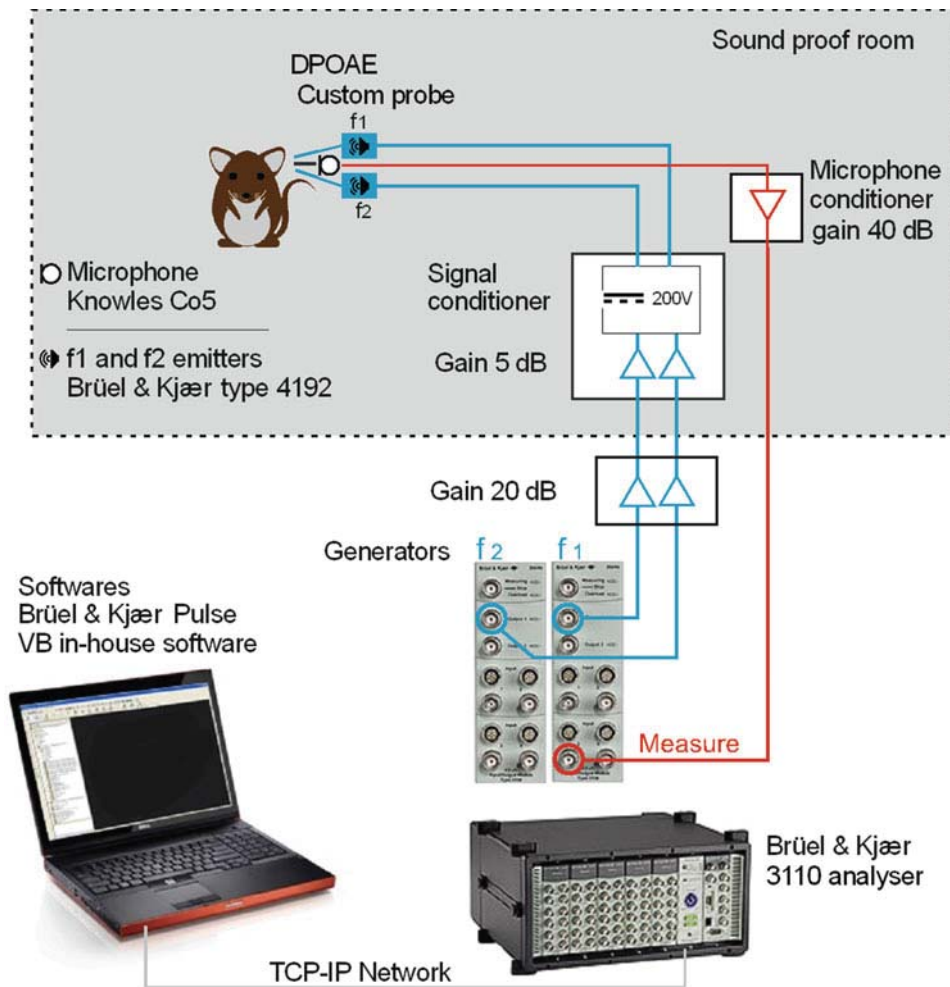


Fig. 1 Schematic description of the DPOAE measurement system for the rat

assembly have a great influence on the performance of the system, especially at high frequencies (*see Note 4*).

3.1.3 Probe Calibration and Periodic Verification

In order to calibrate the sound emissions for the rat's hearing system, a cavity with a volume equivalent to that of the ear canal is used (Fig. 3). For the adult (6-month-old) Brown Norway and Long-Evans type rat, the volume is approximately 0.045 cm^3 . The custom-made cylindrical calibration cavity (length = 6.5 mm; diameter = 2.9 mm) allows the insertion of the probe to be fitted with an audiometric plug with a diameter of 6 mm at one end. The other side of the cavity is fitted with a Teflon ring, which allows the reference microphone to be inserted (Brüel & Kjær type 4138, 1/8 inch).

The probe is calibrated between 500 and 30,000 Hz. The probe calibration allows you to define the levels emitted in dB

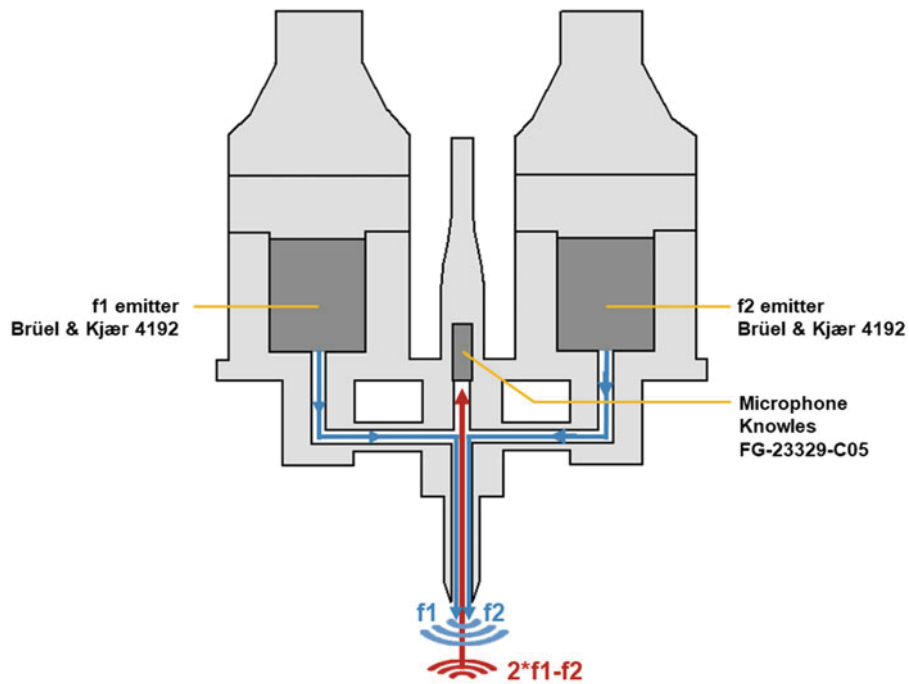


Fig. 2 Probe diagram



Fig. 3 [Probe/cavity/reference microphone] assembly for calibration

SPL by the $f1$ and $f2$ transmitters (*see Note 5*). It allows choosing the frequencies that can be used according to the response curve measured at the reference microphone and at the microphone of the probe.

A simplified procedure has been defined for a rapid verification that can be carried out just before each series of recordings. This verification consists in launching a DPgram measurement (*see Sub-heading 3.3.2*), leaving the probe free (without rat, cavity, and audiometric plug). For each $f1$ and $f2$ frequencies of the DPgram,

the levels $L1$ and $L2$ measured by the probe microphone are compared to the reference levels measured under the same conditions following calibration of the probe. The maximum permissible error is fixed at ± 2 dB. This cavity-free procedure provides good reproducibility even at high frequencies.

3.2 DPOAE Measurements

3.2.1 Animal Preparation and Experimental Setup

General anesthesia is induced by an intraperitoneal (*i.p.*) injection of a mixture of Ketamine (Clorketam[®], 45 mg/kg) and Xylazine (Rompun[®], 5 mg/kg). Otoscopic examination has to be performed before the measurements in order to ensure the absence of infection, obstruction of the external auditory canal, or anomaly of the tympanic membrane. It is very important to stabilize the rat's body temperature at 38 °C throughout the whole procedure using a heating blanket (*see* **Note 6**). Additionally, the maintenance of a steady atmospheric pressure around the animal is critical because anesthetized animals cannot regulate the middle ear pressure and the tympanic tension strongly influences the DPOAE level (*see* **Note 7**).

On the bench of the soundproof chamber, place a laboratory stand with a horizontal rod and an articulated holder on which you can secure the DPOAE probe. This holder needs to be easily adjustable for the convenient placement of the probe into the ear canal of the animal. Be sure to have two small clamps linked to two elastics bands at your disposal. Place a 6-mm diameter audiometric plug on the probe.

3.2.2 Probe Placement

Place the anesthetized rat on its side (with the test ear facing up) on the heating blanket. Approach the probe until it touches the entrance of the ear canal. Use the small clamps to gently pull up the pinna while carefully inserting the probe microphone (Fig. 4). Note that it is better to pull up the pinna than to push down the probe.

3.2.3 Stimulation Parameters

Table 1 summarizes the parameters used for the primary frequencies $f1$, $f2$, and their respective intensities $L1$ and $L2$.

The DPOAE application should allow two types of paradigms, DPgram or input-output (I/O). The DPgram is a plot of DPOAE amplitude as a function of stimulus frequency with the stimulus level held constant. By contrast, the I/O consists of DPOAE amplitude as a function of the level of the stimulus for a given frequency. It is also convenient to be able to perform more complex protocols using a mix of DPgrams and I/Os, or to monitor the time course of a DPOAE response using a single frequency/level combination.

The optimal stimulation parameters yielding maximum DPOAEs have been defined experimentally by adjusting the intensity difference between $L1$ and $L2$ for Long-Evans ($L1 = L2 + 14$ dB) and Brown Norway ($L1 = L2 + 11$ dB) rats. They might differ

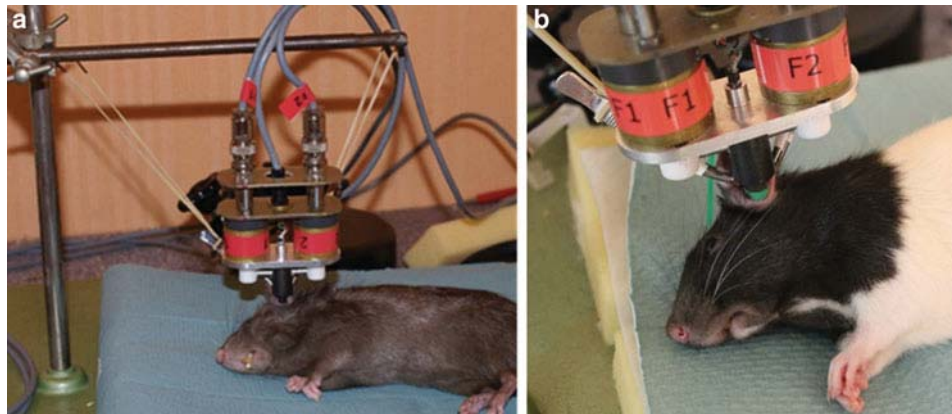


Fig. 4 Brown Norway (a) and Long-Evans (b) rats during DPOAE measurements

Table 1

Value of the main parameters used for DPOAE measurements in rats

Frequency ratio (f_2/f_1)	1.2
Level difference ($L_1 - L_2$)	11–14 dB depending on the strain
Frequency range (f_2)	3600–25,000 Hz
Intensity range (L_1)	25–70 dB

slightly in your specific conditions. Indeed, a value of 10 dB ($L_1 = L_2 + 10$ dB) is often mentioned in the literature. Alternatively, a symmetric protocol can be applied, in which the primary tones, f_1 and f_2 , are presented at equal levels ($L_1 = L_2$). The best practice is to try out several intensity parameters and to select the one that yields the optimal DPOAE amplitudes.

Our standard measurement protocol includes five frequencies: $f_2 = 3600$ Hz, $f_2 = 6000$ Hz, $f_2 = 9600$ Hz, $f_2 = 17,520$ Hz, $f_2 = 25,440$ Hz. The ratio f_1/f_2 is fixed at 1.2. Because the origin of DPOAEs on the organ of Corti is mainly located near the f_2 frequency and because DPOAE values depend primarily on the L_1 level, our DPOAE measurements are expressed and plotted as a function of the f_2 frequency and L_1 intensity.

3.2.4 DPOAE Signal Acquisition

The acoustic signal to be analyzed consists of three periodic signals:

- f_1 and f_2 are the sinusoidal signals emitted by the probe to generate DPOAEs in the inner ear.
- $f_{\text{DPOAE}} = 2*f_1 - f_2$ is the sinusoidal signal corresponding to the cubic product of acoustic distortion emitted by the inner ear and transduced by the middle ear (see **Note 8**).

