

Université de Rennes – Faculté de médecine

École d'audioprothèse de Fougères

Exposition sonore en concert : influence des facteurs acoustiques et non-acoustiques sur les troubles auditifs à court terme des spectateurs

Mémoire soutenu en vue de l'obtention du Diplôme d'État d'Audioprothésiste

par

Samuel MOULIN

3^{ème} année – D.E. d'Audioprothèse

Sous la direction de

M. Yves LEPRETRE

Année universitaire 2024-2025 - Promotion 27

Résumé

Contexte : Les spectateurs de concerts de musique amplifiée peuvent être exposés à des niveaux sonores élevés de l'ordre de 95 à 100 dB(A) pendant plusieurs heures. Une telle exposition peut avoir des conséquences sur l'audition, et notamment entraîner des élévations de seuils auditifs ou des acouphènes qui peuvent être temporaires ou permanents. L'objectif de cette étude était d'identifier les facteurs qui ont le plus d'influence sur l'apparition de ces troubles auditifs, parmi des facteurs acoustiques, comportementaux et individuels.

Méthode : Des tests auditifs ont été menés avant et après l'exposition sonore, auprès de 63 spectateurs répartis sur trois concerts. Lors de ces tests, les seuils auditifs ont été mesurés à 8 fréquences, et une évaluation de l'intensité d'acouphène a été réalisée sur une échelle visuelle analogique. Le niveau sonore d'exposition a été mesuré pour chaque participant, et des données relatives aux comportements individuels ont été recueillies par le biais d'un questionnaire post-concert (port de protections auditives et consommation d'alcool lors du concert).

Résultats : Des élévations de seuils auditifs supérieures ou égales à 10 dB ont été mesurées sur au moins une fréquence pour 20 participants. Les élévations de seuils ont principalement été observées entre 2 et 4 kHz. Dans cette zone fréquentielle, un modèle de régression linéaire a révélé que l'amplitude des élévations était significativement liée au niveau sonore moyen (élévations majorées d'environ 3-4 dB au-delà de 100 dB(A)), au port de protections auditives (élévations majorées d'environ 2-3 dB en l'absence de protections), et au temps de récupération après l'exposition. L'apparition ou la majoration d'acouphène ont touché 20 à 30% des participants, sans qu'un lien significatif n'ait pu être démontré avec les facteurs étudiés.

Conclusion : Ces résultats confortent les recommandations formulées par l'Organisation Mondiale de la Santé portant sur le niveau sonore moyen à ne pas dépasser, l'utilisation de protections auditives et le recours aux pauses pour limiter l'exposition. Une étude menée sur une cohorte plus grande ou avec une conception randomisée pourrait permettre d'identifier des facteurs de risques individuels pour lesquels des tendances ont pu être observées sans atteindre le niveau de significativité fixé (genre, consommation d'alcool). Des mesures de compréhension de la parole permettraient également d'obtenir une image plus complète des conséquences potentielles d'une exposition sonore en concert.

Mots-clés : exposition sonore, musique amplifiée, élévation de seuils auditifs, acouphène.

Remerciements

Je tiens tout d’abord à remercier M. Yves Lepretre, audioprothésiste D.E., pour avoir accepté de m’accueillir au sein de ses centres Audio 2000 et pour son soutien tout au long de ce travail. Au-delà de ce mémoire de fin d’études, les échanges que nous avons pu avoir sur l’exercice du métier et la prise en charge des patients ont été très enrichissants et formateurs.

Je souhaite également exprimer ma profonde gratitude envers les nombreuses personnes sans qui ce projet de recherche n’aurait tout simplement pas pu être mené. Parmi elles, je tiens à souligner la contribution essentielle de Mathieu Paquier, Professeur à l’Université de Bretagne Occidentale (UBO) et responsable de la filière Image et Son, à Brest. Je le remercie pour sa confiance et pour le temps qu’il m’a accordé depuis presque deux ans malgré l’absence de collaboration officielle encadrant ce travail. Son esprit critique et sa résilience ont été d’une grande aide pour faire face aux nombreux rebondissements rencontrés au cours de la conception et de la réalisation de cette expérience. Je remercie également Julian Palacino, Ingénieur de recherche au sein de la société Feichter Electronics, ainsi que Laurent Feichter pour leur soutien et leur implication dans ce projet, à travers la conception sur-mesure et la mise à disposition à titre gracieux des dosimètres notamment. Un immense merci, également, à Pascal Rueff de l’Agence du Verbe pour le prêt de son parc de casques audio, et à Cyprien Courmont de la Journée Nationale de l’Audition pour le prêt d’audiomètres calibrés.

J’adresse également mes remerciements à Maëlle Le Gouefflec, directrice de la Carène, qui a accepté d’ouvrir les portes de sa salle de concert et de mobiliser ses équipes (technique, communication, accueil/billetterie, sécurité). Merci aussi à Mathilde Vigouroux pour son travail essentiel sur la communication autour de cette expérience, et à l’ensemble des équipes de La Carène pour leur accueil chaleureux les soirs de concert (Antoine Le Jouan, Gildas Rohou, Michel Le Hir, Mélanie Arribas, Franck Calvez,...).

Je souhaite exprimer ma reconnaissance à Nicolas Wallaert, Hadrien Jean et Matthieu Fratticelli, pour la mise à disposition des algorithmes iAudiogram et leur implémentation lors des phases préliminaires de ce travail, même si une autre solution a finalement été retenue.

Merci aux intervenants de l'école de Fougères et aux différentes personnes consultées au cours de ce projet pour leurs conseils précieux : Brice Jantzen, Jaouen Roinson, et Agathe Valin. Merci également au Docteur Gwenaëlle Creff pour son aide lors de l'établissement du dossier à l'intention du Comité de Protection des Personnes.

Je tiens aussi à remercier les personnes qui m'ont aidé à collecter les données lors des concerts (Julian, Mathieu, Chloé, Yves, Cassandre, Julien, Hélène, Pablo, Thomas, Emilien) ainsi que les participants à cette étude.

Enfin, un mot pour mes proches et plus particulièrement pour ma partenaire de vie qui m'a accompagné et soutenu durant ce projet qui clôture une reconversion professionnelle engagée depuis de nombreuses années. Tout cela n'aurait pas pu être entrepris sans ce soutien au quotidien. Merci, Chloé.

Table des matières

RÉSUMÉ.....	i
REMERCIEMENTS	iii
TABLE DES MATIÈRES	v
TABLE DES ABRÉVIATIONS	vii
TABLE DES FIGURES.....	viii
TABLE DES TABLEAUX.....	viii
TABLE DES ANNEXES.....	ix
1. Introduction.....	1
1.1 État de la connaissance : troubles auditifs suite à une surexposition sonore.....	1
A) Notion de surexposition sonore	1
B) Impacts de l'exposition au bruit sur le système auditif.....	2
C) Retentissement de la surexposition sonore	3
1.2 Exposition sonore en concert de musique amplifiée	4
A) Cadre législatif.....	4
B) Symptômes auditifs prédominants suite à un concert de musique amplifiée	5
C) Facteurs potentiellement influents sur les troubles auditifs en concert	6
1.3 Problématique et objectifs de l'étude	11
2. Matériels et méthodes	12
2.1 Population ciblée	12
A) Critères d'inclusion et d'exclusion	12
B) Méthode de recrutement des participants	12
2.2 Protocole expérimental	13
A) Déroulement de l'étude.....	13
B) Questionnaire avant concert.....	14
C) Questionnaire après concert : données comportementales durant l'exposition	15
D) Environnement de l'étude.....	15
E) Évaluation de l'exposition sonore	17

F) Évaluation des conséquences auditives	17
G) Matériel utilisé pour la présentation des tests auditifs	19
2.3 Méthode d'analyse des données	22
A) Analyse des données acoustiques	22
B) Analyses statistiques	24
3. Résultats.....	25
3.1 Description de la population.....	25
3.2 Description de l'exposition sonore	27
3.3 Évaluation des conséquences de l'exposition sonore sur l'audition.....	28
A) Élévations de seuils auditifs.....	28
B) Acouphènes.....	37
4. Discussions	40
4.1 Comparaison des résultats à la littérature	43
4.2 Description de certains profils « atypiques ».....	40
4.3 Limites de l'étude et perspectives de recherche dégagées	43
Conclusion.....	47
BIBLIOGRAPHIE	49
ANNEXES	53

Table des abréviations

AFREPA	Association Francophone des Équipes Pluridisciplinaires en Acouphénologie
AIC	Critère d'Information d'Akaike
ANC	Active Noise Cancelling
ANOVA	ANalysis Of VAriance
EVA	Échelle Visuelle Analogique
FPCA	Analyse en Composantes Principales Focalisée
HL (dB)	Hearing Level
KEMAR	Knowles Electronics Manikin for Acoustics Research
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
PTM	Perte Tonale Moyenne
PTS	Permanent Threshold Shift
RGPD	Règlement Général de Protection des Données
SMAC	Scène des Musiques Actuelles
SPL (dB)	Sound Pressure Level
TSA	Traumatisme Sonore Aigu
TTS	Temporary Threshold Shift

Table des figures

Figure 1 : Niveaux sonores mesurés en présence d'un bruit rose sur un mannequin KEMAR : sans casque, avec un casque Bose QC25, ou avec un casque Ultrasone HFI 580.	20
Figure 2 : Niveaux sonores moyennés sur 1 minute, mesurés au cours d'un concert.	23
Figure 3 : Données comportementales issues des questionnaires après concert concernant le port de protections auditives et la consommation d'alcool.....	26
Figure 4 : Niveaux d'exposition sonore calculés sur une période de référence de 2h ($L_{Ex,2h}$).	27
Figure 5 : Élévations de seuils auditifs moyennées sur les deux oreilles et erreurs standards associées, en fonction de la fréquence du stimulus sonore (N = 63).....	30
Figure 6 : Élévations de seuils auditifs mesurées entre 2 et 4 kHz (TTS_{2-4kHz}) en fonction du concert, et de la vague de passage des participants.....	31
Figure 7 : Analyse en Composantes Principales Focalisée sur le score d'élévation de seuils auditifs (TTS_{2-4kHz}) pour les variables acoustiques, et non-acoustiques.	33
Figure 8 : Valeurs d'élévations de seuils TTS_{2-4kHz} réparties en fonction des catégories de niveau d'exposition du modèle de régression choisi.....	35
Figure 9 : Score d'intensité d'acouphène avant et après l'exposition sonore, pour les spectateurs ayant un acouphène en permanence.	37
Figure 10 : Nuage de points représentant les élévations de seuils (TTS_{2-4kHz}) en fonction de l'exposition sonore moyenne ($L_{Ex,2h}$) pour l'ensemble du panel (N=63).	39

Table des tableaux

Tableau 1 : Âge et Perte Tonale Moyenne des spectateurs inclus dans le panel.....	25
Tableau 2 : Nombre de spectateurs présentant une élévation de seuils de 10 dB ou plus, en fonction du concert et du port de protections auditives.	29
Tableau 3 : Modèle de régression linéaire multiple proposé pour modéliser les élévations de seuils auditifs pour l'intégralité du jeu de données (N=63).	36

Table des annexes

ANNEXE I : Photos d'un dosimètre et des 10 postes installés dans Le Club	53
ANNEXE II : Interface utilisateur du logiciel développé pour le recueil des troubles auditifs	54
ANNEXE III : Résumé des analyses statistiques des métriques acoustiques des 3 concerts.....	56
ANNEXE IV : Exemple de relevés de seuils auditifs avant et après l'exposition sonore	57
ANNEXE V : Effet conjugué des facteurs Concert et Vague sur les élévations de seuils	58
ANNEXE VI : Matrices de corrélation entre les variables explicatives.....	59
ANNEXE VII : Modèles de régression linéaire considérés et AIC associés.....	61
ANNEXE VIII : Élévations de seuils en fonction du port de protections auditives	62
ANNEXE IX : Répartition des scores d'intensité d'acouphène (EVA) dans le cas d'apparition d'acouphène.....	63

1. Introduction

1.1 État de la connaissance : troubles auditifs suite à une surexposition sonore

Le système auditif, essentiel à la communication et à l'interaction sociale, est vulnérable aux agressions sonores. Une surexposition sonore peut engendrer l'apparition de troubles auditifs qui peuvent être temporaires ou permanents suivant les lésions occasionnées par le bruit.

A) Notion de surexposition sonore

La surexposition sonore peut intervenir dans deux types d'expositions : le traumatisme sonore aigu (TSA), et l'exposition prolongée au bruit.

Un traumatisme sonore aigu résulte d'une exposition brève à un bruit de forte intensité, généralement supérieur à 100-120 dB SPL (*Sound Pressure Level*), tel qu'un coup de feu, ou un concert. Cette exposition peut provoquer des lésions immédiates dans l'oreille moyenne et l'oreille interne, qui peuvent être temporaires ou entraîner des séquelles permanentes selon la gravité du traumatisme (1,2).

Une exposition prolongée au bruit correspond à des niveaux sonores relativement élevés, généralement supérieurs à 80-85 dB(A), sur une période prolongée comme dans certains environnements professionnels (usines, chantiers). Cette exposition peut entraîner une perte auditive progressive, irréversible, débutant par une atteinte des fréquences aiguës. Dans ce contexte, une surdité peut être reconnue comme Maladie Professionnelle si l'activité professionnelle est référencée dans les tableaux 42 et 46 du Code de la Sécurité Sociale (3).

Le pouvoir lésionnel d'une exposition sonore dépend de l'énergie de l'exposition (dose) et est régi par le principe d'iso-énergie : produit entre le niveau d'exposition sonore et la durée d'exposition (4). D'après ce principe, une exposition sonore à 100 dB SPL pendant 15 minutes est équivalente, du point de vue des risques auditifs qu'elle entraîne, à une exposition à 97 dB SPL pendant 30 minutes (énergie acoustique divisée par deux, soit -3 dB, pour une durée d'exposition multipliée par deux), ou 94 dB SPL pendant 60 minutes, etc.

B) Impacts de l'exposition au bruit sur le système auditif

- **Adaptation physiologique du système auditif**

Le réflexe stapédien constitue le principal mécanisme de protection de l'oreille et repose sur la contraction du muscle stapédien sous contrôle du nerf facial VII. La rigidification de la chaîne ossiculaire entraîne une baisse de sensibilité au niveau de l'oreille moyenne, ce qui protège l'oreille interne (5). Ce phénomène d'adaptation morphologique se déclenche de manière bilatérale, à la suite d'un bruit intense (généralement supérieur à 80 dB SPL). Cependant, ce réflexe intervient avec un délai pouvant varier d'environ 50 à 150 ms en fonction de l'intensité du stimulus (6), et agit de manière inégale en fonction de la fréquence avec une atténuation principalement en dessous de 1 kHz (7). Aussi, ce réflexe ne peut protéger le système auditif contre les TSA impulsionnels comme des coups de feu dont le transitoire d'attaque est trop court pour déclencher le réflexe. Le réflexe stapédien n'intervient pas non plus pour une exposition sonore de type concert compte tenu de sa fatigabilité (8).

- **Lésions du système auditif par surexposition sonore – Éléments physiopathologiques**

Lors d'un traumatisme sonore aigu, l'intensité du bruit peut provoquer une déformation mécanique des structures de l'oreille interne à deux niveaux. Au niveau des cellules ciliées externes pour commencer, les stéréocils peuvent s'infléchir à leur extrémité, voire rompre sous l'action des contraintes mécaniques induites par les forts niveaux sonores. Cela entraîne un découplage des stéréocils de la membrane tectoriale, ce qui peut conduire à l'apoptose des cellules ciliées (9). De plus, des lésions peuvent aussi apparaître au niveau de l'organe de Corti et en particulier de la membrane basilaire, qui peut localement subir une elongation voire une rupture si les limites d'élasticité de la membrane sont dépassées (10).

Une sur-stimulation sonore peut également entraîner des lésions synaptiques avec une libération excessive et répétée de neurotransmetteur (glutamate) par les cellules ciliées internes. Ce phénomène de surcharge en glutamate au niveau synaptique est appelé excitotoxicité glutamatergique (10). Au contraire des lésions mécaniques évoqués précédemment, ces lésions, parfois temporaires, donnent lieu à la formation de nouvelles liaisons synaptiques après quelques heures ou jours chez le sujet animal (11). Des travaux récents ont montré que les fibres nerveuses recrées suite à une surexposition sonore chez l'animal possèdent des propriétés particulières : ce sont des fibres à basse activité spontanée présentant des seuils d'activation

comparables aux fibres à haute activité spontanée (12). D'après les auteurs de cette étude, ces éléments constituent une potentielle explication à la survenue d'acouphène, de manière complémentaire à la théorie du gain central.