These three signals are superimposed over a background noise. This background noise (or random noise) is produced by the ambient acoustics of the room and the endogenous noises of the animal. It mainly consists of low and medium frequencies. At high frequencies, electronic background noise is preponderant. Background noise can also contain periodic signals such as electromagnetic interference (telephone, chopper circuits on power lines). The measured signal is analyzed by fast Fourier transformation algorithms (real-time FFT) on Brüel & Kjær analyzers. The acquisition parameters, useful frequency bandwidth, and the number of lines of the spectrum are linked by the following formula:

$$N = 2.56 N_{\text{line}}$$

$$F_c = 2.56 F_{\text{span}}$$

$$dF = F_{\text{span}} / N_{\text{line}}$$

$$T = NF_c$$

with

N_{line}	Number of FFT lines composing the frequency spectrum
F_{span}	Maximum frequency of the frequency analysis bandwidth (Hz)
N	Number of acquisition block samples
F_c	Sampling frequency (Hz)
dF	Frequency resolution (Hz)
T	Duration of an acquisition block (s)

The type of average (temporal or spectral, linear, or exponential), the number of time blocks averaged as well as the temporal and frequency weights are adapted according to the type of measurement carried out: DPgram, I/O or follow-up of the time course.

The acquisition parameters common to the different types of measurement are as follows:

- Average acquisition blocks

The averages are calculated on the auto-spectrum. This corresponds to the average of the signal energy. This type of analysis provides a good representation of the total energy contained in the signal, including random signals composing the background noise, which is important for judging the signal/noise ratio of the measurement. A temporal average of the blocks would not allow a good evaluation of the background noise since only the signals in phase with the acquisition frequency of the blocks are correctly taken into account.

- Time weighting of acquisition blocks

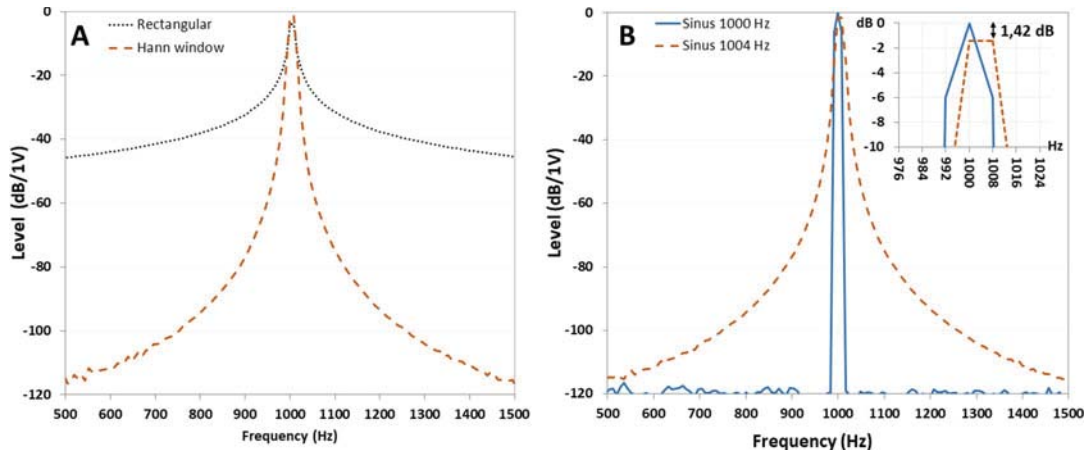


Fig. 5 FFT analysis with sampling frequency $F_e = 65,530$ Hz. Size and period of the time block: 8192 points/125 ms. Number of FFT lines: 3200. Frequency resolution: 8 Hz. (a) Effect of Hanning (dashed line) vs. rectangle (dotted line) windowing on a sinusoidal signal of 1 Vrms at 1004 Hz. (b) Picket fence effect on a sinusoidal signal of 1 Vrms at 1000 or 1004 Hz. Solid curve, signal at 1000 Hz or 125 periods per time block. Dashed curve, signal at 1004 Hz or 125.5 periods per time block

Hann windowing (Fig. 5a) is systematically used with an overlap of 66% between blocks. This analysis is well suited for continuous and pseudo-random signals. The Hann window eliminates the edge effects of the acquisition blocks, which gives good frequency resolution. The 66% overlap is optimal for the Hann window because it allows for uniform overall weighting without losing time data (Fig. 6). Without overlap, in case an event occurred at the junction of two blocks, its intensity would be attenuated and the contained information lost.

- Choice of frequencies

By picket fence effect, an FFT analysis can also cause an error related to digitization depending on the position of the true frequency of the phenomenon analyzed in relation to the frequency resolution of the FFT. With a Hann window, this error can be up to 1.4 dB (Fig. 5b). To avoid this problem, the DPOAE application adjusts the frequencies f_1 and f_2 so that the f_{DPOAE} is a multiple of the frequency resolution of the FFT.

Depending on the type of measurement performed, the bandwidth (sampling frequency), the number of lines (frequency resolution) and the number of averages are different. Table 2 summarizes the configurations suitable for obtaining an average value (DPgram or I/O) or monitoring the DPOAE responses over time.

The rejection of the FFT spectra disturbed by the background noise is carried out in real time. The DPOAE application rejects any acquisition according to the following criterion:

3.2.5 Specific Signal Processing Parameters

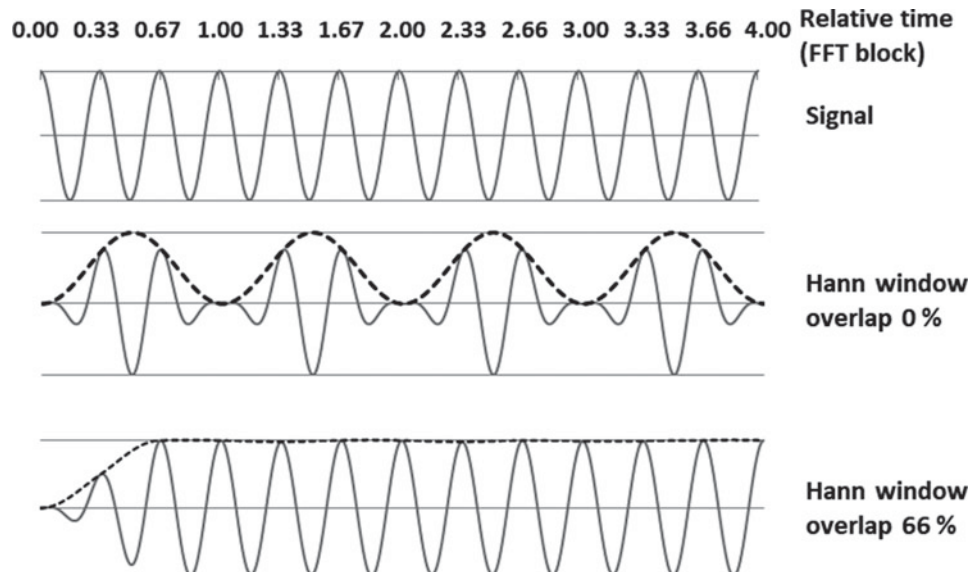


Fig. 6 Effect of overlap on the weight of time samples with Hann windowing

Table 2

Parameters of the FFT analysis for DPgrams, I/O measurements, and time course at $f_2 = 9600$ Hz

Parameter	DPgram or I/O	Time Course (at $f_2 = 9600$ Hz)
Sampling frequency	131,079 Hz	32,765 Hz
Bandwidth	0–51,200 Hz	0–12,800 Hz
Number of lines	6400	800
Frequency resolution	8 Hz	16 Hz
Duration of an elementary block	125 ms	62.5 ms
Number of means	4	22
Type of average	Linear	Linear
Duration for one recording	250 ms	500 ms

- If the difference between the DPOAE and the background noise is less than 3 dB, the emergence of the DPOAE signal compared to the noise is considered insufficient; as a result, the spectrum is not used for the calculation of the average DPOAE level. This difference is calculated by subtracting to the DPOAE value obtained on the FFT line “ n ” (corresponding to $2 \cdot f_1 - f_2$), the background noise calculated by averaging eight close FFT lines ($n - 6$ to $n - 3$ and $n + 3$ to $n + 6$). If 75% or more of the instantaneous spectra are rejected, the DPOAE application

indicates that the entire acquisition is unusable for determining the average DPOAE value reliably.

Spectra averaged over 250 or 500 ms are stored in memory. They can be plotted in waterfall or time / frequency diagrams. One frequency can also be extracted and displayed in the form of a two-dimensional time/intensity graph.

During DPgram or I/O measurements, the average DPOAE level is determined by the linear average of 20 average spectra of 250 ms (i.e., 80 instantaneous spectra), which corresponds to a 5-s acquisition time (excluding rejection). This duration is long enough to obtain a reliable average value.

3.3 DPOAE Analysis and Interpretation

3.3.1 Input/Output (I/O) Measurement

The I/O measurements allow the response of the cochlea at both low and medium intensities to be explored. This type of measurement provides a large amount of information, but requires a significant acquisition time per frequency, which has for consequence a limitation of the number of frequencies that can be measured. The example below shows how the choice of the level of stimulation can modify the measured effect and affect the interpretation.

Figure 7 shows the average I/O DPOAEs obtained for 17 untreated Brown Norway rats. These animals were measured at 6 and 24 months. The variations recorded correspond to the effect of aging on hearing performances called presbycusis. Presbycusis includes several mechanisms, including a loss of hair cells in apical and basal extremities of the organ of Corti. These results clearly illustrate that the measured age effect depends on the intensity of the primaries $L1$ and $L2$. The age-related DPOAE decrease would be of 3.2 dB for a measurement at $L1 = 50$ dB, whereas the difference would be close to zero with $L1 = 70$ dB. In this experiment, $L1 = 40$ dB was the lowest level usable due to the proximity of the background noise, notably for the 24-month measurements (*see Note 9*).

From our experience, DPOAEs measurements are more sensitive to damage to OHCs for $L1$ intensities below 60 dB. Therefore, DPgram measurements (*see below*) should preferably be carried out between 50 and 60 dB in order to obtain a good compromise between sensitivity to cochlear damage, the intensity of the measured signal, and the emergence from the noise floor.

3.3.2 DPgram Measurement

Performing a DPgram consists in recording DPOAEs at different $f2$ frequencies with the same level of stimulation. This procedure is commonly called DPgram because, graphically, it resembles a clinical audiogram. The DPgram is very convenient because it allows the exploration of a wide frequency range, and therefore a large portion of the organ of Corti, in a minimum amount of time.

Figure 8 presents different ways to display DPgrams obtained in control and exposed Brown Norway rats [16]. The treatment

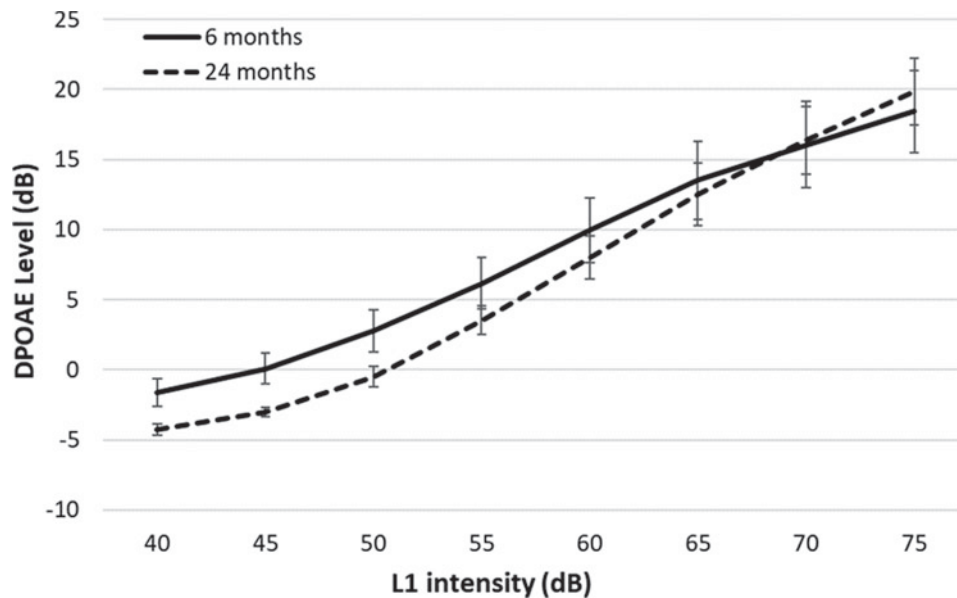


Fig. 7 DPOAE levels measured in a non-exposed group ($n = 17$) of Brown Norway rats at 6 and 24 months of age. $f_2 = 25,440$ Hz with $f_2/f_1 = 1.2$ and $L_1 = 40\text{--}75$ dB with $L_1 = L_2 + 11$ dB. The error bars represent the standard deviation

was a co-exposure to impulsive noise and to 600-ppm styrene (6 h/day, 5 days/week, for 4 weeks). The impulsive noise was an 8-kHz octave band burst lasting 10 ms at 112 dB, which was repeated every 15 s. This noise exposure was designed to ensure that each noise burst was absorbed by the cochlea without being reduced by the middle ear reflex. In terms of acoustic energy, the equivalent noise exposure was an 80 dB continuous noise during 8 h ($L_{EX,8h} = 80$ dB).

The DPgram (Fig. 8a, b) was performed with $L_1 = 55$ dB, which yields DPOAE levels between 15 and 25 dB SPL depending on the frequency considered. These levels are largely sufficient not to be disrupted by the noise floor, which is comprised between -6 and -1 dB SPL at high and medium frequencies, respectively. They are also sufficient to evaluate the temporary and/or permanent impact of exposure on the cochlea that will result in a decrease in DPOAE amplitudes. In the rat, the DPOAE magnitudes are relatively low at 3600 Hz (15 dB), compared to those obtained at higher frequencies. This occurs because the lower frequency limit measurable with otoacoustic emissions (about 3000 Hz) is close. It might also be convenient to plot the DPOAEs as differences from baseline data (Fig. 8c, d). The dashed line at the “0” on the ordinate indicates no change from baseline levels. One might notice that unexposed animals display a slight shift in DPOAE levels between 3600 and 9600 Hz (f_2). This is likely due to aging (*see Note 10*). To take into account this drift in DPOAE amplitudes

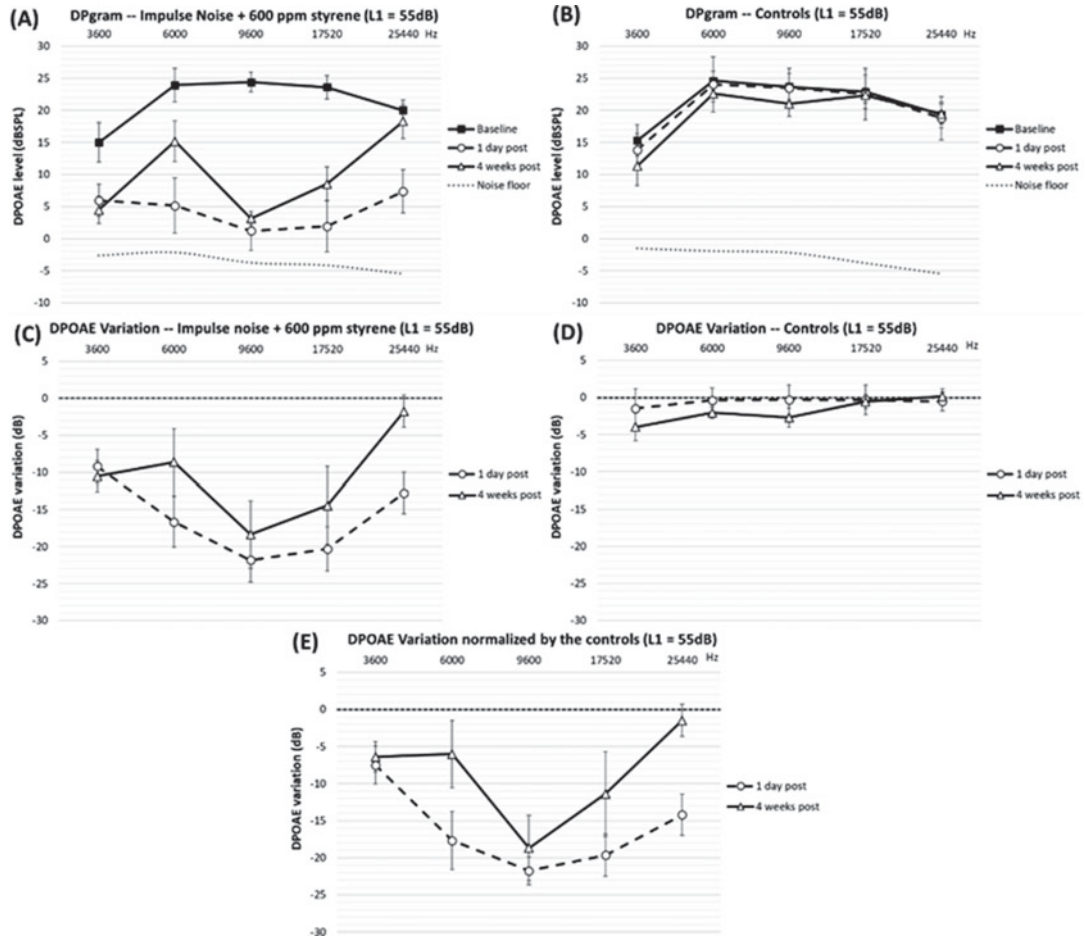


Fig. 8 DPgrams (a, b) and DPOAE variations (c, d) obtained in control rats (b, d) and rats exposed to impulse noise (octave band noise centered at 8 kHz, $L_{EX,8h} = 80$ dB) and 600-ppm styrene for 4 weeks (6 h/day, 5 days/week) (a, c). Exposure was followed by a 4-week recovery period. DPOAE measurements were performed with $L1 = 55$ dB before exposure (baseline) and 1 day (1 day post) and 4 weeks post-exposure (4 weeks post). DPgrams (a, b) display the raw DPOAE values at different time-points for a given experimental group. DPOAE variations (c, d) are defined as [post-exposure DPOAE – baseline] for a given experimental group. DPOAE variations normalized by the controls (e) are calculated as follows: [(post-exposure DPOAE_{exposed} – post-exposure DPOAE_{controls}) – (baseline DPOAE_{exposed} – baseline DPOAE_{controls})] and take into account the drift in DPOAE amplitudes observed in the control group

observed in the control group, one might consider normalizing the DPOAE value of the exposed animals by the values obtained in control animals (Fig. 8e) by doing the following calculation:

$$[(\text{post} - \text{exposure DPOAE}_{\text{exposed}} - \text{post} - \text{exposure DPOAE}_{\text{controls}}) - (\text{baseline DPOAE}_{\text{exposed}} - \text{baseline DPOAE}_{\text{controls}})].$$

The present analysis highlights the wide frequency range affected by the noise and styrene co-exposure although the

impulsive noise was filtered band-pass filtered between 5600 and 11,200 Hz (octave band noise 8 kHz). A clear permanent impairment was obtained at all tested $f/2$ frequencies but the highest, 25,440 Hz. Moreover, this DPgram analysis shows that the post-exposure recovery is highly dependent on the frequency considered (full at 25,440 Hz, limited at 9600 Hz).

4 Conclusion

DPOAE measurements are particularly attractive for assessing cochlear function in laboratory animals such as rats because they are objective, robust, easily measured and offer the possibility to test a wide range of frequencies within the species' hearing range. In addition, measuring DPOAEs in rats is fast, noninvasive, and can be performed repeatedly in the same subjects. The downside of DPOAE measurements in rats is the anesthesia, which might introduce in some cases an additional variable in the experiment. It is also of importance to keep in mind that, in rats, frequencies below 3000 Hz cannot be investigated using this method, and that it is necessary to maintain steady body temperature and atmospheric pressure. Despite these limitations, DPOAEs are extremely valuable because OHCs are very sensitive to chemical impairment, noise and oxidative stress, among other nuisances. For a thorough investigation of the health of the cochlea and central auditory pathways, additional auditory measurements can be performed, such as cochlear microphonic response and auditory brainstem-evoked responses (ABR). The cross analysis of these two measurements can help to localize the origin of the impairment. DPOAEs are specific to OHCs and can be measured even if IHCs are damaged [9, 17]. In contrast to DPOAEs, ABR thresholds are dependent on the function of the whole auditory system, i.e., OHCs, IHCs, and ascending auditory pathways and nuclei [18]. In addition, depending on your scientific question, you might consider complementing these functional techniques by cochlear histology, such as cytochrome c oxidase (COX) staining, scanning electron microscopy of the stereocilia bundles, or mid-modiolar sections of resin-embedded cochleae.

5 Notes

1. At the time this text is being written, two companies (Tucker-Davis Technologies and Intelligent Hearing systems) provide integrated commercial systems allowing DPOAE measurements up to 32–40 kHz in rodents. Although these systems have not been tested by the authors, they have been previously

used in several published studies [14, 19] and should be considered as viable and simple alternatives to our custom setup.

2. Ideally, DPOAE measurements should be performed within a double-walled sound-attenuation chamber to reduce background noise. The chamber should include a small double-pane window or a video camera for observing the animal during testing and should be large enough to stand inside it. In case such an equipment is not an option, you might consider a single-walled chamber, or tabletop sound booth. However, always attempt to maintain the noise floor as low as possible by eliminating/concealing all surrounding noise sources.
3. Using two different generators, each connected to a transmitter, reduces the risk of acoustic distortion generated by the equipment setup itself. Indeed, electrical and acoustic signal distortions easily occur in a measurement system. Such signal interferences, mixed to the physiological signal, might render the recording unusable. It is very important to ascertain that the signal is purely of physiological origin.
4. All the elements composing our prototype probe are glued together with cyanoacrylate glue so that the manipulation of the probe does not create any air-leak, which could modify sound-wave impedance. Electrical ground loops must be eradicated and shield must be thorough.
5. As an indication, the uncertainty widened to a level of confidence of 95% (widening factor 2.26) is 0.5 dB at 4000 Hz and 1.0 dB at 16000 Hz for the levels $L1$ and $L2$ of the primaries $f1$ and $f2$. The uncertainty increased to a 95% confidence level (2.26 enlargement factor) of the sound pressure measured by the probe's microphone is 0.9 dB at 4000 Hz and 1.8 dB at 16000 Hz.
6. When anesthetized, the body temperature of the rats drops rapidly. It is very important to maintain it stable using a heating blanket with a feedback probe (38°C). If the rat gets cold, DPOAE responses are profoundly reduced and become unusable. This occurs because the eardrum gets “depressed.” A “depressed” eardrum is easily visible by otoscopy as it gets very close to the ossicles and let them appear by transparency. In this case, warm up the rat for a few minutes and check that eardrum is slightly “inflated” towards you.
7. You should ascertain that there is no difference of pressure between the room where the animal has been anesthetized and the measurement booth. The anesthetized rat does not regulate the balance of pressures on either side of the eardrum. Performing a cochlear paracentesis [20] can solve the problem for a single measure of DPOAE, but is not recommended for

repeated measurements because of the risks of eardrum damage and infection.

8. When stimulated by a two-tone stimulus, the organ of Corti produces a family of distortion products having specific arithmetic relationships with the frequencies of the stimulus tones ($3*f_1 - 2*f_2$, $4*f_1 - 3*f_2$; $2*f_2 - f_1$; $3*f_2 - 2*f_1$, $4*f_2 - 3*f_1$; $f_2 - f_1$, etc.). However, the most robust and easily recorded in both laboratory animals and human is the DPOAE at $2*f_1 - f_2$.
9. With $L1 < 40$ dB (data not shown), the difference in DPOAE levels between 6 and 24 months decreases because DPOAE levels hardly emerge from background noise. Only rats with the highest DPOAEs can be measured with such a low $L1$, especially at 24 months. Therefore, the data are no longer representative of the group but only of the rats having the best hearing performances.
10. During an experimental protocol of DPOAE measurements with rats, it is important to carry out the measurements of a control group simultaneously with the exposed group. The two groups must be measured under the same conditions in order to be able to analyze any variations and thus reinforce the accuracy of these measurements.