C) Retentissement de la surexposition sonore

La surexposition sonore peut avoir des conséquences différentes en fonction de la nature de l'exposition. En effet, un traumatisme sonore aigu n'engendre pas les mêmes conséquences qu'une exposition sonore prolongée sur toute la durée d'une carrière (1,2). Dans le cadre d'une surexposition sonore ponctuelle (TSA, concert, etc.), les symptômes otologiques peuvent inclure : une otalgie, une hypoacousie, un acouphène, une hyperacousie ou encore des difficultés de compréhension dans le bruit (13). L'exposition quotidienne au bruit peut avoir de multiples impacts sur l'état de santé général au plus long cours : risque d'hypertension artérielle et d'infarctus du myocarde, dégradation de la qualité du sommeil, de la capacité d'attention et de concentration (14,15).

Dans le cadre de ce travail, seules les conséquences auditives à court terme d'une surexposition sonore sont étudiées, et sont définies comme suit :

- **Élévation des seuils auditifs (hypoacousie)**

L'élévation des seuils auditifs se manifeste par une diminution de la sensibilité auditive, limitant la capacité à percevoir des sons de faible intensité. Cette élévation peut être temporaire (*Temporary Threshold Shift* - TTS) ou permanente (*Permanent Threshold Shift* - PTS), selon la durée et l'intensité de l'exposition (16).

- **Acouphènes**

Les acouphènes correspondent à des sensations auditives telles que des bourdonnements, des sifflements ou des grésillements, perçues en l'absence de source sonore externe. Ils peuvent être temporaires ou chroniques et sont souvent associés à une perte auditive (17). Les acouphènes peuvent avoir un impact significatif sur la qualité de vie, en perturbant le sommeil, la concentration, et en provoquant des états anxieux ou dépressifs dans les cas les plus sévères (18).

1.2 Exposition sonore en concert de musique amplifiée

A) Cadre législatif

- **Recommandations internationales**

En 2022, l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a publié des recommandations destinées à rendre les concerts et lieux diffusant de la musique amplifiée plus sûrs pour l'audition (19). Ces recommandations ont été conçues pour prévenir les troubles auditifs tout en maintenant une expérience musicale satisfaisante. Parmi les points clés du standard de l'OMS, une limitation du niveau sonore à 100 dB(A) moyennés sur 15 minutes est préconisée, avec des périodes plus calmes de « repos auditif ». Il est également conseillé à travers ce standard, de mesurer le niveau sonore en continu, de fournir des protections auditives gratuites ou à prix abordables aux spectateurs, d'informer le public sur les risques liés à l'exposition sonore excessive, d'aménager les espaces pour limiter la réverbération excessive et homogénéiser le niveau sonore dans les zones accessibles au public.

- **Législation française sur l'exposition sonore en concerts**

En France, la réglementation applicable aux concerts et événements musicaux amplifiés est régie par le décret n° 2017-1244 du 7 août 2017 (20). Cette réglementation a pour objectif de protéger la santé auditive du public, des artistes et du personnel. Les principaux éléments de la loi incluent la définition d'un niveau sonore maximal autorisé fixé à 102 dB(A) moyenné sur 15 minutes en tout lieu accessible au public (contre 100 dB(A) préconisé par l'OMS), et 118 dB(C) sur 15 minutes. La loi stipule également une obligation de mesure continue du niveau sonore durant toute la durée de l'événement, l'affichage des niveaux sonores à l'entrée ou sur écran visible par le public, la mise à disposition de protections auditives gratuites ou à prix réduit, et la création d'espaces de repos auditif (zones calmes).

Bien que la législation française soit globalement en adéquation avec les recommandations de l'OMS, son application reste hétérogène selon les lieux. Les petites salles de concert sont en effet parfois moins bien équipées ou sensibilisées à ces thématiques et ont des contraintes importantes pour gérer le niveau sonore aux premiers rangs. En effet, dans les petits espaces, le niveau sonore aux premiers rangs peut être fortement impacté par le son émanant de la scène,

c'est-à-dire le niveau sonore acoustique délivré par les instruments ou les amplis, et non pas par le système de sonorisation.

B) Symptômes auditifs prédominants suite à un concert de musique amplifiée

Différentes études se sont intéressées aux conséquences auditives d'une exposition à la musique amplifiée, qu'elle survienne lors d'un concert en intérieur, ou au cours d'un festival en extérieur, par exemple. La plupart des études mettent en évidence deux troubles auditifs principaux : des élévations temporaires de seuils auditifs, et des acouphènes.

Dans une étude menée aux États-Unis, les élévations de seuils post-concert ont été évaluées pour 29 spectateurs normo-entendants âgés de 13 à 20 ans assistant à un concert de pop/rock en intérieur (21). Des élévations de seuils de 10 dB ou plus ont été constatées pour 30 à 60% des participants en fonction de la fréquence (environ 30% sur les deux oreilles à 2 kHz, 31% à 3 kHz, et jusqu'à 54% des participants à 4 kHz). De plus, 25% des participants ont rapporté souffrir d'acouphène après le concert. Le niveau sonore dans l'audience a été évalué à 98.5 dB(A) en moyenne sur la durée du concert (3 heures). Cependant, ces données d'exposition sonore ne sont pas individuelles et n'ont pas été mises en lien avec les élévations de seuils rapportées. Dans une autre étude (22), des augmentations significatives de seuils auditifs ont été mesurées au cours de trois concerts pour 13 participants sur 29 (soit environ 45%), exposés à un niveau sonore moyen de 99.8 dB(A).

Une enquête à grande échelle réalisée dans plusieurs pays révèle que 80% des 2264 personnes interrogées ont déjà souffert d'acouphène après une exposition sonore en concert, et que ce symptôme apparaît « souvent » ou « toujours » pour 20% des personnes interrogées (23). Une étude menée au Canada (24) sur 204 spectateurs de concerts de rock/métal a montré que la proportion des spectateurs touchés par des acouphènes atteignait 85% suite à l'exposition sonore (quatre concerts distincts). Dans cette même étude, environ 40% des spectateurs ont souffert de troubles auditifs assimilés à une élévation de seuils temporaire.

De manière plus marginale et encore débattue, certaines études ont évalué les difficultés en termes d'intelligibilité dans le bruit suite à une exposition sonore en concert (25,26).

C) Facteurs potentiellement influents sur les troubles auditifs en concert

Le développement de troubles auditifs à la suite d'un concert de musique amplifiée dépend de nombreux paramètres liés à l'exposition sonore (caractéristiques acoustiques), mais aussi à des facteurs individuels et comportementaux.

- **Caractéristiques acoustiques des concerts de musique amplifiée**

Le **niveau sonore moyen** observé en concert de musique amplifiée est globalement situé entre 95 et 100 dB(A) (21,22,27,28). Une étude acoustique menée sur 621 concerts dans 50 salles en Norvège (28) a montré, par exemple, que la plupart des concerts atteignaient un niveau sonore moyen de 95 dB(A). Cette étude permet également de constater, dans 14% des concerts, des dépassements du niveau limite de 102 dB(A) (niveau maximal autorisé par la loi norvégienne). Une étude datant de 1978 a mis en évidence l'apparition d'élévations de seuils auditifs suite à une exposition de deux heures en concert à partir d'un niveau de 92 dB(A) (29). Cependant, il a été noté dans le travail de thèse de T. Venet (30) que le spectre sonore de la musique amplifiée a évolué depuis les années 80, avec l'énergie des basses fréquences de plus en plus présente et des systèmes de sonorisation de plus en plus performants. Ceci pourrait justifier de réévaluer le niveau sonore à partir duquel des élévations de seuils sont observées.

Bien que le niveau sonore moyen, conjugué à la durée d'exposition, semble être déterminant dans l'apparition de troubles auditifs, les études menées ne permettent pas d'établir une corrélation franche entre le niveau d'exposition sonore, et l'intensité des symptômes auditifs mentionnés précédemment (21,22). Il est à noter que la mesure de niveaux d'exposition sonore individuels représente une contrainte technique forte en comparaison d'une enquête par questionnaire, ce qui pourrait expliquer le manque de données précises à ce sujet. De plus, des mesures acoustiques non-individuelles (un sonomètre placé en régie ou à proximité du système de sonorisation, par exemple) ne peuvent pas rendre compte de la variabilité du niveau sonore qui peut exister au sein de la zone d'audience. Cette variabilité est notamment due aux réflexions acoustiques en intérieur (31), mais aussi à la directivité des systèmes de sonorisation et à leur combinaison, en particulier pour les fréquences les plus graves (32).

La **répartition fréquentielle du signal musical** varie suivant le style musical mais est globalement riche en basses fréquences dans la plupart des musiques actuelles (pop, rock, rap,

électro, etc.). L'énergie des sons les plus graves est renforcée par la présence de systèmes de sonorisation dédiés (*subwoofers*). La quantité d'énergie acoustique dans les fréquences les plus graves est mal prise en compte par la pondération fréquentielle A, d'où l'utilisation conjointe d'une mesure de niveau sonore en dB(C) comme indiqué dans la loi française (20).

La **dynamique sonore** du signal musical peut aussi avoir une influence sur la nature de l'exposition sonore et sur ses conséquences. Différents travaux ont porté sur l'influence de la dynamique du signal audio sur l'audition chez l'animal (33), et semblent indiquer un effet nocif de la sur-compression du signal au niveau de l'oreille moyenne (altération des mécanismes de protection de l'oreille) et de l'oreille interne (dégradation de l'état des cellules ciliées externes). D'autres études, menées cette fois-ci sur l'humain, évoquent que les variations du niveau sonore dans le temps ont une influence sur la fatigue auditive suite à une exposition sonore (30). En effet, une exposition sonore stable, c'est-à-dire avec peu d'écart entre les niveaux maximums et minimums, entraînerait une fatigue auditive plus marquée chez les professionnels du monde du spectacle. D'après les auteurs, les indicateurs acoustiques liés à la stabilité sonore de l'exposition constitueraient une des variables explicatives des élévations de seuils auditifs mesurés à 2 et 4 kHz (la première variable explicative étant liée à l'énergie sonore).

- **Facteurs comportementaux et individuels en concert**

L'OMS recommande aux spectateurs de concerts de faire des **pauses** régulières dans des zones « calmes » où le niveau sonore est inférieur à 80 dB(A) afin de limiter le risque d'apparition de troubles auditifs (19). D'après Helleman et Dreschler (34), les pauses n'auraient pas forcément d'impact sur les élévations de seuils auditifs mais seraient utiles afin de limiter la dose d'exposition sonore (produit de l'énergie sonore par la durée d'exposition). Une autre étude a montré qu'en comparaison d'une exposition sonore continue (musique présentée à 100 dB SPL pendant 60 minutes), l'effet de pauses régulières de 1 minute toutes les 3 minutes de musique limite les élévations de seuils, mais n'a pas d'influence sur la dynamique de récupération auditive spontanée (35).

- **Port de protections auditives en concert**

Dans l'étude d'Opperman et al. (22), les auteurs indiquent que parmi les 29 spectateurs testés, la proportion de spectateurs développant des élévations de seuils post-concert est moindre chez

les personnes portant des protections auditives (environ 27% contre 64% pour les spectateurs non-protégés), sans précisions sur le type de protections portées. Il est à noter cependant que le panel dans cette étude est relativement restreint (N=29 répartis en deux groupes équilibrés), et que le lien entre le niveau sonore d'exposition et les élévations de seuils n'a pas été recherché.

Une étude hollandaise, menée sur 51 participants exposés au cours d'un festival en extérieur, tend à confirmer l'efficacité des protections auditives pour limiter les élévations de seuils et l'apparition d'acouphène (36). En effet, les élévations de seuils mesurées à 3 et 4 kHz touchent seulement 8% des spectateurs du groupe protégé par des bouchons en silicone réutilisables, contre 42% des spectateurs du groupe non-protégé de cette étude randomisée. Ici encore, bien que le niveau moyen de l'exposition sonore soit évalué à 100 dB(A) sur les 4,5 heures du festival, aucune donnée individuelle d'exposition n'est avancée.

Malgré l'efficacité prouvée des protections auditives et les recommandations ou évolutions législatives favorisant l'accès à des protections lors de concerts (19,20), l'utilisation effective des protections auditives est variable, avec dans certains concerts une proportion de spectateurs non-protégés pouvant atteindre 80% (24).

- **Consommation d'alcool et audition**

Les mécanismes physiopathologiques impliquant l'effet de la consommation d'alcool sur l'audition ne sont pas clairement établis. Toutefois, différentes pistes sont évoquées dans la littérature : une altération du flux sanguin cochléaire liée aux effets de l'alcool sur le système cardiovasculaire, une atteinte des voies auditives centrales, ou encore une inhibition des neurotransmissions impliquées dans le traitement des informations sensorielles au niveau cérébral (37).

Les travaux portant sur le lien entre la consommation d'alcool et la perte d'audition peuvent être contradictoires. En effet, concernant l'effet à long terme de la consommation d'alcool, certaines études indiquent un effet protecteur d'une consommation d'alcool faible sur le risque de développer une perte d'audition (38,39), d'autres travaux indiquent que la consommation d'alcool n'a pas d'impact (40) ou agit comme un facteur de risque lié à la perte d'audition (37).

Concernant l'effet immédiat de l'alcool sur l'audition, certaines études indiquent une dégradation des seuils liminaires après la consommation (41,42). Dans l'étude d'Upile et al. (42) portant sur 26 sujets normo-entendants, l'augmentation de la quantité d'alcool dans l'air expiré était corrélée à l'élévation de seuils auditifs sur la plupart des fréquences testées, avec une élévation moyenne de 7 dB pour une concentration d'alcool moyenne de 0.62 mg/l d'air expiré. À titre de comparaison, la concentration d'alcool limite tolérée pour conduire est fixée à 0.25 mg/l d'air expiré dans la plupart des pays européens. D'autres auteurs montrent une altération temporaire des oto-émissions acoustiques par produits de distorsion suite à la consommation d'alcool, mais pas de modification des seuils d'audition (43).

- **Effet de la fatigue et du stress sur l'audition**

Les liens entre la fatigue et les troubles auditifs suite à une exposition en concert ont peu été étudiés dans la littérature. Cependant, des travaux réalisés sur l'animal indiquent une influence de l'état émotionnel sur les élévations de seuils auditifs, avec le développement d'une hypersensibilité auditive attribuée à un niveau de stress plus important (44,45). Chez l'humain, une étude américaine a montré l'influence de différentes stratégies de *coping* sur l'intensité des élévations de seuils auditifs post-exposition (46). L'influence de l'état émotionnel dans la perception des acouphènes est également un élément retrouvé dans la littérature, avec l'implication du système limbique et du système nerveux autonome (47).

- **Effet du genre**

Le genre est un autre facteur individuel parfois cité comme ayant une influence sur l'apparition de troubles suite à une exposition sonore musicale. L'effet du genre varie cependant d'une étude à l'autre. En effet, l'étude de Hellström et al. (48) semble indiquer des élévations de seuils plus importantes pour les femmes que pour les hommes pour un niveau d'exposition comparable, mais cette étude a été réalisée sur peu de participants (10 hommes, 11 femmes). Au contraire, d'autres études indiquent que les hommes sont plus touchés par les élévations de seuils que les femmes suite à une exposition sonore (29,49). Cependant, la plupart de ces études ne permettent pas de garantir que les panels d'hommes et de femmes étudiés sont exposés de la même manière. Il est donc difficile de statuer sur le fait que les hommes sont davantage susceptibles de développer des troubles auditifs que les femmes, à un niveau d'exposition égal.