References

1. Mahendrasingam S, Beurg M, Fettiplace R, Hackney CM (2010) The ultrastructural distribution of prestin in outer hair cells: a post-embedding immunogold investigation of low-frequency and high-frequency regions of the rat cochlea. *Eur J Neurosci* 31 (9):1595–1605. <https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2010.07182.x>
2. Fettiplace R (2017) Hair cell transduction, tuning, and synaptic transmission in the mammalian cochlea. *Compr Physiol* 7 (4):1197–1227. <https://doi.org/10.1002/cphy.c160049>
3. Jaramillo F, Markin VS, Hudspeth AJ (1993) Auditory illusions and the single hair cell. *Nature* 364(6437):527–529. <https://doi.org/10.1038/364527a0>
4. Strelioff D, Flock A (1984) Stiffness of sensory-cell hair bundles in the isolated Guinea pig cochlea. *Hear Res* 15(1):19–28. [https://doi.org/10.1016/0378-5955\(84\)90221-1](https://doi.org/10.1016/0378-5955(84)90221-1)
5. Khanna SM (2002) Non-linear response to amplitude-modulated waves in the apical turn of the Guinea pig cochlea. *Hear Res* 174 (1–2):107–123. [https://doi.org/10.1016/S0378-5955\(02\)00645-7](https://doi.org/10.1016/S0378-5955(02)00645-7)
6. Howard J, Hudspeth AJ (1988) Compliance of the hair bundle associated with gating of mechanoelectrical transduction channels in the bullfrog's saccular hair cell. *Neuron* 1 (3):189–199. [https://doi.org/10.1016/0896-6273\(88\)90139-0](https://doi.org/10.1016/0896-6273(88)90139-0)
7. Kemp DT (2002) Otoacoustic emissions, their origin in cochlear function, and use. *Br Med Bull* 63:223–241. <https://doi.org/10.1093/bmb/63.1.223>
8. Subramaniam M, Salvi R, Spongr V, Henderson D, Powers N (1994) Changes in distortion product otoacoustic emissions and outer hair cells following interrupted noise exposures. *Hear Res* 74(1–2):204–216
9. Trautwein P, Hofstetter P, Wang J, Salvi R, Nostrand A (1996) Selective inner hair cell loss does not alter distortion product otoacoustic emissions. *Hear Res* 96(1–2):71–82
10. Hofstetter P, Ding D, Powers N, Salvi RJ (1997) Quantitative relationship of carboplatin dose to magnitude of inner and outer hair cell loss and the reduction in distortion product otoacoustic emission amplitude in chinchillas. *Hear Res* 112(1–2):199–215

11. Emmerich E, Richter F, Reinhold U, Linss V, Linss W (2000) Effects of industrial noise exposure on distortion product otoacoustic emissions (DPOAEs) and hair cell loss of the cochlea—long term experiments in awake Guinea pigs. *Hear Res* 148(1–2):9–17
12. Shera CA (2004) Mechanisms of mammalian otoacoustic emission and their implications for the clinical utility of otoacoustic emissions. *Ear Hear* 25(2):86–97. <https://doi.org/10.1097/01.aud.0000121200.90211.83>
13. Martin GK, Stagner BB, Lonsbury-Martin BL (2006) Assessment of cochlear function in mice: distortion-product otoacoustic emissions. *Curr Protoc Neurosci*. Chapter 8: Unit8.21C–Unit28.21C. <https://doi.org/10.1002/0471142301.ns0821cs34>
14. Sheppard AM, Zhao DL, Salvi R (2018) Isoflurane anesthesia suppresses distortion product otoacoustic emissions in rats. *J Otol* 13(2):59–64. <https://doi.org/10.1016/j.joto.2018.03.002>
15. Robles L, Ruggero MA (2001) Mechanics of the mammalian cochlea. *Physiol Rev* 81(3):1305–1352. <https://doi.org/10.1152/physrev.2001.81.3.1305>
16. Venet T, Campo P, Thomas A, Cour C, Rieger B, Cosnier F (2015) The tonotopicity of styrene-induced hearing loss depends on the associated noise spectrum. *Neurotoxicol Teratol* 48:56–63. <https://doi.org/10.1016/j.ntt.2015.02.003>
17. Le Calvez S, Avan P, Gilain L, Romand R (1998) CD1 hearing-impaired mice. I: distortion product otoacoustic emission levels, cochlear function and morphology. *Hear Res* 120(1–2):37–50. [https://doi.org/10.1016/s0378-5955\(98\)00050-1](https://doi.org/10.1016/s0378-5955(98)00050-1)
18. Kujawa SG, Liberman MC (2009) Adding insult to injury: cochlear nerve degeneration after “temporary” noise-induced hearing loss. *J Neurosci* 29(45):14077–14085. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2845-09.2009>
19. Dong W, Stomackin G, Lin X, Martin GK, Jung TT (2019) Distortion product otoacoustic emissions: sensitive measures of tympanic-membrane perforation and healing processes in a gerbil model. *Hear Res* 378:3–12. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2019.01.015>
20. Bergin M (2013) Systematic review of animal models of middle ear surgery. *World J Otorhinolaryngol* 3(3). <https://doi.org/10.5319/wjo.v3.i3.71>

Annexe 6 : Article VENET et al. 2022

Article soumis le 28/3/2022 à *International Journal of Audiology*

	SUBMISSION	TITLE	JOURNAL	STATUS
	 228431562	Parameters influencing auditory fatigue amon...	International Journal of Audiology	Out for Review
1	SUBMISSION 			
2	PEER REVIEW 			
	22 April 2022	With Editor		
	27 April 2022	Out for Review		
		...		
		Final Decision		

Parameters influencing auditory fatigue among professionals working in the amplified music sector: noise exposure and individual factors

Thomas Venet^{a,b*}, Aurélie Thomas^a, Lise Merlen^a, Stéphane Boucard^a, Ludivine Wathier^a, Aurélie Remy^a, Benoit Pouyatos^{a,b}

^a *Institut National de Recherche et de Sécurité, Rue du Morvan, CS 60027, Cedex, 54519 Vandoeuvre, France.*

^b *DevAH EA 3450 – Développement, Adaptation et Handicap, Régulations cardio-respiratoires et de la motricité-Université de Lorraine, 54500 Vandoeuvre, France.*

* thomas.venet@inrs.fr

Objective: Hearing disorders are highly prevalent among professionals in the music sector, who are frequently exposed to sound levels above 100 dB(A). By assessing auditory fatigue, situations that are deleterious for hearing could be identified, allowing the deployment of preventive measures before permanent hearing loss occurs. However, apart from the daily dose of noise, little is known about the factors contributing to auditory fatigue during occupational exposure. The objective is to determine the noise exposure parameters and individual characteristics most influencing auditory fatigue during complex noise exposure.

Design: Auditory fatigue was defined as variations of both pure tone auditory and acoustic reflex thresholds during the workday. Noise exposure was monitored continuously and information on the volunteers was gathered using a questionnaire.

Study sample: The population consisted of 51 adult volunteers exposed to music (sound, light or stage technicians, security agents, barmen), including 26 unexposed controls (administrative staff).

Results: Auditory fatigue was correlated with sound energy and its distribution over time. Hearing thresholds at rest also had an impact on auditory fatigue.

Conclusion: At constant energy, stable noise levels tend to increase auditory fatigue, whereas noise instability during the day allows partial recovery, even with short-lived "quiet" periods.

Key words

Auditory fatigue ; Acoustic reflex ; Hearing threshold ; Noise exposure ; Amplified Music

Introduction

Exposure to loud noises is frequent, both during leisure pursuits and at work, and can pose a serious risk to hearing. Hearing performance often degrades progressively over months or years of repeated exposure to noise. In the professional context, daily exposure limits (OSHA 90 dB(A) in the USA, 87 dB(A) in Europe) are defined by the regulations to reduce the impact of noise on hearing. However, even below these limits, daily exposure to noise at 85 dB(A) causes "auditory fatigue", a complex phenomenon correlated with a temporary increase in hearing thresholds (Venet et al, 2014).

Auditory fatigue is a temporary decrease in hearing performance following exposure to noise as a result of multiple physiological changes occurring at various levels in the auditory system. Among the main structures showing signs of auditory fatigue, a loss of thickness of the organ of Corti has been observed due to alterations to the pillar cells (Nordmann et al, 2000; Tonndorf, 1980). These temporary alterations also lead to structural changes in the stereocilia. In chinchillas, Nordmann et al., 2000, observed that these structures could take up to 14 days to recover. A second phenomenon is shortening of the supracuticular portion of the stereocilia rootlets that could decrease the rigidity of the ciliary tufts. This modification locally degrades cochlear sensitivity (Liberman, 1987). In addition to structural modifications, the cochlear amplifier formed by the outer hair cells (OHC) is affected by the reduction of the difference in electric potential between the endolymphatic and intracellular compartments, thus affecting the electromotility of the OHC (Muñoz et al, 1995). A major phenomenon implicated in the temporary decrease in auditory performance is the excitotoxicity leads to

swelling of the synaptic space or the body of the inner hair cells (IHC) themselves (Liberman & Dodds, 1987), and may disconnect afferent neuronal endings (Puel et al, 1998). Some authors have reported synaptogenesis under the IHCs following excitotoxic shock (Puel et al, 1998), whereas other authors found this process to be non-existent or marginal (Kujawa & Liberman, 2009; Lin et al, 2011). Neuronal deafferentation of apparently normal IHC particularly occurs in response to repeated exposure to moderate-intensity sounds. This process is one of the root causes of the phenomenon known as hidden hearing loss – when the hearing threshold remains normal despite peripheral synaptopathy and/or neuropathy. Hidden hearing loss has been demonstrated both in animals (Kujawa & Liberman, 2009) and in humans (Viana et al, 2015; Wu et al, 2019). This type of neuropathy primarily targets afferent nerve fibers that have low spontaneous firing rates, which partly explains why the auditory threshold remains stable despite the nerve damage.

Accumulation of auditory fatigue may have a delayed impact on the auditory threshold, causing early presbycusis in young adults (Fernandez et al, 2015; Viana et al, 2015). Consequently, auditory fatigue should not be considered benign, as it reflects trauma to the auditory system and may lead to hidden hearing loss. For these reasons, it is relevant to measure auditory fatigue with a view to preventing hearing loss. Indeed, auditory fatigue can be used as an early and objective means to assess the safety of the acoustic environment for a given worker and /or task.

In this article, we examine the characteristics of sound exposure that have a positive or negative influence on auditory fatigue factors, with the aim of identifying relevant improvements to help prevent occupational hearing loss.

This study was conducted among workers in the live music sector, with observation of “normal” workdays that included a concert. Noise levels were measured by dosimeters worn throughout the work shift, and workers' hearing was checked at the beginning and end of the

day using two distinct approaches.

Subjective audiometric thresholds were determined by pure tone air conduction audiometry (PTA), which is the internationally-recognized tool to screen for noise induced hearing loss (NIHL). The second test used the EchoScan procedure, which provides an objective measure of auditory fatigue based on the change in the threshold of the efferent acoustic reflex. This reflex is primarily linked to the activity of the middle ear reflex.

Regression models were used to identify correlations between exposure parameters, volunteer's individual characteristics, and auditory fatigue recorded by either PTA or EchoScan. The factors most influencing auditory fatigue are listed and discussed in terms of prevention of auditory risks in the workplace.

Material & methods

Study population

The study protocol was approved by the French national ethics committee (ID-RCB 2018 - A02832-53). Participants were recruited from entertainment venues. The cohort consisted of 77 volunteers and was divided into two groups: a group of 43 workers exposed to amplified music, and a control group of 24 participants performing administrative or supervisory tasks in the establishments visited. The control group was not exposed to amplified music on the day of the measurement. The average age of the volunteers exposed to music was 35.1 years, whereas that of the controls was 36.1 years.

Information on past exposure to noise or ototoxic agents, as well as history of hearing disorders was collected for all participants using a questionnaire (see supplementary material).

Inclusion and exclusion criteria

The exclusion criteria were the following: ear infection, embedded earwax, ear, nose and throat surgery, or use of medical treatment that could affect hearing performance. Individuals

with a hearing threshold greater than 35 dB HL at 4000 Hz or an acoustic reflex threshold above 92 dB HL were also excluded.

The questionnaire was filled out by 77 individuals. Ten did not meet the inclusion criteria or were unavailable for the measurement. At the end of the shift, for one person, PTA but not EchoScan measurements were possible. Consequently, 67 PTA measurements and 66 EchoScan measurements were performed at the beginning and end of the shift (one person was measured with PTA but not EchoScan).

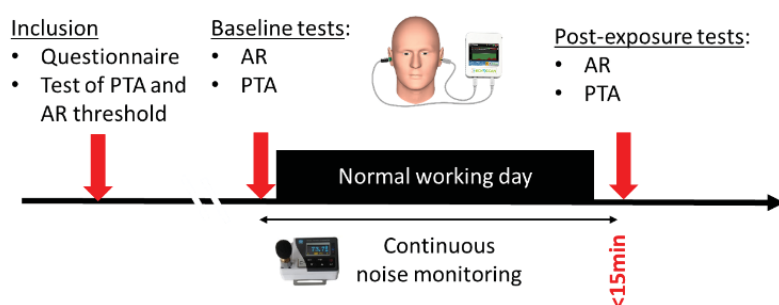


Figure 1: Protocol followed by each volunteer. AR: acoustic reflex; PTA: Pure Tone Audiometry

Measurement of noise exposure

Volunteers were provided with a Class 1 noise dosimeter (AVS 5910-R, Hangzhou Aihua Instruments) which was positioned on one shoulder for use throughout the day (figure 1). Participants were told to work “as usual” without further instructions.

Recordings were analyzed over 1-s equivalent levels (Leq_{1s}) with A-, C-, Z-weighting, or filtered by octave bands from 63 to 16000 Hz. The Leq_{1s} analyses were used to calculate the sound levels for various periods of the working day: the entire day, the last 3 hours, the last 2 hours, and the last working hour. These periods were used to assess the relevance of the noise indicators at the end of the volunteers' exposure. The 10, 50 and 90% quantiles, as well as the kurtosis were calculated for these Leq to determine how sound levels were distributed over these periods.

The C-weighted peak sound levels were analyzed to determine the number of times the thresholds set at 135 was exceeded according to the French Decree 2006-892 of 19/01/2006. In complement to the indicators of sound energy (Leq) and its distribution, the kurtosis of the temporal waveform of the noise was calculated according to the methodology applied by Fuente et al, 2018. A geometric mean was used to determine the average kurtosis over the different periods. Kurtosis were calculated for each octave band (63 to 16000 Hz) and for the overall unweighted signal.

The list of 158 noise exposure variables is given in supplementary material.

Measurement of Auditory fatigue

Participants' hearing performance was assessed by two types of tests: pure tone air conduction audiometry (PTA) and the acoustic reflex threshold measured using EchoScan. These tests were performed three times for each volunteer (figure 1). Auditory fatigue was defined as the difference between post-exposure and baseline tests.

Threshold of acoustic reflex

The acoustic reflex was measured with the ECHOSCAN[®] apparatus (Echodia, Mazet-Saint-Voy, France) in accordance with IEC60645. This device measures the acoustic reflex threshold by observing the change in amplitude of the distortion product of otoacoustic emissions (DPOAE) caused by contralateral sound stimulation (800 Hz band noise centered on 1000 Hz) with a 3-dB increasing step from 65 dB HL up to a maximum of 98 dB HL (Venet et al, 2012).

This procedure provides a quick and objective measure of the acoustic reflex, and does not require a perfectly silent room. Its sensitivity to auditory fatigue caused by occupational noise exposures has been demonstrated to be better than that of PTA (Venet et al, 2014). This improved sensitivity can be explained by two separate mechanisms:

1) the auditory reflex is not influenced by retro-cochlear compensation mechanisms because the reflex arc does not involve the dorsal cochlear nucleus or inferior colliculus;

2) when sound exposure causes temporary variations in the auditory threshold, a decrease in the number of fibers with low firing rates compared to fibers with high firing rates can be observed (Furman et al, 2013). As the reflex is measured at supra-threshold levels, it primarily solicits fibers with low firing rates (Liberman, 1988). Consequently, this procedure appears ideally suited to measuring auditory fatigue.

The EchoScan procedure was developed to focus on the middle ear reflex (i.e., stapedial reflex), but activity of the olivocochlear reflex cannot be totally excluded. In individuals with normal hearing, the average threshold for the stapedial reflex measured by the reference clinical examination (admittance at 226 Hz) is 85 dBHL (Dobie & Hemel, 2004). In humans, efferent medial olivocochlear effects predominate between 50 and 60 dB. Above 70 dB, the middle ear reflex largely prevails, with little input from the medial olivocochlear loop (Guinan et al, 2003). The mean value of the acoustic reflex threshold measured by the EchoScan procedure in this study was 83 dBHL, which confirms that the reflex measured was indeed the stapedial reflex.

The sound stimuli used to trigger the acoustic reflex were limited to 98 dBHL. If the reflex was not triggered at that level, the threshold level was set to 101 dBHL, i.e., one step (3 dB) above the maximum value. These censored values affected 5 of the 43 exposed volunteers.

Pure tone audiometry

Pure tone audiometry measurements were carried out with the ECHOSCAN® apparatus integrating the audiometry function in line with IEC60645 standards. The same device was used for pre- and post-exposure measurements for each volunteer. PTA was measured by an experimenter using the manual mode, with pulsed sound stimulations at frequencies of 250, 500, 1000, 2000, 4000, 6000 and 8000 Hz. These measurements were performed in a room

where the sound level was below 40 dB(A). The audiometers were equipped with THD39 headphones (Telephonics, Farmingdale, NY, USA) fitted with H7A ear-muffs (Peltor™, 3M, Mapplewood, MN, USA). The protective muffs made it possible to carry out PTA measurements in good conditions, with residual noise under the helmet always lower than 30 dB(A) (ambient noise under 40 dB(A)).

To limit the duration of the tests, only one ear was investigated – the ear receiving contralateral sound stimulation when triggering the auditory reflex.

Statistical analysis

All statistical analyses were performed using STATA® v16 software (StataCorp, College Station, TX, USA).

Data analysis

A one-way ANOVA was applied to explore differences between control and exposed workers. The results of these tests are expressed as $[F(df_b, df_i) = F_{ratio}; p \text{ value}]$, where df_b is the number of between-group degrees of freedom, df_i is the number of residual degrees of freedom, and F_{ratio} is the ratio of the sum of between-group root mean square (RMS) divided by the sum of intra-group RMS. For PTA with repeated measurements at different frequencies for the same volunteer, a mixed model was applied with fixed effect factors (frequency, group) and a random effect factor (volunteer). The threshold for statistical significance was set to 95%. The standard deviation (Sd) is used as an indication of the variability of data distribution.

Model of auditory fatigue

Linear regression models were applied to investigate the factors influencing auditory fatigue. Two types of explanatory variables were used: variables providing information on the volunteer (answers to the questionnaire and auditory performance at the beginning of the shift) and those resulting from the analysis of noise exposure as described above. Due to the

large number of explanatory variables produced by the noise exposure (158) compared to the number of observations (67), a factorial analysis was performed before applying the regression model. The number of noise exposure factors retained was determined by the decay of the eigenvalues of the factors (discontinuity of the eigenvalue differences between factors n and $n+1$). Factors were subsequently optimized by applying an oblique rotation. Interpretation of the factors was based on an analysis of the factor loadings of the initial variables for each of them. A factor loading greater than or equal to 0.6 was set as the threshold for high correlation between initial variables and factors.

Linear regression models were then applied to the fatigue levels measured, plotted against the exposure factors, completed by the volunteers' descriptive variables. The auditory measurement at the beginning of the shift associated with the calculation of fatigue was systematically removed during model construction, because it was associated with the calculation of fatigue. In the framework of this exploratory modeling to investigate the parameters influencing auditory fatigue, the variables with p values below 0.1 were retained. Model performance was assessed based on analysis of the regression coefficients and by analyzing the Root Means Square Error (RMSE) calculated by cross-validation. In the cross-validation phase, model coefficients were recalculated by removing the individual observations sequentially. The residual associated with the removed observation was then calculated, and all the residuals were combined to calculate the RMSE.

Results

Study population

The questionnaire was used to collect information on the 77 volunteers and their working conditions. Among the 51 volunteers exposed to music, 34 worked in sound or light management and 7 were stage technicians. These 41 professionals were named the “technical”

group (table 1). The 10 other volunteers exposed to the music were security agents, bartenders, or stage managers; these volunteers were called the “service” group. Exposed volunteers worked 3 days per week on average, but the “technical” volunteers worked longer (8.5 ± 2.5 h) than those in the “service” group (6.0 ± 2.0 h). The average duration of exposure to music measured in the course of our observations was 3.2 ± 1.5 h for the “technical” group versus 2.5 ± 1.0 h for the “service” group.

The proportion of people equipped with individual hearing protection was 55% for both exposed and control groups. Table 1 presents the data gathered through the questionnaire on the rate of use of hearing protections available to volunteers when exposed to loud music (concert). A majority of volunteers indicated that they used their hearing protections “sometimes”. These percentages, calculated from the volunteer’s responses to the questionnaire, should nevertheless be considered with care because, during our interventions, we never witnessed any volunteer systematically wearing hearing protectors in the presence of loud music. Only two volunteers in the exposed group wore a protection during part of the day. Nevertheless, 90% of the volunteers in the exposed group declared that their professional activity constituted a risk for their hearing.

Group		Never	Sometimes	Always
Exposed group	n=51	17%	62%	21%
	Technical group n=41	14%	63%	23%
	Service group n=10	29%	57%	14%
Control group	n=26	9%	55%	36%

Table 1: Answers to the question “How often do you wear your hearing protection?” Response options: Never, Sometimes, Always

Hearing problems reported

Table 2 shows the responses to the questions about hearing. These questions were contextualized by the experimenter.

Tinnitus following a sound exposure, such as a concert, was the only category of disorders for which the number of reports was significantly different between the exposed and control groups. Post-exposure tinnitus was also the most frequently reported hearing disorder, with an incidence of up to 71% among the “technical” group. Among this group, nearly one in two volunteers also had chronic tinnitus. Tinnitus was also common in the control group. Thus, despite an average age of about 35 years, about a third of the participants declared that they had problems understanding in a noisy environment, which is one of the earliest indications of mild hearing loss. Although this is the same proportion of volunteers with chronic tinnitus, it did not relate to the same people, as 80% of the volunteers with chronic tinnitus declared that they had no problems with perception in noise.

experimenter.

<i>Group</i>	<i>Hearing problem</i>	<i>Problem with comprehension in noise</i>	<i>Tinnitus after noise exposure</i>	<i>Chronic tinnitus</i>	<i>Hyperacusis</i>	<i>Diplacusis</i>	<i>Hearing distortion</i>
<i>Exposed</i>	45%	37%	59%	35%	10%	2%	6%
<i>Service</i>	20%	10%	10%	0%	0%	0%	0%
<i>Technical</i>	51%	44%	71%	44%	12%	2%	7%
<i>Control</i>	27%	35%	23%	23%	12%	0%	0%
<i>All volunteers</i>	39%	36%	47%	31%	10%	1%	4%

Table 2: Self-declared hearing problems recorded in responses to the questionnaire.

Hearing performance at rest

The auditory perception and auditory reflex thresholds were measured when the volunteer arrived at work. The volunteers' hearing at that time was considered their baseline level.

Auditory measurements were only analyzed for the volunteers who completed the entire protocol, i.e. 67 people, 43 of whom were exposed to amplified music.

The hearing thresholds measured for the control group were slightly lower than those for the exposed group (Figure 2). The mixed model indicated that the fixed frequency factor is

significant ($p < 0.001$), but not the group factor or the interactions. There was also no significant difference between groups for the reflex threshold measurements. Based on these considerations, the auditory performances of the two groups were equivalent at the beginning of the work shift.

Between 4000 and 8000 Hz, the audiometric thresholds for both groups were below the median value indicated in the ISO7029 norm, which defines the statistical distribution of hearing thresholds as a function of age and gender .

function of age and gender .