- **Interactions entre facteurs**

Enfin, certains travaux soulignent les interactions potentielles entre les facteurs individuels et comportementaux dans le cadre de concerts. Une étude américaine a porté sur les habitudes liées à l'utilisation de protections auditives en concert auprès de 2352 adultes ayant remplis un questionnaire en ligne (50). Cette étude suggère notamment que les hommes utilisent d'avantage des protections auditives que les femmes, et que la proportion des personnes ayant consommé de l'alcool est plus importante chez les spectateurs non-protégés. Une autre étude, réalisée au cours d'un festival de musique en 2015 (49), a établi un lien entre les élévations de seuils auditifs et différents facteurs individuels. D'après les auteurs, les hommes ayant consommé de l'alcool et/ou de la drogue sans porter de protections auditives étaient plus à même de développer des élévations de seuils que les autres spectateurs. Bien que cette étude apporte des éléments utiles liés aux comportements des 51 festivaliers inclus (18 hommes et 33 femmes), de nombreuses limitations réduisent sa portée. En effet, aucune information propre à l'exposition sonore des participants n'a été enregistrée alors que ce facteur est reconnu comme jouant un rôle clé dans l'apparition d'élévations de seuils auditifs (29,30). Aussi, il semble difficile de savoir si les élévations de seuils auditifs étaient liées au genre, à la consommation d'alcool, ou à une exposition sonore plus importante de certains individus.

1.3 Problématique et objectifs de l'étude

L'analyse de la littérature sur le sujet a révélé que les spectateurs de concerts de musique amplifiée étaient généralement exposés à des niveaux sonores élevés, et potentiellement nocifs pour le système auditif. De nombreux spectateurs développaient des troubles auditifs suite à l'exposition sonore, principalement des élévations de seuils et des acouphènes, qui étaient généralement temporaires. Il existe peu de travaux ayant étudié les variables explicatives de ces troubles auditifs dans des situations de concert dites « écologiques », en tenant compte à la fois des facteurs acoustiques liés à l'exposition sonore de chaque individu, et des facteurs non-acoustiques liés aux prédispositions et aux comportements individuels.

Face à ce constat, l'expérience présentée dans ce rapport avait pour but d'évaluer les conséquences auditives d'une exposition sonore en concert, à travers l'étude de plusieurs variables explicatives :

- des **facteurs acoustiques** liés aux caractéristiques physiques de l'exposition sonore (niveau sonore moyen sur la durée d'exposition, niveau sonore maximum, évolution du niveau sonore au cours du temps, et répartition fréquentielle),
- et des **facteurs non-acoustiques**, potentiellement cumulatifs, tels que le genre, l'existence de fragilités cochléaires (pertes auditives antérieures), le port de protections auditives, la consommation d'alcool, ou encore le niveau de fatigue général.

Cette étude a également eu pour objectif d'évaluer l'importance relative des différentes variables explicatives en les intégrant dans un seul et même modèle explicatif. Ce travail proposait donc de répondre à cette question : Quelles sont les variables qui ont le plus d'influence sur l'apparition de troubles auditifs des spectateurs après un concert ?

2. Matériels et méthodes

2.1 Population ciblée

Les participants ont été sélectionnés parmi les spectateurs ayant acheté des places de concert à la salle La Carène, à Brest. Les données ont été collectées au cours de trois concerts distincts, et ont nécessité le recrutement de sujets différents pour chaque concert.

A) Critères d'inclusion et d'exclusion

Pour participer à cette étude, les volontaires devaient être âgées de 18 ans ou plus, et avoir préalablement acheté leur place de concert.

Les participants ayant un bouchon de cérumen ou souffrant d'une surdité de transmission ou mixte présentant une composante transmissionnelle supérieure à 20 dB HL (*Hearing Level*) ont été exclus de cette étude. De même, les participants ayant consommé de l'alcool avant le concert, ou plus de deux unités d'alcool pendant le concert ont été exclus de l'étude.

B) Méthode de recrutement des participants

Une attention particulière a été portée au recrutement des participants, afin de respecter le règlement général de protection des données (RGPD), ainsi que des considérations éthiques imposant de ne pas exposer de manière volontaire des personnes à des forts niveaux sonores. Aussi, toutes les personnes qui ont participé à cette étude auraient été exposées à ces mêmes niveaux sonores, si l'étude n'avait pas eu lieu.

Le recrutement des participants a été réalisé la semaine précédent chaque concert. Plusieurs canaux de communication ont été utilisés. Un appel à participation a été envoyé par la billetterie de La Carène aux personnes ayant acheté une ou plusieurs places pour le concert ciblé. En parallèle de ce mailing, une campagne de communication sur les réseaux sociaux de La Carène (Instagram, Facebook) a été lancée. Enfin, l'équipe des bénévoles de La Carène a également été informée de l'étude et invitée à y participer.

Les spectateurs souhaitant participer à l'étude intitulée « Nos oreilles ont besoin de vous » ont rempli un formulaire de pré-inscription en ligne. Au-delà des données d'état civil et de contact, des informations concernant leur audition (existence de surdité connue ou d'acouphène, exposition au bruit, etc.) et leurs habitudes en lien avec les concerts ont été collectées (fréquence d'exposition en concert, port de protections auditives, etc.). Ces données ont été collectées afin de pouvoir équilibrer les groupes de participants si le nombre d'inscription dépassait la capacité d'accueil fixée à 30 participants par concert.

2.2 Protocole expérimental

Dans le cadre de cette étude, un protocole de recherche impliquant la personne humaine a été conçu et approuvé par le comité national d'éthique CPP Nord-Ouest III (ID RCB : 2025-A00160-49).

A) Déroulement de l'étude

Les spectateurs préalablement recrutés ont été accueillis environ une heure avant le début du concert dans l'espace d'accueil de La Carène appelé *Le Hall*. Le déroulement de l'expérience leur a été expliqué, puis un numéro de participant leur a été remis afin de pouvoir suivre leur progression au cours de la soirée.

Avant le concert, les participants devaient :

1. Répondre à un questionnaire et se soumettre à une otoscopie afin de vérifier les critères d'inclusion de l'étude.
2. Réaliser un test auditif en auto-évaluation : audiométrie tonale liminaire automatisée et évaluation de l'intensité d'acouphène éventuel (voir détails dans la section 2.2.F).
3. Être équipés du dispositif de captation sonore individuel (dosimètre).

Après le concert, et dans un délai de 30 minutes après l'exposition, les participants devaient :

1. Répondre à un questionnaire (port de protections auditives, consommation d'alcool).
2. Réaliser à nouveau le test auditif (relevé de seuils d'audition et évaluation d'acouphène).
3. Restituer le dosimètre.

Tous les participants ont été recontactés par téléphone le lendemain de l'expérience, afin de recevoir le résultat des tests auditifs réalisés. Si un participant présentait une augmentation de seuil strictement supérieure à 10 dB sur au moins une fréquence suite au concert, ce participant était invité à repasser un test auditif sous 24 à 48 heures. Le but de ce test supplémentaire était de pouvoir s'assurer de la récupération spontanée complète de l'audition du spectateur. Une place de concert à La Carène était alors proposée en compensation des frais de déplacements engendrés. Si la récupération auditive était incomplète suite à ce nouveau test (seuil toujours supérieur de 10 dB par rapport à la mesure avant le concert, ou perception d'un acouphène majorée), il était prévu de réorienter le participant vers le médecin ORL de garde au CHU de Brest. Cette situation n'a cependant pas été rencontrée.

B) Questionnaire avant concert

Avant l'exposition sonore, les participants devaient remplir un questionnaire afin d'indiquer s'ils avaient consommé de l'alcool avant le concert (vérification des critères d'exclusion).

Les participants devaient également évaluer leur sentiment de fatigue à l'aide du test de la fatigue de Pichot (51). Ce test est un auto-questionnaire constitué de 8 items, avec une échelle de Likert pour indiquer le niveau d'accord correspondant (0 = pas du tout / 1 = un peu / 2 = moyennement / 3 = beaucoup / 4 = extrêmement). Les 8 items du test de Pichot étaient :

1. Je manque d'énergie.
2. Tout demande un effort.
3. Je me sens faible à certains endroits du corps.
4. Je sens mes jambes ou mes bras lourds.
5. Je me sens fatigué sans raison.
6. J'ai besoin de m'allonger pour me reposer.
7. J'ai du mal à me concentrer.
8. Je me sens fatigué, lourd et raide.

Le score global *Fatigue* était ensuite calculé en faisant la somme des points de chaque item (score maximum de 32). Ce score global, a été utilisé pour l'analyse des résultats.

C) Questionnaire après concert : données comportementales durant l'exposition

Après l'exposition sonore, les participants devaient remplir un questionnaire afin d'indiquer s'ils avaient porté des protections auditives et dans quelle proportion. Ils devaient répondre à la question « Avez-vous porté des protections auditives pendant le concert ? » :

- Oui, pendant toute la durée du concert,
- Oui, pendant la majeure partie du concert,
- Oui, pendant moins de la moitié du concert,
- Non

Un niveau de protection entre 0 et 3 était ensuite codé dans l'analyse des résultats sous la variable *Protection* (0 pour « Non », et 3 pour « Oui, pendant toute la durée du concert »).

Les participants devaient également renseigner le nombre d'unités d'alcool consommées depuis le début du concert avec comme indication : une bière de 25 cl ou un verre de vin de 12 cl équivalait à 1 unité d'alcool, une bière de 50 cl à 2 unités, etc. Le nombre d'unités d'alcool consommées a été noté *Alcool* dans l'analyse des résultats de cette étude. L'auto-évaluation de la consommation d'alcool est jugée fiable pour des consommations faibles à modérées, inférieures à 8 unités (52).

Les éléments du questionnaire après concert ont été directement inspirés des travaux de Kraaijenga et al. (49).

D) Environnement de l'étude

La collecte des données a été réalisée au sein de la Scène des Musiques Actuelles (SMAC) de Brest : La Carène. La Carène dispose de deux salles de concert : *La Grande Carène*, d'une capacité d'accueil de 1300 places, et *Le Club*, d'une capacité de 350 places. Les deux salles sont séparées par un espace d'accueil commun appelé *Le Hall*. Ces trois espaces ont été utilisés pour la collecte des données utiles à cette expérience : exposition sonore dans *La Grande Carène* ; réalisation des tests auditifs dans *Le Club* ; regroupement des participants, pose des dosimètres, questionnaires et otoscopie dans *Le Hall*.

- **Salle de concert**

Les concerts sélectionnés ont eu lieu dans *La Grande Carène*. Cette salle dispose d'un système de sonorisation Adamson constitué d'un système principal de type *line-array* (8 haut-parleurs S10) suspendus à droite et à gauche de la scène. Un système complémentaire de moindre puissance (Adamson S7p et S10p) est disposé en nez de scène pour couvrir les premiers rangs du public (*front-fills*) car cette zone est hors de portée du système de sonorisation principal. Enfin, un complément est apporté pour les basses fréquences (inférieures à 100-200 Hz) par un système de *subwoofers* constitué de 10 haut-parleurs Adamson E119 répartis en 5 colonnes posées au sol devant la scène. Cette configuration de haut-parleurs est conçue pour répartir de manière homogène le niveau sonore sur toute la zone accessible au public. Cependant, il peut exister des différences de niveau sonore importantes d'une position à l'autre dans la salle, du fait de la directivité des systèmes de haut-parleurs notamment, comme expliqué dans la section 1.2. La régie son est située en fond de salle, soit à une distance de 18 mètres de la scène.

- **Salle de tests auditifs**

Les tests auditifs ont été réalisés dans *Le Club*, dont les parois disposent d'un traitement acoustique. Cette salle est séparée du *Hall* par un sas acoustique avec double-porte, ce qui permet de garantir un environnement sonore très calme. Le niveau de bruit de fond dans *Le Club* a été mesuré à 35 dB SPL. Cette mesure acoustique a été réalisée plusieurs semaines avant l'expérience, à l'aide d'un sonomètre Voltcraft SL-200 (Classe 2), dans des conditions similaires à l'expérience (un soir de concert dans *La Grande Carène*, pendant le concert, mais aussi avant et après le concert lorsque plusieurs centaines de personnes sont présentes dans *Le Hall*).

- **Concerts sélectionnés**

L'expérience s'est déroulée au cours de trois concerts, proposant des styles musicaux variés : RAP (tournée nationale de *Gringe*), POP (tournée nationale de *Clara Ysé*), ROCK (tournée internationale *Peter Hook & The Light*).

Le choix de ces concerts a été longuement discuté avec la direction de La Carène, afin de trouver les meilleures opportunités. Plusieurs critères sont entrés en compte :

- une date de concert où l'artiste se produit dans *La Grande Carène*, avec *Le Club* disponible, sur le premier trimestre 2025,
- un évènement produit ou co-produit par La Carène pour pouvoir contacter les spectateurs via la billetterie de La Carène (dans le cas d'une production externe, l'achat des billets se fait via diverses plateformes et le règlement RGPD ne permet pas de récupérer ces contacts, limitant les possibilités de recrutement),
- un public constitué principalement de spectateurs majeurs,
- des styles musicaux variés.

E) Évaluation de l'exposition sonore

Afin de mesurer l'exposition sonore durant le concert, chaque participant a été équipé d'un dosimètre. Ce dispositif électronique était placé au niveau de l'épaule des spectateurs grâce à un système d'aimants amovibles (voir photos en Annexe I).

Au total, 35 dosimètres conçus par la société Feichter Electronics, ont été utilisés. Les dosimètres ont été paramétrés spécifiquement pour les besoins de cette étude et permettaient d'acquérir, toutes les secondes, le niveau sonore en dB SPL, dB(A), dB(C), et par bande d'octave entre 32 Hz et 8000 Hz. Les dosimètres étaient programmés pour débiter l'enregistrement des données 1 heure avant le début du concert, et arrêter la captation 1 heure après le concert.

F) Évaluation des conséquences auditives

Dans le cadre de cette étude, l'objectif était d'évaluer les conséquences auditives d'une exposition en concert sur environ une trentaine de participants par concert, et ce juste après l'exposition sonore. La limite de 30 minutes suivant la fin du concert semblait pertinente afin de minimiser l'effet de la récupération auditive d'un individu à l'autre, et de maximiser les chances d'observer des élévations de seuils auditifs. Face à ces contraintes, il était donc impossible de réaliser des tests auditifs en centre d'audioprothèse. Aussi, l'approche retenue a été de faire passer des tests à plusieurs participants en parallèle, en auto-évaluation, grâce notamment à une méthode d'audiométrie tonale automatisée. Cette approche ne nécessitait pas d'avoir un nombre d'expérimentateurs important pour effectuer les tests auditifs comme avec

une méthode « conventionnelle », pour laquelle le relevé de seuils d'audition nécessite la présence d'un expérimentateur qualifié par poste d'audiométrie.

- **Relevés de seuils auditifs par audiométrie automatisée**

Plusieurs solutions d'audiométrie automatisée sont disponibles sur le marché, parmi lesquelles *iAudiogram* de la société My Medical Assistant basé sur une approche d'intelligence artificielle (53), ou *SoTone* développé par la société Sonup qui propose un test de dépistage tonal rapide (54). Après plusieurs tests réalisés en conditions réelles dans *Le Club*, il a été décidé de ne pas utiliser ces systèmes automatisés dans le cadre de cette étude. En effet, les solutions disponibles ne permettaient pas toujours de cibler les fréquences à tester, et nécessitaient une connexion Internet stable pour collecter des données sur le nombre de postes suffisant.

Aussi, un logiciel a été conçu spécialement pour cette expérience en Python (version 3.13), en s'inspirant de la pratique clinique, et en se basant sur les recommandations de bonnes pratiques de la Société Française d'Audiologie concernant la mesure de seuils d'audition de l'adulte. Ce logiciel a été créé afin de pouvoir réaliser un relevé de seuils d'audition de manière automatisée (c'est-à-dire sans nécessiter la présence d'un expérimentateur par poste), avec une méthode adaptative.

Les fréquences 250, 500, 1000, 2000, 3000, 4000, 6000, et 8000 Hz ont été testées. La première fréquence présentée était 1000 Hz, puis les fréquences aiguës par ordre croissant, avant de revenir sur le 1000 Hz (re-test), puis les fréquences plus graves par ordre décroissant.

Pour chaque fréquence, le stimulus était un son pur pulsé (non modulé en fréquence), constitué de 5 pulses de 250 ms, entrecoupés de silences de 100 ms. Une rampe a également été implémentée au début et à la fin des sinus (*fade-in* et *fade-out*) afin d'éviter l'apparition d'artefacts audibles (clics) lors de la présentation sonore.

La recherche de seuils liminaires a été réalisée suivant une méthode ascendante, adaptative. Pour chaque fréquence, la première présentation était faite à 60 dB HL. Tant que le participant détectait le stimulus, le niveau de présentation diminuait de 10 dB jusqu'à ce que le stimulus ne soit plus perçu. Après cette première inversion (passage de « perçu » à « non-perçu »), le

stimulus était présenté 5 dB plus fort jusqu'à ce qu'il soit à nouveau perçu (2^{ème} inversion), et ainsi de suite. Le seuil liminaire retenu pour chaque fréquence était celui correspondant à la 3^{ème} inversion.

- **Évaluation des acouphènes**

Juste avant de lire les consignes du test d'audition décrit ci-dessus, le participant devait renseigner s'il percevait un acouphène. Si oui, il devait indiquer l'intensité perçue de cet acouphène sur une échelle visuelle analogique (EVA). L'échelle était continue, sans graduations, et reprenait les éléments de l'échelle d'intensité de l'AFREPA allant de 0 (« pas d'acouphène ») à 10 (« intensité maximale imaginable »). L'échelle visuelle analogique et les consignes de test présentées sur l'interface utilisateur sont illustrées en Annexe II.

G) Matériel utilisé pour la présentation des tests auditifs

- **Choix du casque**

Le choix du casque a été fait parmi les différents modèles mis à disposition gracieusement par la société *L'agence du Verbe*. Le choix a été motivé par les capacités d'isolation des casques. En effet, l'expérience se déroulait hors d'une cabine audiométrique normalisée avec plusieurs postes en parallèles, ce qui pouvait augmenter le bruit de fond et entraîner des distractions pendant le test. Deux casques supra-auriculaires fermés ont été considérés pour cette expérience : Ultrason HFI 580 et Bose QC25, ce dernier disposant d'une technologie de réduction du bruit active (*Active Noise Cancelling* ou ANC) qui était activable ou non. Des mesures d'isolation des casques ont été réalisées sur une tête artificielle KEMAR en présence de bruit rose émis par quatre haut-parleurs Genelec 4080 situés autour du mannequin ($\pm 45^\circ$ et $\pm 135^\circ$ dans le plan horizontal). Le protocole de mesure est inspiré de l'étude de Smull et al. (55). Le niveau sonore émis par chaque haut-parleur a été fixé à 65 dB SPL à l'endroit du KEMAR et mesuré avec un sonomètre Voltcraft SL-200 (Classe 2) réglé sur le mode *Slow*. L'acquisition des signaux acoustiques a été réalisée par une sonde in-vivo placée dans le conduit auditif droit du mannequin KEMAR. La chaîne de mesure utilisée était une Audioscan Verifit2 disponible à l'école d'audioprothèse de Fougères.

Dans ces conditions, quatre mesures de niveau de pression acoustique ont été réalisées, et sont présentées sur la Figure 1 :

- Mesure sans casque sur le KEMAR (courbe 1, en vert),
- Mesure avec le casque Bose QC25, sans ANC (courbe 2, en rose),
- Mesure avec le casque Bose QC25, avec ANC (courbe 3, en bleu),
- Mesure avec le casque Ultrasone HFI 580 (courbe 4, en orange).

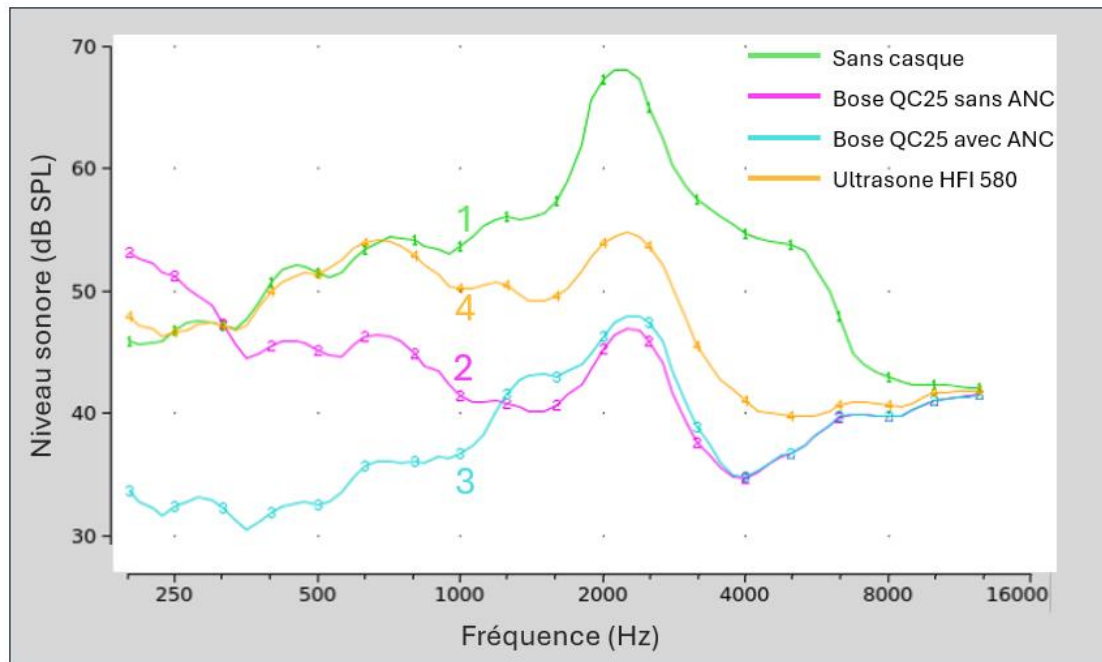


Figure 1 : Niveaux sonores mesurés en présence d'un bruit rose sur un mannequin KEMAR : sans casque, avec un casque Bose QC25, ou avec un casque Ultrasone HFI 580.

Les résultats présentés sur la Figure 1, indiquent que l'isolation maximale était fournie par le casque Bose QC25, en particulier lorsque la réduction de bruit ANC était activée (réduction de 15 à 25 dB sur la plupart des fréquences). Cependant, peu d'études ont testées la fiabilité d'un casque à réduction de bruit active comme émetteur de stimulus de test (56,57). De plus, il reste difficile de qualifier l'effet de la réduction de bruit active qui évolue en fonction du bruit ambiant, et pourrait venir altérer le stimulus de test par filtrage numérique ou une action sur la phase du signal, par exemple. Aussi, le choix s'est porté sur le casque Bose QC25 en configuration passive, c'est-à-dire, sans activer le système de réduction de bruit ANC.

- **Étalonnage des postes**

Une procédure d'étalonnage a été mise en place afin de s'assurer du niveau sonore délivré sur chaque poste lors de cette expérience. Pour cela, deux audiomètres calibrés Interacoustics AS608 avec des casques Radioear DD65 v2 ont été utilisés comme références. Les casques ont été positionnés sur une tête artificielle Neumann KU-100. Pour chaque fréquence testée, la procédure d'étalonnage s'est déroulée comme suit :

1. Émission d'un sinus pur continu à 60 dB HL par l'audiomètre calibré dans le casque calibré positionné sur la tête artificielle.
2. Enregistrement du signal capté par les microphones de la tête artificielle.
3. Émission d'un sinus pur continu par le poste à calibrer dans le casque Bose positionné sur la tête artificielle.
4. Enregistrement du signal capté par les microphones de la tête artificielle.
5. Comparaison des niveaux sonores captés aux étapes 2 et 4.
6. Ajustement du gain du poste à calibrer pour atteindre le niveau sonore délivré par l'audiomètre calibré.

Les étapes 1 et 2 ont été réalisés sur deux audiomètres calibrés, avec huit repositionnements de casque. Ces mesures ont ensuite été moyennées sur les deux côtés (oreillettes droite et gauche), sur les deux audiomètres, et sur les huit repositionnements de casque, afin de minimiser les erreurs de mesure en haute fréquence, et en particulier autour de 4 et 6 kHz (58).

Ces mesures ont nécessité l'utilisation d'une carte son externe RME *Babyface Pro FS*, et un script Matlab (version R2022a, licence étudiant) pour l'acquisition des signaux sonores et le calcul des gains à appliquer. Les signaux générés par les postes à calibrer ont été émis grâce à un programme Python, avec le même niveau de sortie de carte son que lors des tests auditifs.

- **Description des postes de test assemblés**

Au total, 10 postes ont été installés dans *Le Club*, afin de pouvoir tester 10 participants à la fois (voir photo en Annexe I). Chaque poste était constitué d'un ordinateur portable ou fixe (Windows 10 ou 11) et sa carte son intégrée, ainsi qu'un casque audio Bose QC25. Les traitements de signaux liés au rendu sonore (son spatialisé, etc.) ont été désactivés dans les

options de la carte son des ordinateurs. Le niveau de sortie de la carte son de chaque poste a été défini lors de la procédure d'étalonnage. Ce niveau de sortie était vérifié de manière régulière par les deux expérimentateurs présents dans *Le Club* durant la passation des tests.

2.3 Méthode d'analyse des données

A) Analyse des données acoustiques

Les données enregistrées par les dosimètres ont été traitées dans le logiciel Matlab (v2022a), afin de définir les métriques acoustiques suivantes :

- **Niveaux sonores moyens** sur la durée du concert en dB SPL, dB(A), dB(C), respectivement notés AVG_SPL , AVG_A , et AVG_C . Pour ces métriques, le temps d'intégration utilisé était de 15 minutes conformément à la législation en vigueur et aux recommandations de l'OMS (19,20). Pour ce faire, à chaque seconde, la moyenne glissante a été calculée sur les niveaux de pression acoustique en Pascal, mesurés au cours des 15 minutes précédentes. La moyenne a ensuite été convertie de Pascal en décibels.
- **La dose d'exposition**, notée $L_{Ex,2h}$ et exprimée en dB(A), correspond à l'exposition sonore moyenne ramenée sur une période de référence de deux heures (durée approximative d'un concert). Cette métrique permet de s'affranchir des différentes durées d'exposition, en utilisant une règle d'iso-énergie, soit -3 dB par doublement de la durée d'exposition (4). La dose d'exposition a été calculée par la formule suivante :

$$L_{Ex,2h} = L_{Aeq,TE} + 10 \cdot \log(T_E/T_0)$$

avec T_E durée effective de l'exposition en concert,

T_0 durée de référence fixée à deux heures,

$L_{Aeq,TE}$ niveau sonore continu équivalent de l'exposition en concert (AVG_A).

- **Niveaux sonores maximums** en dB SPL, dB(A), dB(C) respectivement notés MAX_SPL , MAX_A , et MAX_C . Ces niveaux ont été calculés comme le percentile 99.9 des données captées toutes les secondes. Cette approche a été préférée à l'utilisation de la valeur maximale (valeur mesurée sur 1 seconde uniquement) qui pourrait correspondre à une mesure « aberrante ».

- **La dynamique de l'exposition sonore**, notée *DynRange*. Cette métrique correspond à la différence entre les percentiles 90 et 10 des données mesurées toutes les secondes (30). Ce métrique traduit l'écart entre les sons les plus forts et les sons les plus faibles au cours de l'exposition sonore. Une valeur élevée indique des variations importantes du niveau sonore, et pourrait constituer un bon indicateur de la présence d'une pause durant l'exposition.
- **Le niveau de basses fréquences**, noté *LF*. Cette métrique est calculée comme la différence entre le niveau moyen en dB(C) et le niveau moyen en dB(A). Une valeur de *LF* élevée indique une forte exposition en termes de basses fréquences.

Le calcul de ces différentes métriques acoustiques a été effectué sur la période d'exposition en concert, qui peut être déterminée grâce à la visualisation des données brutes issues des dosimètres. La Figure 2 illustre un exemple de niveaux sonores en dB(A) moyennés sur 1 minute, pour deux spectateurs d'un même concert. On y voit notamment que les participants ont effectué le relevé de seuils auditifs juste avant le concert (niveau sonore autour de 30 dB(A) pendant environ 10 minutes), puis ont assisté au concert de 21h à 23h30, avant de retourner dans *Le Club* pour effectuer le relevé de seuils post-exposition.

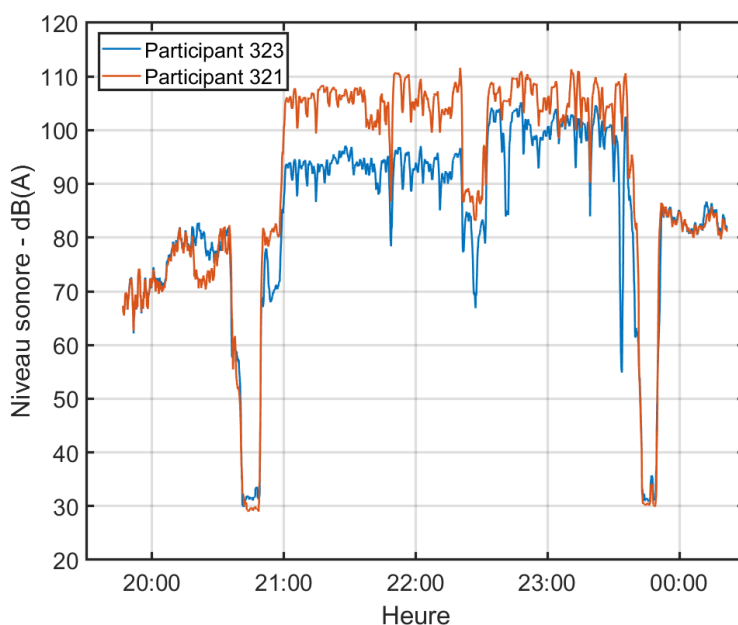


Figure 2 : Niveaux sonores moyennés sur 1 minute, mesurés au cours d'un concert.

B) Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont été réalisées avec les logiciels Jamovi (version 2.3.28) pour les statistiques descriptives, et les statistiques inférentielles (analyse de variance ANOVA, tests post-hoc). Les analyses en composantes principales focalisées et les modèles de régressions linéaires ont quant à eux été effectués dans R (RStudio version 2024.12.1) à l'aide du *package psy*.

Concernant les représentations graphiques, les boîtes à moustaches représentent la médiane et l'écart interquartile (25% - 75%) couvrant 50% des données. Les indicateurs de dispersion associés aux valeurs moyennes sont des écart-types ou des intervalles de confiance à 95% suivant les graphiques (se reporter à la description de chaque figure).

Le niveau de significativité a été fixé avec un seuil de risque $\alpha = 0.05$ pour l'ensemble des résultats présentés.

Les coefficients du modèle de régression linéaire multiple indiquent la valeur d'élévation de seuils (en dB) pour un changement d'unité de la variable indépendante étudiée, sans prendre en compte l'effet des autres variables du modèle.

3. Résultats

3.1 Description de la population

Au total, 73 spectateurs ont participé à cette étude. Parmi eux, dix participants ont été exclus des analyses pour les raisons suivantes : une consommation d'alcool supérieure à deux unités pendant le concert (quatre exclusions), des données incomplètes dues à un dysfonctionnement des dosimètres (quatre exclusions) ou du système de recueil des seuils d'audition (deux exclusions).

Ainsi, le panel de participants retenu pour les analyses était constitué de 63 spectateurs (21 hommes, 42 femmes) répartis de la manière suivante : Concert 1 RAP (N=11), Concert 2 POP (N=28), Concert 3 ROCK (N=24). Notons que les femmes étaient particulièrement surreprésentées dans le Concert 2 (82%), alors que la répartition hommes-femmes était quasiment équilibrée pour les autres concerts (55% de femmes pour le Concert 1, et 54% pour le Concert 3). Les statistiques descriptives liées à l'âge des participants, et à leur Perte Tonale Moyenne (PTM) évaluée avant le concert, sont reportées dans le Tableau 1.

	Concert	N	Moyenne	Écart-type	Mini.	Maxi.	Centiles		
							25th	50th	75th
Âge	1	11	34.27	10.72	22	58	27.50	31.00	39.5
	2	28	39.43	12.05	22	67	29.75	36.50	48.5
	3	24	49.79	12.48	19	62	50.75	53.50	57.0
PTM (dB HL)	1	11	10.63	5.06	6.25	21.9	6.56	9.38	11.9
	2	28	9.80	5.52	3.13	24.4	6.72	7.81	10.6
	3	24	13.08	6.74	4.38	29.6	8.13	11.56	16.1

Tableau 1 : Âge et Perte Tonale Moyenne des spectateurs inclus dans le panel.