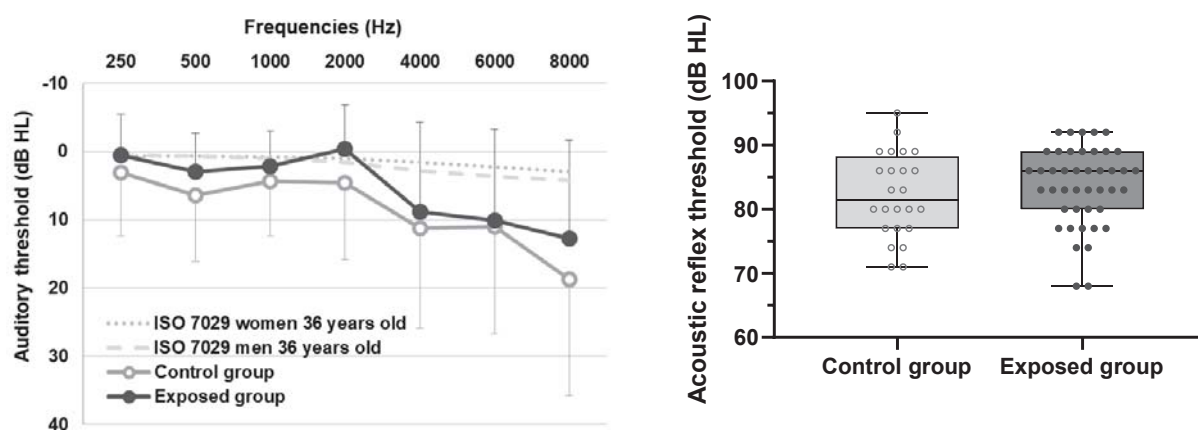


Figure 2: Auditory performance at the beginning of the day for the exposed and control groups. A) Baseline pure tone audiometry thresholds compared to reference values indicated in ISO7029 (2017) for 36-year-old men and women. Data are expressed as mean $\pm$ standard deviation. B) Threshold of the auditory reflex. Each point represents one volunteer's reflex threshold. Box 25th to 75th percentiles, whiskers min to max.

Noise exposure

Table 3 summarizes the noise exposure based on the standard indicators used in occupational noise regulations (L_{Aeq} , L_{Ceq} , $L_{EX,8h}$).

Group	Duration of measurement h:mm	L_{Aeq} dB(A)	L_{Ceq} dB(C)	$L_{EX,8h}$ dB(A)	$L_{EX,8h}$ max dB(A)	$L_{EX,8h}$ min dB(A)
Exposed	7:44 $\pm$ 2:55	87.9 $\pm$ 5.9	97.8 $\pm$ 7.1	87.7 $\pm$ 5.7	96.5	73.9
Service	6:12 $\pm$ 2:05	89.6 $\pm$ 4.6	99.9 $\pm$ 7.1	88.5 $\pm$ 4.3	93.4	81.0
Technical	8:09 $\pm$ 3:00	87.4 $\pm$ 6.1	97.3 $\pm$ 7.1	87.5 $\pm$ 6.1	96.5	73.9
Control	6:27 $\pm$ 1:28	66.4 $\pm$ 4.4	72.3 $\pm$ 3.9	65.4 $\pm$ 4.9	74.8	57.6

Table 3: Duration and average levels of A- and C-weighted noise exposure. The daily noise exposure ($L_{EX,8h}$) was calculated according to the European regulations (3-dB exchange rate) using the formula $L_{EX,8h} = LA_{eq} + 10 \log(\text{Duration}/8h)$. Data are expressed as mean $\pm$ standard deviation.

The difference in sound level measured using A and C weightings was 6 dB for the control group and 10 dB for the exposed group. This difference reflects the high sound energy emitted by the music broadcasting systems used during concerts. For volunteers exposed to amplified music, the average daily noise exposure was slightly above the European regulatory limit value of 87 dB(A). This average value masks a vast diversity of sound exposure profiles. In the technical group, for example, daily noise exposures ranged from 74 dB(A) – for a sound engineer during a folk concert – to 96.5 dB(A) – for another sound engineer during a rock concert. Statistical analysis shows that the daily sound exposure correlated with the musical genre ($F(5,37)=15.7$; $p<0.001$; see Table 4) but not on the activity performed (sound engineer, light technician, stage technician, general manager, security guard, or bartender). Thus, the average daily noise exposure for sound engineers ($n=14$) and light technicians ($n=16$) was 86.7 ± 6.7 dB(A) and 88.7 ± 5.0 dB(A), respectively.

The detailed analysis of noise exposure highlighted the overriding contribution of amplified music compared to all the other noise sources for the volunteers in the exposed group. Table 4 shows the average sound levels recorded for the different musical styles encountered in this study. The levels reported include all exposure to music on the day of observation, i.e., sound checks, rehearsals, and concert. The difference between daily noise exposure to music alone and exposure to all sound sources was less than 0.5 dB for rock, rap, blues, and pop. Thus, in these situations, noise exposure was almost exclusively due to the music.

Music style	Mean level of music dB(A)	Daily noise exposure due to music dB(A)	Overall daily noise exposure
Rock n=8	97.0 $\pm$ 4.5	92.5 $\pm$ 2.7	92.8 $\pm$ 2.7
Rap n=3	95.7 $\pm$ 2.6	92.8 $\pm$ 2.1	92.9 $\pm$ 2.2
Blues n=5	94.5 $\pm$ 0.5	91.6 $\pm$ 1.8	92.3 $\pm$ 1.8
Pop n=7	91.0 $\pm$ 2.6	86.7 $\pm$ 1.4	87.2 $\pm$ 1.3
Jazz n=9	90.6 $\pm$ 6.9	86.0 $\pm$ 6.9	86.7 $\pm$ 6.2
Folk n=11	85 $\pm$ 1.8	78.2 $\pm$ 3.2	80.6 $\pm$ 2.2

Table4: Noise exposure levels for 43 volunteers depending on the style of music. Average noise level of music (sound check, rehearsal, concert) and equivalent daily exposure compared to overall daily noise exposure.

Auditory fatigue

The comparison between exposed and control groups indicated a significant difference in auditory fatigue measured by PTA and EchoScan (table 5). The increase in the acoustic reflex threshold was 6.9 ± 3.8 dB in the exposed volunteers and 0.3 ± 2.5 dB in controls. Mean increase in hearing threshold measured by PTA in control subjects were less than or equal to 1 dB at all frequencies. In exposed volunteers however, the audiometric threshold was increased by up to 5.9 ± 6.7 dB at 4000 Hz, the most affected frequency. The two indicators, variation of acoustic reflex threshold (Δ Reflex) and variation of audiometric threshold at 4000 Hz (Δ PTA_{4k}), were therefore used to determine the factors influencing auditory fatigue.

Group	Δ PTA							Δ Reflex
	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	6000 Hz	8000 HZ	
Exposed	1.3 ± 4.6 dB	2.1 ± 0.7 dB	2.2 ± 5.3 dB	2.9 ± 4.5 dB	5.9 ± 6.7 dB	1.6 ± 7.8 dB	1.9 ± 8.2 dB	6.9 ± 3.8 dB
Control	-0.4 ± 3.6 dB	-0.8 ± 0.9 dB	0.0 ± 4.2 dB	-0.2 ± 5.2 dB	0.2 ± 3.8 dB	1.0 ± 5.1 dB	-3.3 ± 6.7 dB	0.3 ± 2.5 dB
Significance F(dfb,dfi)	n.s.	p<0.01 F(1.65)=7.2	n.s.	p<0.05 F(1.65)=6.5	p<0.001 F(1.65)=15	n.s.	n.s.	p<0.001 F(1.64)=57.5

Table 5: Mean and standard deviation values for hearing threshold variations during the day measured by pure tone audiometry (Δ PTA) and EchoScan (Δ Reflex). Significance was estimated for Exposed vs Control groups by one-way ANOVA.

Analysis of factors contributing to auditory fatigue

A factor analysis was run on 158 variables characterizing the volunteers' noise exposure. Five factors accounting for 83% of the variance data were retained to analyze noise exposure.

Table 6 presents the characteristics of these factors after oblique rotation.

Factor number	Factor description	Proportion of variance %	Number of correlated variables	Description of variables
1	Sound energy	58	83	Leq (A, C and Z weightings) and filtered Leq (octave bands 63 to 16000 Hz) over all periods. Exponential time weighting levels ¹ . Daily noise exposure ² .
2	Large band audio stability	35	20	Audio distribution (kurtosis) over a broad frequency range (250 to 4000 Hz).
3	Sound energy distribution	12	15	Distribution of Leq _{1s} over long periods. Differences in quantiles have positive factor

				loadings whereas the kurtosis of Leq_{1s} have negative loadings.
4	Audio stability at extreme frequencies	6	6	Audio distribution (kurtosis) on octave bands 63 Hz and 16000 Hz.
5	Sound energy distribution for the last hour	3	8	Distribution of Leq_{1s} over long periods like for Factor 3, but only in the last hour of noise exposure.

¹ exponential weighting with time constants of 60 or 180 min

² $L_{EX,8h}$ calculated according to European Directive, 2003

Table 7: Description of noise exposure factors contributing to auditory fatigue

Factor 1 represents the sound energy of the exposure, which is the most important factor, accounting for 58% of the variance in noise exposure. All the other factors are associated with the distribution of this sound energy, whether contributing to the stability of the digitized audio signal (48 kHz), for Factors 2 and 4, or to fluctuations of the Leq_{1s} , for Factors 3 and 5.

Modeling the fatigue measured by pure tone audiometry

The model described hereafter aimed to explain the variation of the audiometric threshold at 4000 Hz measured by PTA based on the following explanatory variables: the 5 exposure factors and 16 variables describing the volunteers.

In the ΔPTA_{4k} model, gender was a significant parameter. Women would develop a lower threshold variation than men. However, as previously mentioned, among our study population, very few women were exposed to high noise levels (exposed group) whereas the male-female distribution was more balanced among the volunteers exposed to low levels. When equivalent models were constructed with data for only men or women, the Factor 1 coefficient (Sound energy) was very different for these two sub-populations. There is thus an interaction between gender and sound energy (Factor 1) which induces a bias in the model. Consequently, gender cannot be analyzed in isolation. This effect is due to the volunteers recruited, and reflects the unbalanced male/female ratio among the exposure levels in the exposed group. Not only was there a significantly smaller number of women in the exposed

group, the women exposed to noise were among the volunteers with the lowest daily noise exposure.

A second model was therefore constructed omitting the gender variable (table 7). The model is very similar to the one including gender (same variables, equivalent coefficients). The regression coefficient is slightly lower (0.39 *versus* 0.45) without gender and the RMSE is slightly higher (5.4 dB *versus* 5.2 dB).

Parameters	Coefficient	Standard error	Significance (p value)	Confidence intervals 95%	
Sound energy (Factor 1)	3.67	0.63	<0.001	2.41	4.93
Hearing threshold at 6000 Hz	-0.11	0.04	0.018	-0.20	-0.02
Sound energy distribution (Factor 3)	-1.17	0.63	0.07	-2.72	-0.24
Constant	5	0.78	<0.001	3.46	6.55

$R^2=0.39$ Adjusted $R^2=0.37$

RMSE=5.4 dB

Table 7: Linear regression modeling of hearing threshold variation at 4000 Hz based on 67 measurements without specifying gender. R^2 : regression coefficient. R^2 adjusted: regression coefficient adjusted for the number of model parameters. RMSE: root mean square error calculated by cross-validation

The R^2 were low, indicating that a large part of the variability of the hearing threshold at 4000 Hz is not taken into account by the explanatory variables. The RMSE was slightly higher for PTA measurements.

This model was validated by analysis of the residuals. One extreme measurement, showing 30 dB variation (figure 3), was only weakly taken into account by the model but this value was not particularly influential in the calculated model and was therefore retained in the dataset.

Modeling the fatigue measured based on the acoustic reflex threshold

The model of ΔReflex (table 8 and figure 4) aimed to explain variations in the threshold for triggering of the acoustic reflex.

Parameters	Coefficient	Standard error	Significance p
Sound energy (Factor 1)	2.73	0.47	<0.001
Large band audio stability (Factor 2)	-1.07	0.47	0.027
Hearing threshold at 250 Hz	-0.34	0.09	0.027
Hearing threshold at 500 Hz	0.16	0.09	0.073
Hearing threshold at 6000 Hz	0.05	0.03	0.084
Constant	2.58	1.21	0.037

Table 8: Linear regression modeling of acoustic reflex threshold variation based on 66 measurements. Regression coefficient, $R^2 = 0.64$. Root mean square error calculated by cross-validation, $\text{RMSE} = 3,0 \text{ dB}$.

This model explains 64% of the variance of the acoustic reflex threshold. This result is significantly better than for the model of ΔPTA_{4k} . The RMSE was only 3 dB, which corresponds exactly to the measurement step of the acoustic reflex threshold. The normal distribution of the residuals validates this model.

Discussion

Daily noise exposure for 53% of the volunteers exposed to amplified music exceeded the regulatory limit in France, set at 87 dB(A). Although the average noise levels to which volunteers were exposed were high, there was a wide variation in exposure levels, ranging from 74 to 96.5 dB(A). In our dataset, noise exposure for subjects was unrelated to their task. For example, sound and light technicians were exposed to equivalent noise levels. These results are not surprising since professionals in this sector work side-by-side in the same sound environment. The lack of relation between noise exposure and task means that all professionals in music venues, regardless of their activity, are at risk of developing hearing disorders. In contrast, we found the individual noise exposure levels measured to be closely linked to the musical style broadcast. The literature does not report this dependence on the musical style, as most studies were conducted in the noisiest conditions, mainly rock concerts or discotheques (Trompette & Venet, 2020). Previous studies of noise exposure often reported on extreme situations, which may explain why the average noise exposure measured in our study was lower than in most publications. Two other points may also explain this difference: in France, a recent decree reduced the permissible sound level for the public from 105 dB(A) to 102 dB(A) (15-min sliding average); in addition, we measured sound exposure over the entire working day, not just during the concerts. Indeed, the periods of exposure to music (sound checks, rehearsals, concerts) only represented a portion of the working day – on average 3 hours out of an 8-hour day. The rest of the time, exposed volunteers evolved in a quiet sound environment (about 70 dB(A)) comparable to that of the volunteers in the control group. The difference in noise level between the music and the remainder of the workday was so great that the daily dose of noise was almost exclusively linked to exposure to the music. The daily exposure of these professionals was therefore mainly determined by the sound level at which the music was played, and its duration. This was particularly the case when the average level of the music exceeded 90 dB(A) – always with rock, rap, blues, and pop music.

Reducing noise exposure for these professionals can therefore only be achieved by reducing their exposure to music, i.e. through the use of hearing protection and/or by reducing the sound level at which the music is broadcast. Limiting the exposure duration would have only a limited effect, since a 50% reduction would only lead to a 3-dB decrease (based on the 3-dB exchange rate from the European regulations).

Because the noise level during the “non-music” periods was negligible compared to that of the amplified music, these “break” periods – which represented 60% of the working time – effectively reduced the daily noise exposure and, more importantly, provided periods during which the volunteers’ auditory system could recover. This configuration is a favorable element for professionals in the music sector compared to employees in industrial settings, where noise tends to be more continuous.

A previous study conducted with employees in the industrial and construction sectors led to similar results in terms of fatigue (4.5 ± 5.5 dB of Δ PTA and 8.6 ± 6.4 dB of Δ Reflex), but the average noise exposure ($L_{EX,8h} = 85.0 \pm 3.0$ dB(A)) of the employees was 2 dB(A) lower than that measured among professionals in the amplified music sector ($L_{EX,8h} = 87.0 \pm 5.7$ dB(A)) (Venet et al, 2014). The alternation between very noisy periods (amplified music above 95 dB(A)) and quiet periods close to 70 dB(A), which is a signature of the exposure profile in the amplified music sector, could contribute to limiting auditory fatigue at equivalent daily noise doses.

The statistical model presented here supports this hypothesis. Whether fatigue is measured based on Δ PTA or Δ Reflex, sound energy (Factor 1) is the variable most affecting the fatigue measured. However, in both models, the stability of the noise exposure was also found to play a role. For Δ PTA, a high value for Factor 3, which corresponds to a wide distribution of the Leq_{1s} quantiles (i.e., L10 - L90) reduces auditory fatigue. For Δ Reflex, a high value of Factor 2, which corresponds to a high dynamic of the audio signal, was also associated with decreased fatigue. Unstable sound exposure is therefore a parameter that contributes to

reducing fatigue. Even short-lived quiet periods could allow partial hearing recovery, thus limiting the accumulation of fatigue at the end of the working day. Multiple physiological mechanisms induced by exposure to sound lead to temporary variations in the auditory threshold, and include structural modifications of the stereocilia or synaptopathy of the fibers with a low spontaneous discharge rate. The kinetics of these mechanisms differ, with recovery times after the end of sound exposure ranging from several weeks for some mechanisms (Kujawa & Liberman, 2009; Puel et al, 1998) to minutes, such as for recovery of the endocochlear potential (Thorne et al, 2004). Factor 2 used in the Δ Reflex model indicates that even simply unstable audio can limit auditory fatigue. Highly dynamic audio content would thus limit the accumulation of fatigue. Conversely, low dynamic content, such as highly compressed music, which is very common in modern genres, will tend to increase auditory fatigue (Vickers, 2010). These findings appear to contradict the report from Fuente et al., 2018, indicating a positive correlation between hearing loss at 6000 Hz and audio kurtosis in the context of industrial noise. However, in the Fuente et al. (2018) study, high kurtosis was related to exposure to very high impulse noises, such as impact noises, which are widely recognized to be extremely damaging to the auditory system (Henderson & Hamernik, 1986; Lie et al, 2016).

Resting auditory performance also affected measured fatigue, but in different ways depending on the test. For Δ ATL, a high hearing threshold at 6000 Hz contributed to reduce measured fatigue at 4000 Hz. Similarly, the resting auditory thresholds at 500 and 6000 Hz correlated positively with Δ Reflex, whereas the threshold at 250 Hz correlated negatively with it. For people with “flat” audiograms at all frequencies – i.e., volunteers with good hearing – these three variables compensate each other, cancelling their respective effects in the Δ Reflex model. Consequently, according to this model, volunteers with a scotoma over a wide frequency range would experience more fatigue. Consequently, the scotoma would increase the risk of developing auditory fatigue. The hypothesis of increased hearing fatigue in people

with hearing loss has often been proposed (Holman et al, 2020). However, evidence is still lacking and the hearing fatigues studied in this review were central rather than peripheral. As Δ Reflex is more sensitive to fatigue, the significance is stronger (higher variation compared to the unexposed group and lower standard deviation), and consequently the Δ Reflex model explains the measured fatigue much better (higher R^2 and lower RMSE). The type of responses measured may also explain the better results obtained by the Δ Reflex model. Indeed, the acoustic reflex measured by the EchoScan process is a short reflex arc that is not influenced by brain plasticity (Venet et al, 2012; Venet et al, 2011). In contrast, the Δ PTA measurement is subjective, involving the whole auditory pathway, and thus brain plasticity allows adaptation of the peripheral auditory receptors to the stimuli provided. This plasticity can compensate for subtle dysfunctions of the ear, or fatigue, to maintain a high level of sensitivity (Kaltenbach & Zhang, 2007; Mulders & Robertson, 2013; Noreña & Eggermont, 2003). Auditory thresholds measured in these conditions are therefore derived from a more complex response, which is less dependent on the auditory receptor itself, and therefore more difficult to reproduce in a simple model.

According to the literature, musicians and technicians exposed to music experience milder hearing deficits than workers exposed to equivalent levels of industrial noise. Some authors hypothesize that this difference is linked to the intermittent nature of music in contrast to the more stable and continuous profile of industrial noise. According to this hypothesis, periods of exposure to music, interspersed with quiet periods, would allow for better recovery from fatigue and therefore reduce long-term hearing loss (Axelsson & Lindgren, 1977; SAMELLI et al, 2012). The auditory fatigue models developed in this study support this hypothesis.

This result clearly demonstrates the beneficial effect of acoustic breaks in quiet spaces, i.e., where the noise level is below 70 dB(A), to reduce the risk for hearing. However, these breaks alone, without further action, will not be sufficient to significantly reduce the risk of hearing loss for professionals in the amplified music sector. Indeed, although 90% of the volunteers in

the music-exposed group were aware that their activity entails a risk for their hearing, their use of hearing protection was anecdotal. Indeed, according to our data, less than 5% of the volunteers occasionally used hearing protection, and none of them systematically used protection during high exposure phases, even though more than half of them were equipped with hearing protection devices. While it is understandable that wearing hearing protection can be difficult to reconcile with the activity of a sound engineer, the same cannot be said for the other occupations. A wide range of hearing protection devices exist that are adapted to the various constraints. For example, for lighting or stage technicians who work without a radio link, custom-molded plugs equipped with uniform-attenuation filters allow the sound environment to be heard without too much distortion. For those working with a radio, intercom versions of in-ear or over-ear hearing protections exist. For bartenders or receptionists moving between quiet and noisy areas, active plugs which adapt their noise attenuation to the sound environment would be appropriate.

In France, employers are in charge of the safety of their employees, and must therefore equip them with adequate protection. However, the music sector presents an obstacle to preventive actions as a significant proportion of self-employed people work for a large number of companies. The identical proportion (55%) of volunteers equipped with hearing protection in the exposed and unexposed groups illustrates this difficulty. This percentage may seem high for the control group, but a large proportion of these volunteers were working in entertainment establishments. Some of these volunteers were equipped by their employers because they were likely to be exposed to amplified music. In contrast, the percentage of hearing protection equipment available for the music-exposed group appeared rather low, but could be explained by the fact that most of the volunteers in this group were not permanent employees of the music venues, but self-employed or working in addition to another professional activity (security, barman). Although these volunteers should be equipped by their current employer (i.e., the entertainment establishments according to the French labor

code), health and safety issues relating to self-employed and/or temporary workers are often secondary to those of the venue's staff. Thus, in the “technical” group, 50% of the volunteers equipped with individual protection had purchased it themselves, whereas only 15% of the control group had done so.

In addition to hearing loss problems, the questionnaire results confirmed the high frequency of tinnitus reported in the literature (Halevi-Katz et al, 2015; Helena Mendes et al, 2007).

Tinnitus is a cause of work cessation, especially among musicians (Størmer et al, 2015). In the technical group, 44% of the professionals suffered from chronic tinnitus (i.e., perceived at rest). The proportion recorded in the unexposed group, 24%, was slightly higher than that for the general population (Baguley et al, 2013; Halevi-Katz et al, 2015). However, it should be emphasized that the population in our unexposed group is not a population that had never been exposed to high noise levels. All volunteers worked in entertainment establishments (managers, cultural agents, administrative staff, etc.), consequently although they may not have been exposed to amplified music on the day of the measurements, they could have been exposed to amplified music over the course of their past or present occupational activities. Acute tinnitus following loud noise exposure was extremely common in the technical group (71%), but was never reported as a hearing problem by these individuals. The temporary nature of this tinnitus probably leads these technicians to minimize its significance, and to consider it to be a normal consequence of their professional activity, rather than a sign of damage to their auditory system.

However, we are persuaded that chronic tinnitus, hyperacusis, and auditory distortions have such drastic consequences on the quality of work and life for these professionals that they deserve to be recognized as occupational disorders in the regulations.

Limitations

Despite the efforts made to perform this field study in real working conditions, the number of measurements remains limited in view of the diversity of exposures and work situations. This

limitation does not allow a detailed analysis of the impact of the various exposure parameters on auditory fatigue.

The lack of gender balance in the dataset used in this study reflects the reality: studied activities are mainly held by men, which makes it more difficult to analyze any possible gender effect using our data.

Conclusions

Exposure: Half of the subjects monitored had a daily noise exposure exceeding the regulatory limit value of 87 dB(A). This exposure was not function-dependent, but rather related to the style of music to which they were exposed.

Auditory fatigue: The high exposures led to auditory fatigue at the end of the day. However, the music –induced fatigue was similar to that measured in an equivalent study with industrial noise, despite a mean exposure level 2 dB(A) lower in industry.

Factors affecting fatigue: The sound energy to which the person is exposed is the predominant factor explaining auditory fatigue. However, the distribution of this energy over time is also a determinant parameter. Alternating quiet and noisy periods or preserving a wide distribution of acoustic pressures (high sound dynamics), while excluding damaging impulse noise, are favorable situations which reduce fatigue at the end of the day. The alternation of noisy and quiet periods being a characteristic of the amplified music sector, it could be a cause for the lower-than-expected hearing loss measured in professionals working in this sector.

Prevention: Interviewed professionals during this study were clearly aware of the risks to their hearing posed by their activities. However, despite the high noise levels encountered in their working environment, the use of individual hearing protection devices remained anecdotal. Much remains to be done to promote preventive actions in this activity sector.

Among the possible approaches, provision of quiet periods should be recommended/enforced as they reduce the accumulation of auditory fatigue, and long-term risks for hearing. Recovery

from auditory fatigue should be further investigated to shed more light on the kinetics of recovery and improve the efficacy of these acoustic breaks.