Une analyse ANOVA révèle que l'âge des spectateurs était significativement différent entre les concerts ($F(2, 60) = 7.92, p < 0.01$). Un test post-hoc avec correction de Tukey révèle en effet que les participants du Concert 3 étaient significativement plus âgés que les autres participants.

Concernant la Perte Tonale Moyenne, les participants étaient en majorité normo-entendants avec une PTM inférieure à 20 dB HL pour 56 participants, et une PTM comprise entre 20 et 30 dB HL pour sept participants. Aucun participant n'était d'ailleurs équipé d'appareils auditifs. Une analyse ANOVA n'a révélé aucune différence significative en termes de PTM entre les trois concerts ($p=0.14$).

Les questionnaires remplis après le concert ont permis d'évaluer la proportion de participants ayant porté des protections auditives, ainsi que le nombre d'unités d'alcool consommées (voir Figure 3). On constate que le recours aux protections auditives a été très variable en fonction du concert, notamment lors du Concert 2, où 86% des participants n'ont pas porté de protections. De même, la consommation d'alcool varie d'un concert à l'autre : 91% des participants n'ont pas consommé d'alcool lors du Concert 1 (soit 10 participants sur les 11 au total), alors que ce pourcentage est de 50% pour le Concert 3.

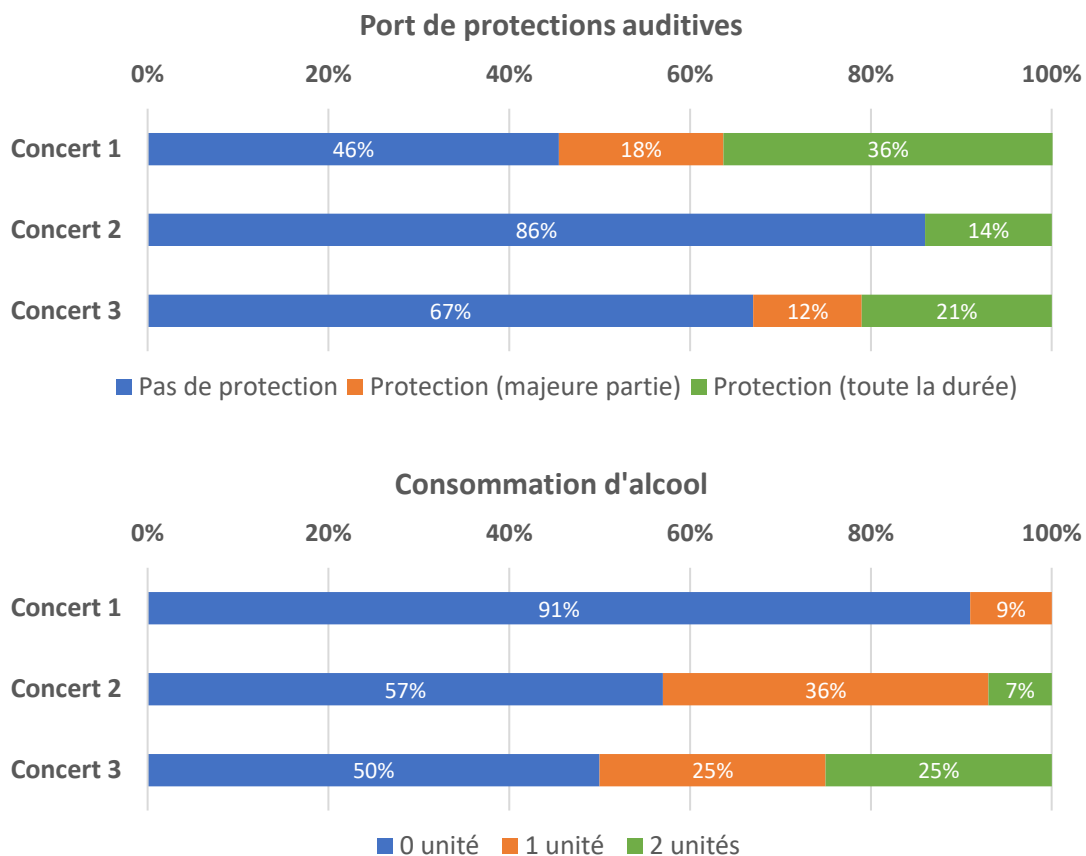


Figure 3 : Données comportementales issues des questionnaires après concert concernant le port de protections auditives (en haut) et la consommation d'alcool (en bas).

3.2 Description de l'exposition sonore

L'exploitation de la mesure des dosimètres portés par les participants a permis de quantifier l'exposition sonore lors des trois concerts, dont la durée était de 1h35 pour le Concert 1, 1h45 pour le Concert 2 et 2h46 pour le Concert 3. Ces différences de durée ont été prises en compte dans le calcul de $L_{Ex,2h}$, mais n'ont pas d'impact sur les autres métriques acoustiques utilisées. Les valeurs d'**exposition sonore moyenne** calculées pour les trois concerts sont représentées sur la Figure 4.

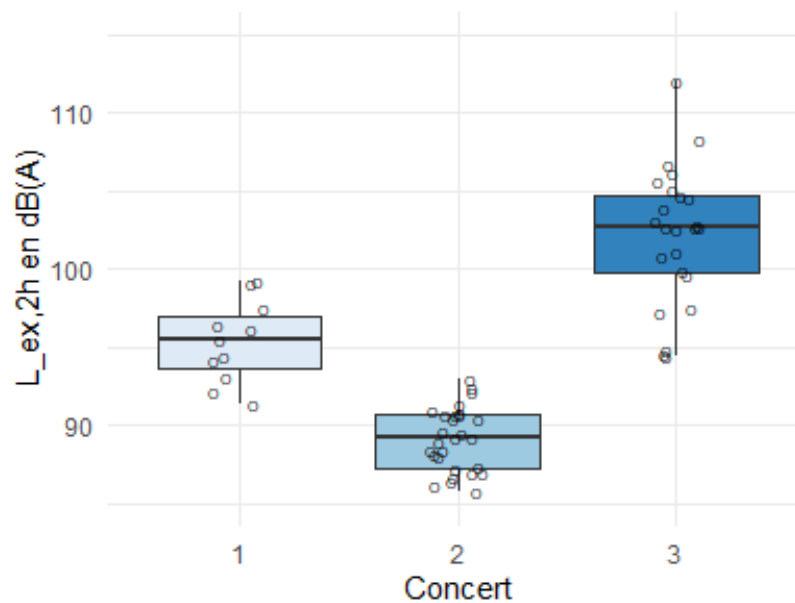


Figure 4 : Niveaux d'exposition sonore calculés sur une période de référence de 2h ($L_{Ex,2h}$).

Une analyse ANOVA a révélé que le niveau d'exposition sonore était statistiquement différent entre les concerts ($F(2, 60) = 107, p < 0.01$). De plus, un test post-hoc avec correction de Tukey a indiqué que tous les concerts ont occasionné des niveaux d'exposition différents ($p < 0.01$) et que l'exposition a été plus importante au cours du Concert 3. Ces observations ont d'ailleurs pu être faites pour tous les métriques basées sur la mesure du niveau sonore moyen : $L_{Ex,2h}$, AVG_A , AVG_C , et AVG_SPL .

Les analyses ANOVA réalisées sur les autres métriques acoustiques ont révélé que :

- le **niveau sonore maximum** était plus bas pour le Concert 2 que pour les autres concerts ($p < 0.01$) sans montrer de différence significative entre le Concert 1 et 3. Ces résultats ont été retrouvés pour toutes les pondérations fréquentielles : dB(A), dB(C) ou dB SPL, correspondant respectivement aux métriques MAX_A , MAX_C et MAX_SPL .

- La **dynamique de l'exposition sonore** *DynRange* était plus grande lors du Concert 2 que lors du Concert 3 ($p < 0.01$), indiquant des différences plus marquées entre les niveaux sonores maximum et minimum mesurés au cours du Concert 2.

- Enfin, le **niveau de basses fréquences** *LF* était moins élevé lors du Concert 2 que lors du Concert 3 ($p < 0.01$), sans montrer de différence significative entre le Concert 1 et 2, ni entre le Concert 1 et 3.

Les analyses ANOVA réalisées ainsi que les valeurs moyennes et intervalles de confiance à 95% des métriques acoustiques pour chaque concert sont reportées en Annexe III.

Globalement, les données acoustiques présentées ci-dessus indiquent que l'exposition sonore a été plus importante lors du Concert 3, avec des niveaux sonores moyens et des niveaux sonores maximums élevés, ainsi qu'une dynamique réduite. Au contraire, le Concert 2 présentait les niveaux sonores les plus bas, avec peu de basses fréquences et une dynamique sonore étendue. D'après les éléments de la littérature sur l'influence des facteurs acoustiques sur la santé auditive des spectateurs, le Concert 3 devrait entraîner plus de troubles auditifs auprès des spectateurs que le Concert 2 (élevations de seuils auditifs, acouphènes, etc.).

3.3 Évaluation des conséquences de l'exposition sonore sur l'audition

A) Élévations de seuils auditifs

- **Observations individuelles**

Les seuils d'audition avant et après l'exposition en concert ont été étudiés pour chaque participant. Un exemple d'audiogramme avant et après concert est reporté en Annexe IV pour un spectateur du Concert 1 (participant 109). L'élévation de seuils auditifs, notée *TTS* (pour *Temporary Threshold Shift*), a été calculée à chaque fréquence et pour chaque oreille, comme étant la différence entre le seuil d'audition après le concert et le seuil avant le concert.

Au total, 20 participants sur les 63 inclus ont présenté une élévation de seuils supérieure ou égale à 10 dB sur au moins une fréquence, soit environ 32% de la population testée (27% pour le Concert 1, 14% pour le Concert 2, et 54% pour le Concert 3). Comme l'indiquent les résultats présentés dans le Tableau 2, la proportion de participants présentant une élévation de seuils de

10 dB ou plus sur au moins une fréquence, semblait plus faible pour les participants portant des protections auditives. Cependant, cette tendance n'a pas pu être confirmée d'un point de vue statistique (tests de Fisher non significatifs au seuil de 5%).

Port de protections auditives	Concert 1			Concert 2			Concert 3			N Total
	N élévations	N total	%	N élévations	N total	%	N élévations	N total	%	
Sans protection	2	5	40%	4	24	17%	10	16	63%	45
Avec protection	1	6	17%	0	4	0%	3	8	38%	18
• Majeure partie	0	2	-	0	0	-	1	3	-	-
• Toute la durée	1	4	-	0	4	-	2	5	-	-
Total	3	11	27%	4	28	14%	13	24	54%	63

Tableau 2 : Nombre de spectateurs présentant une élévation de seuils de 10 dB ou plus sur au moins une fréquence, en fonction du concert et du port de protections auditives.

De manière plus critique, 10 participants ont présenté une élévation de seuils supérieure ou égale à 15 dB sur au moins une fréquence (deux participants du Concert 1, trois participants du Concert 2, et cinq participants du Concert 3). Tous ces participants ont été invités à effectuer un test de contrôle dans les 24 à 48h afin de s'assurer de la récupération spontanée complète de leur audition (test réalisé dans un environnement calme à l'Université de Bretagne Occidentale, sur le même poste et avec le même casque que celui attribué au spectateur lors du concert). Six spectateurs ont accepté de revenir faire ce test, et tous ont montré une récupération auditive avec des écarts qui ne dépassaient pas 5 dB par rapport aux seuils mesurés avant le concert. Les autres spectateurs concernés ont indiqué au cours d'un entretien téléphonique avoir le sentiment que leur audition était revenue à la normale après une nuit de sommeil ou au bout de 24h.

Après avoir inspecté les résultats au niveau individuel, un critère d'évaluation a été défini pour étudier l'influence potentielle de différents facteurs sur l'élévation de seuils auditifs.

- **Critère d'évaluation des élévations de seuils auditifs**

Une analyse ANOVA menée sur l'ensemble du panel a montré que l'élévation de seuils auditifs ne dépend pas de l'oreille considérée ($p=0.39$) mais dépend de la fréquence ($F(7, 992) = 3.50$,

$p < 0.01$). Les élévations de seuils moyennées sur les deux oreilles sont représentées en fonction de la fréquence testée sur la Figure 5.

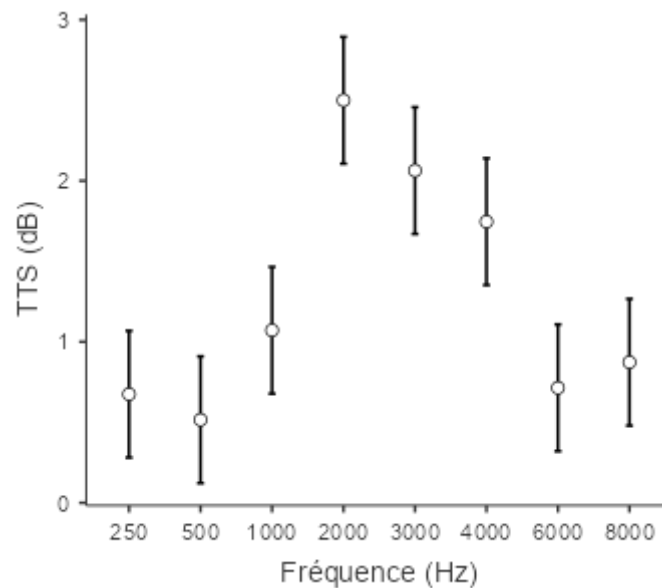


Figure 5 : Élévations de seuils auditifs moyennées sur les deux oreilles et erreurs standards associées, en fonction de la fréquence du stimulus sonore (N = 63).

Compte tenu de la dépendance fréquentielle observée, il a été choisi de considérer pour la suite des analyses statistiques la moyenne des élévations de seuils mesurées sur les deux oreilles et sur la bande 2-4 kHz. Cette valeur est notée TTS_{2-4kHz} , et est exprimée en dB. Ainsi, en prenant l'exemple illustré en Annexe IV, le participant 109 présente une élévation moyenne de ses seuils auditifs de 9.2 décibels entre 2 et 4 kHz ($TTS_{2-4kHz} = 9.2$ dB).

- **Élévations de seuils auditifs TTS_{2-4kHz} constatées**

Une analyse ANOVA à deux facteurs a été réalisée afin de tester l'influence du concert et l'ordre de passage des participants sur les élévations de seuils mesurées (variable dépendante étudiée : TTS_{2-4kHz} , facteurs fixes du modèle : *Concert*, *Vague*). Dans ce modèle, les effets principaux ont été testés, ainsi que l'interaction entre les facteurs. Les conditions de validité de ce modèle ont été vérifiées en termes d'homogénéité des variances (test de Levene, $p=0.33$), et de normalité des résidus (test de Shapiro-Wilk, $p=0.09$). L'analyse ANOVA a révélé un effet des facteurs principaux du modèle : *Concert* ($F(2, 54) = 5.31, p < 0.01$), et *Vague* ($F(2, 54) = 3.62, p < 0.05$), mais pas d'interaction entre ces facteurs ($p=0.34$).

Les valeurs d'élévations de seuils mesurées sont représentées en fonction du concert et de l'ordre de passage des participants (*Vague*) sur la Figure 6.

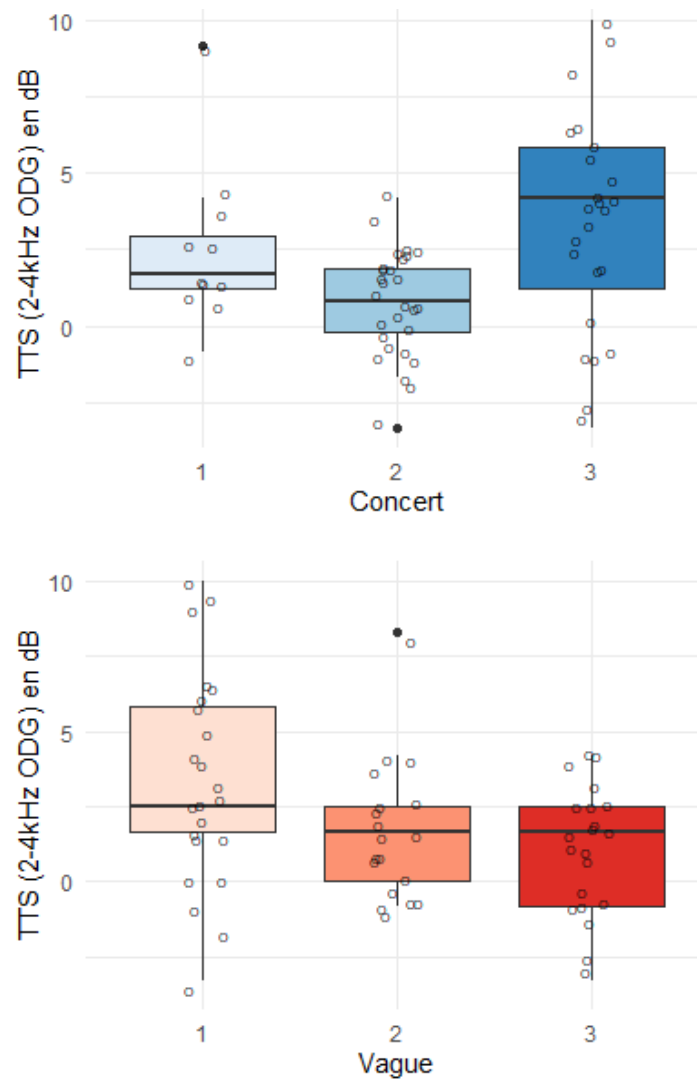


Figure 6 : Élévations de seuils auditifs mesurées entre 2 et 4 kHz (TTS_{2-4kHz}) en fonction du concert (en haut), et de la vague de passage des participants (en bas).

Les élévations de seuils ont été globalement plus importantes au cours du Concert 3 que lors du Concert 2, ce qui est confirmé par un test de Tukey ($p < 0.01$). Cependant, aucune différence significative n'a été trouvée entre le Concert 3 et le Concert 1 ($p_{tukey} = 0.348$). Concernant l'ordre de passage, un test de Tukey indique que les élévations de seuils sont en moyenne plus marquées pour les participants testés au cours de la première vague (relevé de seuils juste après le concert), par rapport à la 3^{ème} vague (participants testés environ 20 minutes plus tard).

Bien que l'ANOVA ne révèle pas d'interaction entre les facteurs *Concert* et *Vague*, l'effet de la vague est plus visible pour les participants des Concert 1 et Concert 3 que pour le Concert 2, ce dernier ayant entraîné des élévations de seuils relativement faibles (voir Annexe V). L'effet de la vague pourrait témoigner des premiers effets du processus de récupération auditive spontanée suite à l'exposition sonore. Ce point est discuté en section 4.1.

- **Recherche de variables explicatives des élévations de seuils auditifs**

Au-delà de l'influence du temps de récupération après l'exposition sonore, il semble intéressant d'explorer les variables qui ont pu avoir un effet sur les élévations de seuils mesurées aux cours des différents concerts. Pour cela, il est proposé d'étudier les liens de corrélations entre le critère d'élévation de seuils (TTS_{2-4kHz}) et les différentes variables (acoustiques et non-acoustiques). Dans un second temps, les variables les plus pertinentes ont été intégrées dans un modèle de régression linéaire multiple afin de proposer un modèle explicatif des élévations de seuils basé sur le jeu de données étudié.

Études des variables acoustiques

Une matrice de corrélation a été construite avec toutes les métriques acoustiques. Cette matrice a révélé l'existence de corrélations significatives entre les élévations de seuils (TTS_{2-4kHz}) et les métriques basées sur le niveau sonore moyen (AVG_A , AVG_C , AVG_SPL et $L_{Ex,2h}$), sur le niveau sonore maximum (Max_C et Max_SPL), ainsi qu'une corrélation négative avec la dynamique sonore ($DynRange$). La matrice de corrélation complète est reportée en Annexe VI.

Il est à noter que certaines métriques sont très fortement corrélées entre elles, par exemple toutes les métriques basées sur le niveau sonore moyen, avec pondération fréquentielle ou prise en compte du temps d'exposition ($R > 0.95$ avec $p < 0.001$). Pour nourrir le modèle de régression linéaire, il a été nécessaire d'exclure les variables colinéaires, pour ne garder que des variables les plus indépendantes possibles. Une Analyse en Composantes Principales Focalisée (FPCA) a été réalisée afin de visualiser les liens de corrélations des différentes variables avec la variable dépendante TTS_{2-4kHz} (59). La FPCA est représentée sur la Figure 7, à gauche, où les points à l'intérieur du cercle rouge correspondent à des relations statistiquement significatives au seuil de 5%. Les points en vert correspondent à des corrélations positives entre les variables explicatives et la variable dépendante (au centre), et les points en jaune correspondent à des corrélations négatives.

Sur la Figure 7, les points correspondants aux métriques acoustiques *AVG_C* et *MAX_C* ont volontairement été retirés par soucis de lisibilité (points quasiment superposés aux points *AVG_SPL* et *MAX_SPL*, respectivement). Deux « groupes » de métriques acoustiques présentent des corrélations significatives avec la variable dépendante : un groupe centré autour de $L_{Ex,2h}$, traduisant l'idée que lorsque l'exposition sonore augmente, l'élévation de seuils augmente, et l'autre groupe représenté par *DynRange* indiquant à travers la corrélation négative que lorsque la dynamique sonore augmente, l'élévation de seuils auditifs diminue.

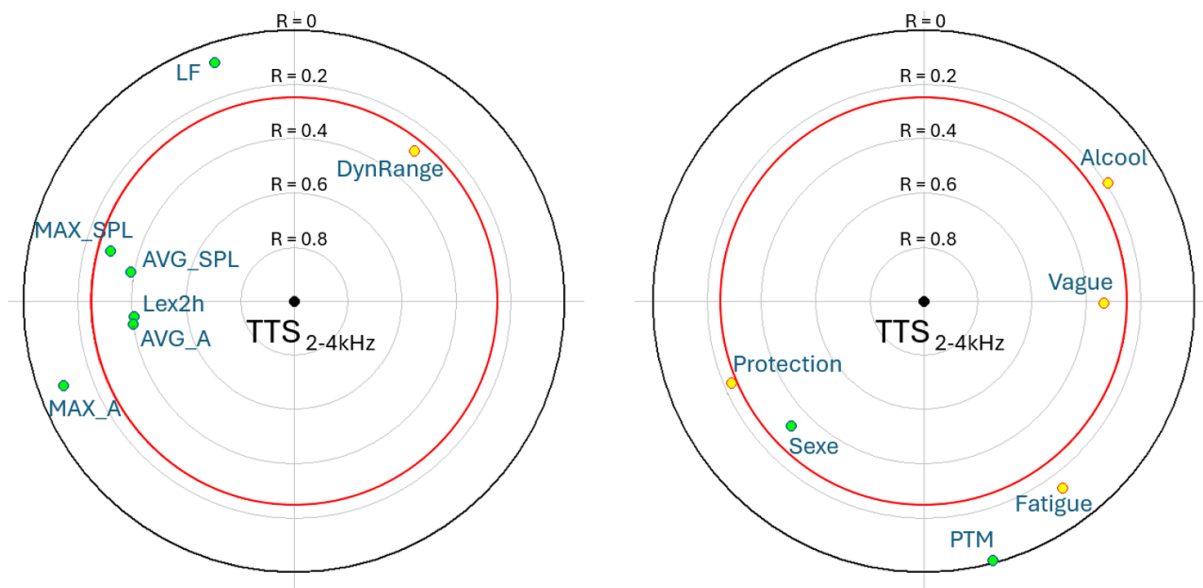


Figure 7 : Analyse en Composantes Principales Focalisée sur le score d'élévation de seuils auditifs (TTS_{2-4kHz}) pour les variables acoustiques (à gauche), et non-acoustiques (à droite).

Études des variables non-acoustiques

La même approche a été menée avec les variables explicatives non-acoustiques suivantes : *Protection*, *Alcool*, *Fatigue*, *PTM*, *Vague* et *Genre*. La matrice de corrélation et la FPCA (Figure 7, à droite) ont révélé l'existence de relations de corrélation significatives pour la variable *Vague* (corrélation négative, $p < 0.01$), alors que la variable *Protection* se trouve en limite de significativité (corrélation négative, $p = 0.07$). Il est à noter que le *Genre* apparaît comme étant positivement corrélé à l'élévation de seuils auditifs ($p < 0.01$), mais il est probable que cet effet soit en partie lié à une répartition non-homogène entre les genres en fonction des concerts, comme souligné précédemment dans la section 3.1. La matrice de corrélation pour les variables non-acoustiques est reportée en Annexe VI.

Construction du modèle de régression linéaire multiple

Un modèle de régression linéaire multiple a été construit en partant d'un modèle simple pour aller vers un modèle plus complexe, incluant de plus en plus de variables explicatives (voir Annexe VII pour la liste des modèles considérés). Parmi les variables acoustiques, la variable qui a semblé la plus pertinente à inclure était le $L_{Ex,2h}$ car cette métrique était fortement corrélée avec les autres métriques basées sur le niveau sonore moyen (comme indiqué sur la Figure 7), et qu'elle prenait en compte une compensation de la durée du concert.

Le critère d'évaluation du modèle a été basé, en partie, sur la diminution du critère d'information d'Akaike (AIC). L'AIC permet de prendre en compte la complexité d'un modèle en pénalisant les modèles ayant le plus de paramètres (60). En effet, le fait d'augmenter le nombre de paramètres dans un modèle améliore la qualité de l'ajustement (augmentation monotone du coefficient de détermination R^2) sans pour autant rendre compte d'un modèle plus pertinent (problème de sur-ajustement ou *overfitting*). Le choix du modèle a aussi été fait en favorisant un modèle dont l'interprétation des facteurs est plus porteuse d'information. Par exemple, au lieu de considérer le facteur d'exposition sonore $L_{Ex,2h}$ en tant que variable continue, il a été choisi de recoder cette variable en une variable catégorielle avec des valeurs d'exposition fixes. Aussi, la catégorie la plus haute a été directement inspirée des recommandations de l'OMS (niveau limite à ne pas dépasser, fixé à 100 dB(A)). Ce choix arbitraire a eu pour conséquence d'augmenter le critère d'AIC (pénalité due à la création de quatre catégories au lieu d'une variable continue), mais permet une interprétation plus concrète des résultats du modèle.

Le modèle retenu est donc basé sur quatre variables :

- **Vague** (1, 2 ou 3) : correspond au temps de récupération d'environ 10, 20 et 30 minutes après l'exposition sonore.
- **$L_{Ex,2h}$** : correspond à la mesure du niveau sonore en dB(A) moyenné sur 15 minutes, durant un concert d'une durée de deux heures. Quatre catégories ont été définies en partant de la limite haute préconisée par l'OMS, par palier de 6 dB : >100 dB(A), 100-94 dB(A), 94-88 dB(A), et <88 dB(A). Les valeurs d'élévation de seuils TTS_{2-4kHz} réparties en fonction de ces catégories de niveau d'exposition sont représentées sur la Figure 8.

- **Protection**, suivant trois catégories : « Pas de protection », « Protection intermittente » ou « Protection permanente ». Les valeurs d'élévation de seuils TTS_{2-4kHz} réparties en fonction de ces catégories sont représentées en Annexe VIII.
- Une variable individuelle : **Genre**.

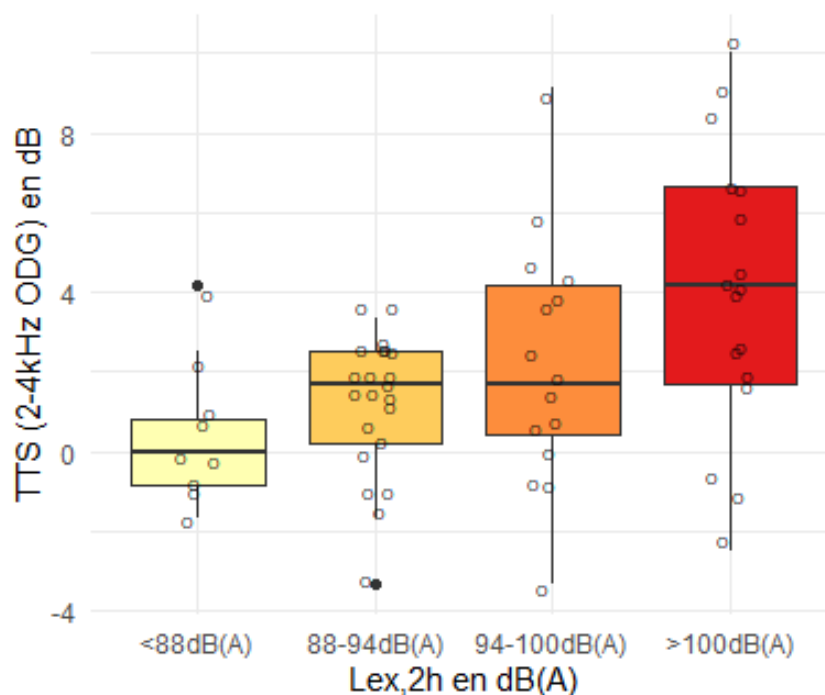


Figure 8 : Valeurs d'élévation de seuils TTS_{2-4kHz} réparties en fonction des catégories de niveau d'exposition du modèle de régression choisi.

Les coefficients et les caractéristiques du modèle retenu sont reportés dans le Tableau 3. La prise en compte dans le modèle de régression des autres variables potentiellement explicatives basées sur nos hypothèses de travail ou mises en avant à travers l'étude des corrélations (MAX_SPL , $DynRange$, $Alcool$, $Fatigue$, ou encore $Perte Tonale Moyenne$) n'apportent que peu d'informations supplémentaires tout en rendant le modèle plus complexe. Ces variables n'ont donc pas été intégrées au modèle de régression linéaire.

Coefficients du modèle - TTS 2-4kHz (dB)

Prédicteur	Estimation	Erreur standard	t	p
Ordonnée à l'origine	2.13	0.842	2.53	0.014
Vague : référence = Vague 1				
2	-1.88	0.731	-2.57	0.013
3	-2.64	0.745	-3.54	<.001
Protection : référence = Pas de protection				
Protection intermittente	-2.17	1.125	-1.93	0.059
Protection permanente	-2.76	0.749	-3.69	<.001
Lex2h : référence <88 dB(A)				
88-94 dB(A)	0.94	0.925	1.01	0.315
94-100 dB(A)	2.00	0.997	2.01	0.05
>100 dB(A)	3.61	0.990	3.64	<.001
Genre : référence = F				
H	1.15	0.647	1.78	0.081

Erreur quadratique moyenne (RMSE) = 2.08 dB

AIC = 291 $R^2 = 0.482$ $R^2 \text{ ajusté} = 0.405$

Tableau 3 : Modèle de régression linéaire multiple proposé pour modéliser les élévations de seuils auditifs pour l'intégralité du jeu de données (N=63).

D'après le modèle de régression proposé et les coefficients reportés dans le Tableau 3, l'interprétation du poids des variables explicatives doit se faire d'après la catégorie de référence de chaque variable, et suivant cette logique : le passage de la Vague 1 à la Vague 2 entraîne une diminution de TTS_{2-4kHz} de 1.88 dB, alors que le passage de la Vague 1 à la Vague 3 entraîne une diminution de TTS_{2-4kHz} de 2.64 dB. La même réflexion peut être faite pour la variable *Protection* : le fait de porter des protections de manière intermittente tend à diminuer la valeur de TTS_{2-4kHz} bien que cette diminution soit en limite de significativité ($p=0.059$). Le fait de porter des protections en permanence entraîne une diminution significative de TTS_{2-4kHz} de l'ordre de 2.8 dB, par rapport à une absence de protections auditives. Concernant la variable $L_{Ex,2h}$, comme le suggère la Figure 8, l'élévation des seuils auditifs dépend du palier considéré. En effet, le modèle linéaire montre que la différence entre un niveau d'exposition inférieur à 88 dB(A) et un palier compris entre 88 et 94 dB(A) n'entraîne pas une élévation de seuils significative ($p=0.315$). L'exposition à des niveaux sonores supérieurs à 94 dB(A) entraînent cependant des élévations de seuils significatives, en particulier lorsque la limite de 100 dB(A)

est dépassée (élévation de l'ordre de 3.6 dB). L'effet du *Genre* n'est pas retrouvé comme étant significatif dans ce modèle de régression.