Disclosure statement

The authors declare no financial or non-financial conflicts of interests.

References

- AXELSSON, A., LINDGREN, F., 1977. FACTORS INCREASING THE RISK FOR HEARING LOSS IN 'POP' MUSICIANS. *SCAND. AUDIOL.*, 6(3), p.127–131.
- BAGULEY, D., MCFERRAN, D., HALL, D., 2013. TINNITUS. *THE LANCET*, 382(9904), p.1600–1607.
- DOBIE, R.A., HEMEL, S.V., 2004. ASSESSMENT OF THE AUDITORY SYSTEM AND ITS FUNCTIONS NATIONAL RESEARCH COUNCIL (US) COMMITTEE ON DISABILITY DETERMINATION FOR INDIVIDUALS WITH HEARING IMPAIRMENTS, ED., NATIONAL ACADEMIES PRESS (US). AVAILABLE AT: [HTTPS://WWW.NCBI.NLM.NIH.GOV/BOOKS/NBK207835/](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK207835/) [ACCESSED AUGUST 25, 2021].
- FERNANDEZ, K.A., JEFFERS, P.W.C., LALL, K., LIBERMAN, M.C., KUJAWA, S.G., 2015. AGING AFTER NOISE EXPOSURE: ACCELERATION OF COCHLEAR SYNAPTOPATHY IN “RECOVERED” EARS. *J. NEUROSCI. OFF. J. SOC. NEUROSCI.*, 35(19), p.7509–7520.
- FUENTE, A., QIU, W., ZHANG, M., XIE, H., KARDOUS, C.A., ET AL, 2018. USE OF THE KURTOSIS STATISTIC IN AN EVALUATION OF THE EFFECTS OF NOISE AND SOLVENT EXPOSURES ON THE HEARING THRESHOLDS OF WORKERS: AN EXPLORATORY STUDY. *J. ACOUST. SOC. AM.*, 143(3), p.1704–1710.
- FURMAN, A.C., KUJAWA, S.G., LIBERMAN, M.C., 2013. NOISE-INDUCED COCHLEAR NEUROPATHY IS SELECTIVE FOR FIBERS WITH LOW SPONTANEOUS RATES. *J. NEUROPHYSIOL.*, 110(3), p.577–586.
- GUINAN, J.J., BACKUS, B.C., LILAONITKUL, W., AHARONSON, V., 2003. MEDIAL OLIVOCOCHLEAR EFFERENT REFLEX IN HUMANS: OTOACOUSTIC EMISSION (OAE) MEASUREMENT ISSUES AND THE ADVANTAGES OF STIMULUS FREQUENCY OAEs. *J. ASSOC. RES. OTOLARYNGOL.*, 4(4), p.521–540.
- HALEVI-KATZ, D.N., YAAKOBI, E., PUTTER-KATZ, H., 2015. EXPOSURE TO MUSIC AND NOISE-INDUCED HEARING LOSS (NIHL) AMONG PROFESSIONAL POP/ROCK/JAZZ MUSICIANS. *NOISE HEALTH*, 17(76), p.158.
- HELENA MENDES, M., CATALANI MORATA, T., MENDES MARQUES, J., 2007. ACCEPTANCE OF HEARING PROTECTION AIDS IN MEMBERS OF AN INSTRUMENTAL AND VOICE MUSIC BAND. *BRAZ. J. OTORHINOLARYNGOL.*, 73(6), p.785–792.
- HENDERSON, D., HAMERNIK, R.P., 1986. IMPULSE NOISE: CRITICAL REVIEW. *J. ACOUST. SOC. AM.*, 80(2), p.569–584.
- HOLMAN, J.A., DRUMMOND, A., NAYLOR, G., 2020. THE EFFECT OF HEARING LOSS AND HEARING DEVICE FITTING ON FATIGUE IN ADULTS: A SYSTEMATIC REVIEW. *EAR HEAR.*, 42(1), p.1–11.

- KALTENBACH, J.A., ZHANG, J., 2007. INTENSE SOUND-INDUCED PLASTICITY IN THE DORSAL COCHLEAR NUCLEUS OF RATS: EVIDENCE FOR CHOLINERGIC RECEPTOR UPREGULATION. *HEAR. RES.*, 226(1–2), p.232–243.
- KUJAWA, S.G., LIBERMAN, M.C., 2009. ADDING INSULT TO INJURY: COCHLEAR NERVE DEGENERATION AFTER “TEMPORARY” NOISE-INDUCED HEARING LOSS. *J. NEUROSCI.*, 29(45), p.14077–14085.
- LIBERMAN, M.C., 1987. CHRONIC ULTRASTRUCTURAL CHANGES IN ACOUSTIC TRAUMA: SERIAL-SECTION RECONSTRUCTION OF STEREOCILIA AND CUTICULAR PLATES. *HEAR. RES.*, 26(1), p.65–88.
- LIBERMAN, M.C., 1988. PHYSIOLOGY OF COCHLEAR EFFERENT AND AFFERENT NEURONS: DIRECT COMPARISONS IN THE SAME ANIMAL. *HEAR. RES.*, 34(2), p.179–191.
- LIBERMAN, M.C., DODDS, L.W., 1987. ACUTE ULTRASTRUCTURAL CHANGES IN ACOUSTIC TRAUMA: SERIAL-SECTION RECONSTRUCTION OF STEREOCILIA AND CUTICULAR PLATES. *HEAR. RES.*, 26(1), p.45–64.
- LIE, A., SKOGSTAD, M., JOHANNESSEN, H.A., TYNES, T., MEHLUM, I.S., ET AL, 2016. OCCUPATIONAL NOISE EXPOSURE AND HEARING: A SYSTEMATIC REVIEW. *INT. ARCH. OCCUP. ENVIRON. HEALTH*, 89(3), p.351–372.
- LIN, H.W., FURMAN, A.C., KUJAWA, S.G., LIBERMAN, M.C., 2011. PRIMARY NEURAL DEGENERATION IN THE GUINEA PIG COCHLEA AFTER REVERSIBLE NOISE-INDUCED THRESHOLD SHIFT. *JARO J. ASSOC. RES. OTOLARYNGOL.*, 12(5), p.605–616.
- MULDERS, W.H.A.M., ROBERTSON, D., 2013. DEVELOPMENT OF HYPERACTIVITY AFTER ACOUSTIC TRAUMA IN THE GUINEA PIG INFERIOR COLLICULUS. *HEAR. RES.*, 298, p.104–108.
- MUÑOZ, D.J.B., THORNE, P.R., HOUSLEY, G.D., BILLETT, T.E., BATTERSBY, J.M., 1995. EXTRACELLULAR ADENOSINE 5'-TRIPHOSPHATE (ATP) IN THE ENDOLYMPHATIC COMPARTMENT INFLUENCES COCHLEAR FUNCTION. *HEAR. RES.*, 90(1), p.106–118.
- NORDMANN, A.S., BOHNE, B.A., HARDING, G.W., 2000. HISTOPATHOLOGICAL DIFFERENCES BETWEEN TEMPORARY AND PERMANENT THRESHOLD SHIFT11A PORTION OF THIS STUDY FORMED THE BASIS OF A PRE-DOCTORAL M.A. THESIS IN BIOLOGICAL SCIENCES, WASHINGTON UNIVERSITY SCHOOL OF MEDICINE (A.S.N.). THIS STUDY WAS PRESENTED IN PART AT THE 22ND MIDWINTER RESEARCH MEETING OF THE ASSOCIATION FOR RESEARCH IN OTOLARYNGOLOGY, FEBRUARY 1999. *HEAR. RES.*, 139(1), p.13–30.

- NOREÑA, A.J., EGGERMONT, J.J., 2003. CHANGES IN SPONTANEOUS NEURAL ACTIVITY IMMEDIATELY AFTER AN ACOUSTIC TRAUMA: IMPLICATIONS FOR NEURAL CORRELATES OF TINNITUS. *HEAR. RES.*, 183(1), p.137–153.
- PUEL, J.-L., RUEL, J., D’ALDIN, C.G., PUJOL, R., 1998. EXCITOTOXICITY AND REPAIR OF COCHLEAR SYNAPSES AFTER NOISE-TRAUMA INDUCED HEARING LOSS. *NEUROREPORT*, 9(9), p.2109–2114.
- SAMELLI, ALESSANDRA G., MATAS, C.G., CARVALLO, R.M.M., GOMES, R.F., BEIJA, C.S. DE, ET AL, 2012. AUDIOLOGICAL AND ELECTROPHYSIOLOGICAL ASSESSMENT OF PROFESSIONAL POP/ROCK MUSICIANS. *NOISE HEALTH*, 14(56), p.6–12.
- STØRMER, C.L., LAUKLI, E., HØYDAL, E., STENKLEV, N., 2015. HEARING LOSS AND TINNITUS IN ROCK MUSICIANS: A NORWEGIAN SURVEY. *NOISE HEALTH*, 17(79), p.411.
- THORNE, P.R., MUÑOZ, D.J.B., HOUSLEY, G.D., 2004. PURINERGIC MODULATION OF COCHLEAR PARTITION RESISTANCE AND ITS EFFECT ON THE ENDOCOCHELEAR POTENTIAL IN THE GUINEA PIG. *JARO J. ASSOC. RES. OTOLARYNGOL.*, 5(1), p.58–65.
- TONNDORF, J., 1980. ACUTE COCHLEAR DISORDERS: THE COMBINATION OF HEARING LOSS, RECRUITMENT, POOR SPEECH DISCRIMINATION, AND TINNITUS. *ANN. OTOL. RHINOL. LARYNGOL.*, 89(4), p.353–358.
- TROMPETTE, N., VENET, T., 2020. EXPOSITION SONORE ET RISQUE AUDITIF POUR LES PROFESSIONNELS DE LA MUSIQUE ET DU SON : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE - PUBLICATION SCIENTIFIQUE - INRS, AVAILABLE AT: [HTTPS://WWW.INRS.FR/INRS/RECHERCHE/ETUDES-PUBLICATIONS-COMMUNICATIONS/DOC/PUBLICATION.HTML?REFINRS=NOETUDE/P2020-009/NS370](https://www.inrs.fr/inrs/recherche/etudes-publications-communications/doc/publication.html?refINRS=NOETUDE/P2020-009/ns370) [ACCESSED JANUARY 27, 2021].
- VENET, T., CAMPO, P., RUMEAU, C., ELUECQUE, H., PARIETTI- WINKLER, C., 2012. ECHOSCAN: A NEW SYSTEM TO OBJECTIVELY ASSESS PERIPHERAL HEARING DISORDERS. *NOISE HEALTH*, 14(60), p.253.
- VENET, T., CAMPO, P., RUMEAU, C., THOMAS, A., PARIETTI-WINKLER, C., 2014. ONE-DAY MEASUREMENT TO ASSESS THE AUDITORY RISKS ENCOUNTERED BY NOISE-EXPOSED WORKERS. *INT. J. AUDIOL.*, 53(10), p.737–744.
- VENET, T., RUMEAU, C., CAMPO, P., RIEGER, B., THOMAS, A., ET AL, 2011. NEURONAL CIRCUITS INVOLVED IN THE MIDDLE-EAR ACOUSTIC REFLEX. *TOXICOL. SCI. OFF. J. SOC. TOXICOL.*, 119(1), p.146–155.
- VIANA, L.M., O’MALLEY, J.T., BURGESS, B.J., JONES, D.D., OLIVEIRA, C.A.C.P., ET AL, 2015. COCHLEAR NEUROPATHY IN HUMAN PRESBYCUSIS: CONFOCAL ANALYSIS OF HIDDEN HEARING LOSS IN POST-MORTEM TISSUE. *HEAR. RES.*, 327, p.78–88.

VICKERS, E., 2010. THE LOUDNESS WAR: BACKGROUND, SPECULATION AND
RECOMMENDATIONS. J. AUDIO ENG. SOC., p.27.

WU, P.Z., LIBERMAN, L.D., BENNETT, K., DE GRUTTOLA, V., O'MALLEY, J.T., ET AL, 2019.
PRIMARY NEURAL DEGENERATION IN THE HUMAN COCHLEA: EVIDENCE FOR HIDDEN
HEARING LOSS IN THE AGING EAR. NEUROSCIENCE, 407, p.8–20.