Les conditions de validité du modèle de régression ont été vérifiées grâce notamment à la lecture graphique du diagramme Quantile-Quantile (QQ plot) afin de s'assurer de la distribution normale des valeurs résiduelles du modèle.

B) Acouphènes

Le second trouble auditif étudié correspond aux acouphènes. Ici, deux situations sont à distinguer dans la symptomatologie : la majoration d'un acouphène existant (contexte chronique) et l'apparition d'acouphène suite au concert (contexte aigu).

- **Majoration d'acouphène existant**

Sur les 63 participants, 11 se sont présentés avec des acouphènes dont l'intensité moyenne avant le concert était de 2.6 ± 1.95 sur l'échelle visuelle analogique (EVA). Cette intensité moyenne passe à 3.27 ± 2.43 après le concert. Les scores d'intensité d'acouphène des participants présentant un acouphène avant le concert sont représentés sur la Figure 9.

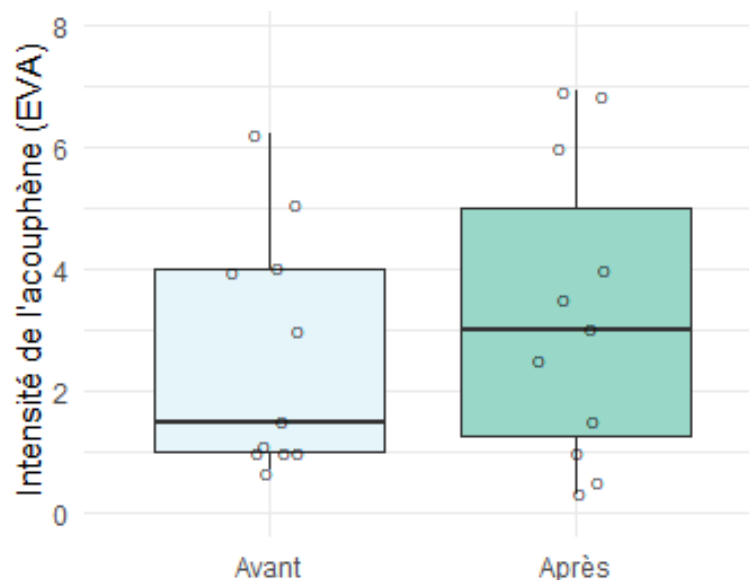


Figure 9 : Score d'intensité d'acouphène avant et après l'exposition sonore, pour les spectateurs ayant un acouphène en permanence.

Les conditions de normalité n'étant pas réunies sur ce jeu de données limité à 11 observations (test de Shapiro-Wilk : $p=0.875$), un test non-paramétrique de Wilcoxon a été réalisé sur les données appariées. Ce test ne révèle pas de différence significative entre l'intensité de l'acouphène avant et après le concert pour les spectateurs acouphéniques ($p=0.097$). Il est à noter cependant que pour 6 spectateurs, l'intensité de l'acouphène a été majorée après le concert de 1.60 ± 0.8 points (majoration minimum de 0.6 point, maximum de 3 points sur l'EVA).

- **Apparition d'acouphène aigu**

Sur les 63 participants, huit ont indiqué souffrir d'acouphène après le concert alors qu'ils n'en avaient pas avant les concerts (un participant au Concert 1, trois lors du Concert 2, et quatre lors du Concert 3). Dans ce cas, l'intensité moyenne de l'acouphène reportée sur l'échelle visuelle analogique après le concert était de 2.05 ± 1.38 (score EVA), avec un maximum de 4.6 points. La répartition des scores d'intensité d'acouphène (EVA) est illustrée en Annexe IX.

- **Lien entre majoration ou apparition d'acouphène et facteurs étudiés**

Au total, 14 participants ont subi soit une majoration d'un acouphène existant, soit une apparition d'acouphène après l'exposition sonore. Ces troubles sont apparus sur l'ensemble des concerts : deux participants lors du Concert 1 (soit 18%), cinq lors du Concert 2 (18%), et sept lors du Concert 3 (29%).

Les acouphènes ont été ressentis par trois spectateurs qui portaient des bouchons d'oreille en permanence et trois autres qui ont porté des bouchons pendant la majeure partie du concert, le reste ayant été rapporté par des spectateurs non-protégés ($N=8$). Il ne semble pas non plus exister de relation évidente entre l'apparition d'une élévation de seuils auditifs et l'évolution du score d'acouphène après l'exposition sonore. La Figure 10 illustre l'élévation de seuils (TTS_{2-4kHz}) en fonction de l'exposition sonore moyenne ($L_{Ex,2h}$) pour l'ensemble du panel, avec une identification des participants ayant subi une majoration ou une apparition d'acouphène (points « A »). Les cercles noirs indiquent le port de protections auditives pendant toute la durée du concert (trait plein), ou durant la majeure partie du concert (trait pointillé).

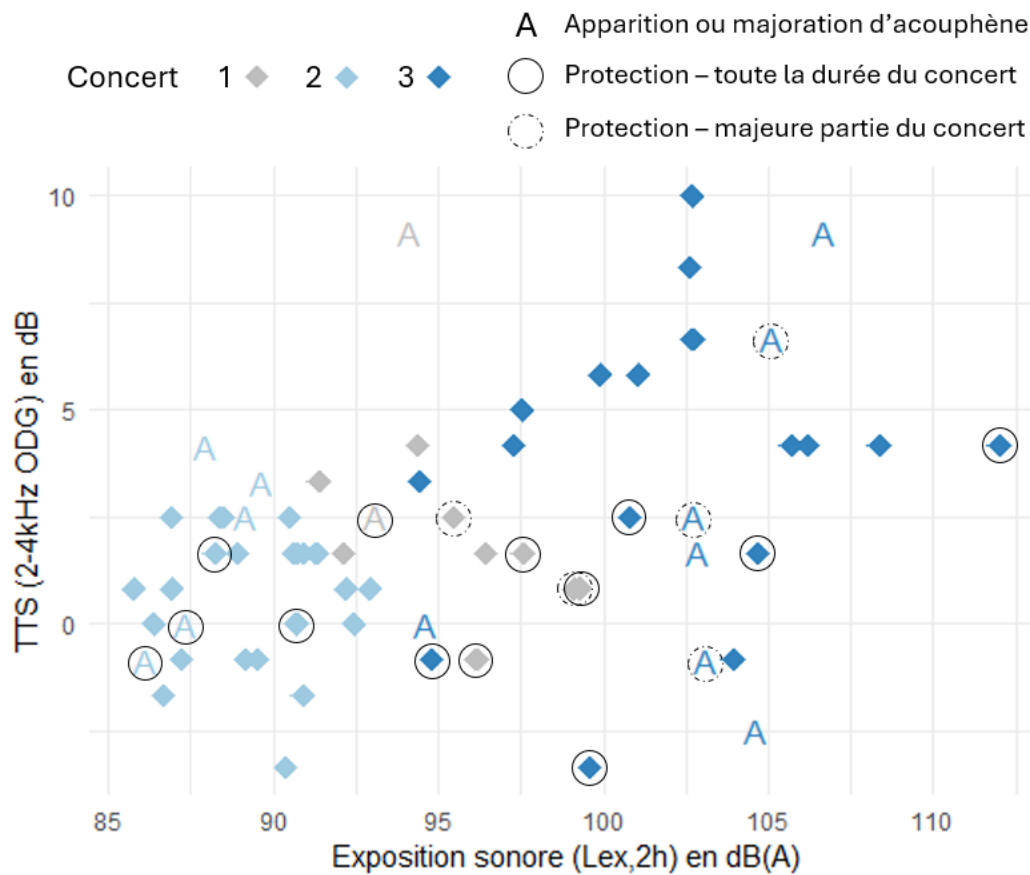


Figure 10 : Nuage de points représentant les élévations de seuils (TTS_{2-4kHz}) en fonction de l'exposition sonore moyenne ($L_{Ex,2h}$) pour l'ensemble du panel (N=63).

La Figure 10 permet de constater que les spectateurs développant un acouphène (points « A ») se retrouvaient dans les trois concerts, à des niveaux d'exposition très variés (entre 86 et 106 dB(A)), sans lien évident avec ces variables.

Une analyse de corrélations a été effectuée sur l'augmentation du score d'intensité d'acouphène (différence de score EVA après et avant le concert), en considérant les métrique acoustiques (AVG_A , AVG_C , AVG_SPL , $L_{Ex,2h}$, MAX_A , MAX_C , MAX_SPL , $DynRange$, et LF), ainsi que les facteurs non-acoustiques ($Protection$, $Alcool$, $Fatigue$, PTM). Aucune corrélation significative n'a été trouvée entre l'intensité d'acouphène et ces différents facteurs, potentiellement dû au nombre limité d'observations pour ce trouble auditif.

4. Discussions

4.1 Comparaison des résultats à la littérature

Les résultats présentés dans ce rapport sont globalement en accord avec les travaux de la littérature, en particulier concernant les **proportions de troubles auditifs observés** au sein des spectateurs, et les **niveaux sonores mesurés** dans certains concerts. Dans l'étude de Derebery et al. (21) par exemple, des élévations de seuils de 10 dB ou plus avaient été constatées pour 30 à 60% des spectateurs (N=29), pour un niveau sonore moyen dans la zone d'audience de 98.5 dB(A), et sur une audience globalement non-protégée (seulement trois participants sur 29 avaient utilisé des protections auditives). Ces chiffres semblent globalement comparables aux observations faites pour les Concert 1 et Concert 3, avec des proportions d'élévation de seuils de 10 dB ou plus de l'ordre de 40% (Concert 1) et 63% (Concert 3) auprès des populations non-protégées (Tableau 2), et des niveaux d'exposition sonore proches de 100 dB(A) (Figure 4). Le Concert 2 cependant présentait des niveaux sonores moindres, et moins d'élévations de seuils mesurées. Cette spécificité du Concert 2 est probablement liée au style musical (pop, chanson française) et aux choix de mixage réalisés par l'ingénieur du son puisque le système de sonorisation était identique entre les trois concerts. Derebery et al. avaient également souligné l'apparition d'acouphène chez 25% des participants, contre 18 à 29% dans la présente étude suivant le concert (apparition ou majoration d'acouphène).

La **zone fréquentielle** pour laquelle les élévations étaient les plus présentes (2-4 kHz) est là aussi en accord avec la littérature (21,30,34,36).

Concernant **l'effet des protections auditives**, la présente étude confirme l'efficacité du port de protections sur la diminution des élévations de seuils en isolant l'influence potentielle des autres facteurs (Tableau 3), en accord avec la littérature (22,36). Cependant, cette protection n'est pas parfaite, et certains spectateurs ont présenté des élévations de seuils notables malgré le port de protections auditives, comme l'apparition ou la majoration d'acouphène. Ramakers et al. (36) avaient également noté pour trois spectateurs parmi les 25 protégés le développement d'acouphène, bien que l'intensité du symptôme n'ait pas été quantifiée par les auteurs.

Concernant **l'effet de la consommation d'alcool** sur les troubles auditifs, cette étude n'a pas permis de révéler de lien significatif entre la consommation d'alcool pendant le concert et

l'apparition de troubles auditifs à court terme. Seules des tendances ont pu être observées, mettant plutôt en évidence un effet protecteur de l'alcool pour des consommations inférieures ou égales à deux unités (corrélation négative entre la consommation d'alcool et les élévations de seuils TTS_{2-4kHz} , visible sur la Figure 7), sans pour autant atteindre le niveau de significativité fixé. Ces résultats semblent être en opposition avec les conclusions de l'étude de Kraaijenga et al. (49) qui indiquaient une dégradation des seuils d'audition en festival due à la consommation d'alcool. Il faut cependant souligner que la présente étude a été menée sur des consommations d'alcool inférieures ou égales à deux unités (quatre participants ont été exclus pour des consommations supérieures), contre une consommation moyenne de quatre unités d'alcool pour l'étude de Kraaijenga et al. Il reste difficile de statuer sur la présence ou l'absence d'un effet de l'alcool sur l'audition (dégradation ou protection) car peu de données ont été collectées et les effets de l'alcool peuvent être très variables d'un individu à l'autre en fonction de divers facteurs (âge, genre, condition physique, alimentation avant l'ingestion d'alcool, prise de médicaments, etc.).

Concernant le **modèle explicatif des élévations de seuils**, les travaux qui se rapprochent de la démarche employée dans cette étude sont ceux de Kraaijenga et al. qui n'incluaient pas l'influence de facteurs acoustiques (49), et les travaux de thèse de Venet portant sur les professionnels du secteur de la musique amplifiée (30). Venet mettait en avant l'énergie sonore comme étant le facteur principal sur les élévations de seuils, ce qui est en accord avec la présente étude. Venet indiquait également que, sur la durée d'une journée de travail, la structure temporelle de l'exposition (dynamique sonore) jouait un rôle non négligeable sur la fatigue auditive. L'effet de la dynamique sonore n'a pas été retrouvée dans la présente étude, dans laquelle seules les périodes de concerts ont été prises en compte (soit une durée comprise entre environ 1h30 et 2h30). Il est probable que les variations du niveau sonore mesurées au cours du concert soient de trop courte durée pour permettre une récupération auditive pendant les périodes « calmes » et limiter l'apparition d'élévations de seuils. Enfin, Venet suggérait que l'amplitude de la variation des seuils auditifs pourrait être liée au genre avec un risque d'élévations de seuils à 4 kHz moins important pour les femmes. Il précisait cependant que des données supplémentaires étaient nécessaires pour conforter ces conclusions car peu de femmes avaient été exposées aux niveaux sonores les plus élevés dans son panel. Des observations similaires ont été faites dans l'étude de Kraaijenga et al. (49) mais sans prise en compte de l'exposition sonore individuelle. La présente étude retrouve une tendance liée au genre, avec

des élévations de seuils légèrement plus élevées pour les hommes que pour les femmes, à exposition sonore égale (voir Tableau 3). Cependant, cette tendance n'atteint pas le seuil de significativité fixé à 5% ($p=0.08$).

L'effet de *Vague* retrouvé dans le modèle de régression linéaire indiquerait un phénomène de récupération auditive spontanée intervenant dans les 30 premières minutes suivant l'exposition sonore. Il faut ajouter que l'environnement sonore dans lequel les spectateurs étaient immergés après l'exposition en concert n'était pas particulièrement « calme ». En effet, les niveaux sonores mesurés dans *Le Hall* étaient de l'ordre de 80 à 85 dB(A) juste après les concerts (voir Figure 2). L'amplitude de la récupération serait légèrement supérieure aux valeurs retrouvées dans l'étude de Kraaijenga et al. (49). En effet, la récupération était évaluée entre 0.02 et 0.06 dB par minute, contre 2.6 dB entre la première et dernière *Vague* dans cette étude (écart de 20 minutes), soit environ 0.13 dB par minute. Cependant, les mesures réalisées dans la présente étude correspondent à des observations indépendantes, et elles n'ont pas été répétées sur chaque participant pour évaluer rigoureusement la cinétique de récupération auditive individuelle. De plus, la cinétique de récupération suivrait plutôt une allure exponentielle décroissante qu'une allure linéaire (16,30), ce qui limiterait la pertinence de l'interprétation du coefficient de régression linéaire. Dans son travail de thèse (30), Venet a en effet réalisé des mesures répétées à deux instants sur 10 sujets et a trouvé une diminution de 50% des élévations de seuils à 4 kHz (soit une récupération de 3.75 dB) au bout de 50 minutes en moyenne. Bien que globalement en accord avec les résultats de la présente étude, la nature des expositions sonores est jugée trop différente pour être directement comparée, puisque l'étude de Venet a porté sur l'exposition sonore au cours d'une journée complète de travail.

4.2 Description de certains profils « atypiques »

Un modèle de régression ne peut décrire l'intégralité des résultats observés. Il semble intéressant de regarder au niveau individuel, les profils « atypiques » du jeu de données, pour lesquels le modèle explicatif ne permet pas de décrire les élévations de seuils observées.

Certains spectateurs non-protégés et fortement exposés n'ont pas développé d'élévations de seuils marquées.

C'est en effet le cas pour trois participants du Concert 3 en particulier, exposés à plus de 100 dB(A) en moyenne sur deux heures sans avoir porté de bouchons d'oreille et dont les élévations de seuils mesurées étaient inférieures à 2 dB. Il faut noter que sur ces trois participants, deux ont développé un autre trouble auditif avec l'apparition d'un acouphène (participant 328), ou la majoration d'un acouphène (participant 311). L'étude du dosimètre du dernier participant concerné (participant 327) a révélé que l'exposition sonore a changé brutalement au cours du concert, avec une première partie du concert pendant laquelle le participant était très exposé (105 dB(A) en moyenne pendant 1h15), alors qu'il a été beaucoup moins exposé lors de la deuxième partie du concert (environ 97 dB(A) sur la dernière heure). Ce cas précis met en évidence une limitation due à la méthode de calcul des métriques acoustiques qui semble mal adaptée pour détecter ce type de variation. Les métriques utilisées ont en effet été conçues pour évaluer l'exposition sonore moyenne sur toute la durée de l'exposition, les valeurs maximales d'exposition, et l'écart entre les niveaux d'exposition minimum et maximum pouvant témoigner d'une pause relativement brève (*DynRange*). Il aurait été intéressant d'étudier, en plus des métriques proposées, les données acoustiques uniquement sur la dernière heure d'exposition.

Un participant non-protégé mais peu exposé a développé une forte élévation de seuils.

Le participant 109 (Concert 1) a en effet présenté des élévations de seuils parmi les plus élevées ($TTS_{2-4kHz} = 9.2$ dB) et a rapporté l'apparition d'un acouphène léger (score EVA = 0.4) pour un niveau sonore pourtant « modéré » avec $L_{Ex,2h} = 94.1$ dB(A). L'inspection des données d'exposition sonore n'a pas révélé d'anomalies particulières pouvant expliquer un dysfonctionnement du matériel, par exemple. Le seul élément notable issu des données acoustiques est que ce participant a été exposé à une dynamique sonore parmi les plus faibles

observées au cours de cette expérience ($DynRange = 22$ dB pour une moyenne sur l'ensemble des concerts de 28.1 ± 4.3 dB, minimum 21.1 dB, maximum 42.3 dB). Une autre particularité de ce participant réside dans son profil auditif, puisqu'il présentait un scotome centré sur 3 kHz avant l'exposition sonore (voir Annexe IV). Bien qu'à interpréter avec précaution, ce type de profil auditif pourrait témoigner d'une certaine fragilité cochléaire liée à un traumatisme sonore antérieur.

Certains sujets ayant porté des protections auditives en permanence ont développé des troubles auditifs après le concert.

C'est notamment le cas pour le participant 301 (Concert 3) avec une **élévation de seuils** (TTS_{2-4kHz}) de 4.2 dB. Ce spectateur a indiqué après le concert qu'il était placé au premier rang, au centre, et son dosimètre a enregistré le niveau moyen le plus important de tout le panel. Le système de *subwoofers* dédié aux fréquences graves étant placé en nez de scène, il aurait été attendu d'observer un écart important entre les valeurs d'expositions en dB(A) et dB(C) pour ce spectateur, traduisant une surexposition prédominante dans les fréquences graves. Cependant, l'étude des métriques acoustiques a révélé une faible différence entre les niveaux sonores exprimés en dB(A) et en dB(C), ce qui laisse penser que le spectateur se trouvait à proximité directe du système de sonorisation de nez de scène (*front-fills*). Ce spectateur aurait donc été particulièrement surexposé, à toutes les fréquences. Ce cas pourrait illustrer les limites d'efficacité des protections auditives lorsque le niveau sonore est trop élevé, ou bien révéler un mauvais positionnement des bouchons d'oreille. Enfin, comme indiqué précédemment, certains spectateurs ont développé un **acouphène**, malgré un niveau sonore relativement faible ($L_{Ex,2h} < 88$ dB(A)), et le port de protections auditives (participants 201 et 210 du Concert 2). Il n'y a pas d'explication privilégiée compte tenu des données collectées au cours de cette expérience pour ces participants.

4.3 Limites de l'étude et perspectives de recherche dégagées

Limites dues à la taille de l'échantillon

Le nombre de participants inclus dans cette étude est relativement faible au regard du nombre de facteurs potentiellement influents sur l'apparition de troubles auditifs causée par une exposition sonore en concerts. Il a été possible de mettre en avant le rôle des facteurs les plus

influent mais les conclusions restent ouvertes concernant l'effet potentiel de la consommation d'alcool ou encore l'effet du genre des participants, par exemple. Un nombre de participants plus important permettrait d'évaluer si ces effets sont réellement absents ou s'ils n'ont pas pu être mis en évidence par manque de puissance statistique. De plus, l'augmentation du nombre d'observations aurait également été utile pour étudier l'apparition ou la majoration d'acouphène (prévalence de l'ordre de 20 à 30% dans la population testée), car aucune variable explicative n'a pu être mise en évidence dans le cadre de cette étude.

Biais de sélection et difficulté à constituer des groupes équilibrés

Le recrutement des participants a constitué une limite dans cette étude. En effet, il n'a pas été possible d'identifier un nombre de volontaires suffisant pour pouvoir faire une pré-sélection comme espéré, visant à équilibrer les groupes en termes de genre, ou d'âge, par exemple. Les panels constitués pour chaque concert diffèrent donc d'un point de vue démographique, notamment (population plus âgée lors du Concert 3, et surreprésentation des femmes lors du Concert 2). Il faut également noter que suivant le concert, les comportements ont évolué en termes de consommation d'alcool et de port de protections auditives pouvant ainsi constituer un certain biais.

Parmi les spectateurs inclus dans cette étude, la plupart sont normo-entendants et tous présentaient une PTM inférieure à 30 dB HL. Il aurait été intéressant d'étudier en parallèle de ce groupe normo-entendant, un panel de malentendants pour tester l'influence d'une fragilité cochléaire plus avancée (surdité légère à moyenne, par exemple) sur la susceptibilité à développer un trouble auditif après un concert.

Autres perspectives de recherche dégagées

Il serait intéressant de mener une étude visant à mesurer finement la **cinétique de récupération auditive spontanée** suite à une exposition sonore en concert. Il serait alors judicieux d'effectuer des mesures répétées sur chaque participant à 15, 30, 60, 120 minutes, puis 12h ou 24h après l'exposition sonore, par exemple. Ici, des mesures d'expositions sonores durant la période de récupération auditive pourraient également s'avérer utiles pour l'interprétation des résultats.

La revue de la littérature a également permis de pointer certaines **limites de l'audiométrie tonale liminaire** pour évaluer les conséquences d'une surexposition sonore. Il serait en effet

intéressant d'effectuer des mesures supraliminaires et d'évaluer les performances d'intelligibilité de la parole dans le calme mais aussi dans le bruit. En effet, les conséquences auditives de lésions synaptiques liées à une surexposition sonore sont encore débattues, notamment dans le cas d'une exposition unique en concert (25,26).

Enfin, la réalisation d'une **étude longitudinale** sur l'effet des expositions sonores répétées pourrait aussi être pertinente, en étudiant le retentissement sur la compréhension, par exemple.

Conclusion

L'objectif de cette étude était d'évaluer les conséquences auditives d'une exposition sonore en concert, et d'étudier l'influence relative de plusieurs variables sur les troubles auditifs observés. Les variables explicatives étaient liées à des facteurs acoustiques, comportementaux et individuels. Ce travail proposait donc de répondre aux questions suivantes :

- 1 Quelles sont les conséquences à court terme sur le système auditif d'une exposition sonore en concert de musique amplifiée ?
- 2 Quelles sont les variables qui ont le plus d'influence sur l'apparition de troubles auditifs des spectateurs ?

L'étude menée sur un panel de 63 spectateurs répartis sur trois concerts a permis d'évaluer deux types de troubles : des **élévations de seuils auditifs** et **l'apparition ou la majoration d'acouphène**.

Les élévations de seuils ont été principalement mesurées dans la zone de fréquence 2-4 kHz et l'amplitude des élévations observées serait liée au niveau sonore moyen, au port de protections auditives, et au temps de récupération après l'exposition. Aucune influence n'a été retrouvée pour les autres facteurs étudiés, qu'ils soient acoustiques (liés au niveau sonore maximum, à la dynamique sonore, ou la proportion de basses fréquences), individuels (genre, PTM) ou comportementaux (consommation d'alcool, niveau de fatigue). Ces résultats confortent les recommandations formulées par l'Organisation Mondiale de la Santé portant sur le niveau sonore moyen de 100 dB(A) à ne pas dépasser, l'utilisation de protections auditives et le recours aux pauses pour limiter l'exposition.

L'apparition ou la majoration d'acouphène ont touché 20 à 30% des participants, sans qu'un lien significatif avec les facteurs acoustiques, individuels ou comportementaux n'ait pu être mis en évidence.

Bien que supérieur à la plupart des panels étudiés dans la littérature, le nombre de spectateurs inclus dans cette étude reste faible au regard du nombre de facteurs potentiellement influents. De plus, les conditions acoustiques, les données démographiques, et les comportements des spectateurs étaient relativement variables d'un concert à l'autre. Cette variabilité a été utile pour

faire ressortir les facteurs les plus influents mais ne permet pas de conclure quant à l'effet du genre ou de la consommation d'alcool, par exemple. Aussi, il serait intéressant de collecter plus de données sur un seul concert, avec des groupes équilibrés pour étudier plus finement l'influence de ces facteurs sur l'apparition de troubles auditifs. Des observations plus nombreuses pourraient peut-être permettre d'établir des liens avec les acouphènes contre lesquels il semble plus difficile de se protéger (pas de lien évident avec le niveau sonore, ni avec l'utilisation de protections auditives d'après cette étude).

Bien que les élévations de seuils soient pertinentes pour évaluer la sensation d'hypoacousie fréquemment rapportée suite à un concert, il serait également judicieux de réaliser des tests supplémentaires. Des tests de compréhension de la parole dans le calme et dans le bruit seraient notamment utiles pour détecter des troubles de compréhension consécutifs à une surexposition sonore. Il serait également intéressant de mettre en place un suivi des participants, pour évaluer l'effet à distance d'une surexposition sonore, ou d'expositions répétées.

Bibliographie

1. Le TN, Straatman LV, Lea J, Westerberg B. Current insights in noise-induced hearing loss: A literature review of the underlying mechanism, pathophysiology, asymmetry, and management options. *J Otolaryngol - Head Neck Surg*. 1 janv 2017;46(1):41.
2. Natarajan N, Batts S, Stankovic KM. Noise-Induced Hearing Loss. *J Clin Med*. janv 2023;12(6):2347.
3. Décret n° 2003-924 du 25 septembre 2003 révisant et complétant les tableaux des maladies professionnelles annexés au livre IV du code de la sécurité sociale. Disponible sur: <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000000797409>
4. Chan HS. Criteria for a Recommended Standard: Occupational Noise Exposure: Revised Criteria 1998. Disponible sur: <https://stacks.cdc.gov/view/cdc/6376>
5. Borg E. The Dynamic Properties of the Acoustic Middle Ear Reflex in Nonanesthetized Rabbits. Quantitative Aspects of a Polysynaptic Reflex System. *Acta Physiol Scand*. 1972;86(3):366-87.
6. Qiu WW, and Stucker FJ. Characterization of Acoustic Reflex Latency in Normal-Hearing Subjects. *Scand Audiol*. 1 janv 1998;27(1):43-9.
7. Trevino M, Zang A, Lobarinas E. The middle ear muscle reflex: Current and future role in assessing noise-induced cochlear damage. *J Acoust Soc Am*. janv 2023;153(1):436-45.
8. Héту R, Careau PU. Decay of the acoustic reflex during steady-state and intermittent noise exposures. *J Acoust Soc Am*. 11 août 2005;61(S1):S3.
9. Nordmann AS, Böhne BA, Harding GW. Histopathological differences between temporary and permanent threshold shift. *Hear Res*. janv 2000;139(1-2):13-30.
10. Pujol R, Puel JL. Excitotoxicity, synaptic repair, and functional recovery in the mammalian cochlea: a review of recent findings. *Ann N Y Acad Sci*. 28 nov 1999;884:249-54.
11. Puel JL, Ruel J, Gervais d'Aldin C, Pujol R. Excitotoxicity and repair of cochlear synapses after noise-trauma induced hearing loss. *Neuroreport*. 22 juin 1998;9(9):2109-14.
12. Diuba A, Gratiás P, Jeffers PWC, Nouvian R, Puel JL, Kujawa SG, et al. Phenotypic changes of auditory nerve fibers after excitotoxicity. *Proc Natl Acad Sci*. 8 avr 2025;122(14):e2412332122.
13. Mehrotra A, Shukla SP, Shukla AK, Manar MK, Singh SK, Mehrotra M. A Comprehensive Review of Auditory and Non-Auditory Effects of Noise on Human Health. *Noise Health*. juin 2024;26(121):59.
14. Salazar MR. Hypertension, a linchpin between environmental noise exposure and the development of cardiovascular disease? *J Clin Hypertens*. 2023;25(2):165-7.
15. Xu X, Lan L, Sun Y, Lian Z. The effect of noise exposure on sleep quality of urban residents: A comparative study in Shanghai, China. *Build Simul*. 1 avr 2023;16(4):603-13.

16. Strasser H, Irle H, Legler R. Temporary hearing threshold shifts and restitution after energy-equivalent exposures to industrial noise and classical music. *Noise Health*. 2003;5(20):75-84.
17. Mazurek B, Olze H, Haupt H, Szczepek AJ. The More the Worse: the Grade of Noise-Induced Hearing Loss Associates with the Severity of Tinnitus. *Int J Environ Res Public Health*. août 2010;7(8):3071-9.
18. Salazar JW, Meisel K, Smith ER, Quiggle A, McCoy DB, Amans MR. Depression in Patients with Tinnitus: A Systematic Review. *Otolaryngol Neck Surg*. 1 juill 2019;161(1):28-35.
19. WHO Global Standard for Safe Listening Venues and Events. 1st ed. Geneva: World Health Organization; 2022. 1 p.
20. Décret n° 2017-1244 du 7 août 2017 relatif à la prévention des risques liés aux bruits et aux sons amplifiés. 2017-1244 août 7, 2017. Disponible sur: <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/decret/2017/8/7/2017-1244/jo/texte>
21. Derebery MJ, Vermiglio A, Berliner KI, Potthoff M, Holguin K. Facing the music: pre- and postconcert assessment of hearing in teenagers. *Otol Neurotol Off Publ Am Otol Soc Am Neurotol Soc Eur Acad Otol Neurotol*. sept 2012;33(7):1136-41.
22. Opperman DA, Reifman W, Schlauch R, Levine S. Incidence of Spontaneous Hearing Threshold Shifts during Modern Concert Performances. *Otolaryngol Neck Surg*. 1 avr 2006;134(4):667-73.
23. Diviani N, Chadha S, Arunda MO, Rubinelli S. Attitudes towards Safe Listening Measures in Entertainment Venues: Results from an International Survey among Young Venue-Goers. *Int J Environ Res Public Health*. 6 déc 2021;18(23):12860.
24. Bogoch II, House RA, Kudla I. Perceptions About Hearing Protection and Noise-induced Hearing Loss of Attendees of Rock Concerts. *Can J Public Health Rev Can Santé Publique*. janv 2005;96(1):69-72.
25. Grinn SK, Wiseman KB, Baker JA, Le Prell CG. Hidden Hearing Loss? No Effect of Common Recreational Noise Exposure on Cochlear Nerve Response Amplitude in Humans. *Front Neurosci*. 2017;11:465.
26. Kujawa SG, Liberman MC. Adding Insult to Injury: Cochlear Nerve Degeneration after “Temporary” Noise-Induced Hearing Loss. *J Neurosci*. 11 nov 2009;29(45):14077-85.
27. Tronstad TV, Gelderblom FB. Sound Exposure During Outdoor Music Festivals. *Noise Health*. 2016;18(83):220-8.
28. Edvardsen MA. Analysis of measurements from Norwegian venues for amplified music [Master thesis]. Norwegian University of Science and Technology - NTNU; 2021. Disponible sur: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2823487>
29. Axelsson A, Lindgren F. Temporary threshold shift after exposure to pop music. *Scand Audiol*. 1978;7(3):127-35.
30. Venet T. Evaluation de la fatigue auditive chez des sujets exposés à de la musique amplifiée : recherche d’indicateurs d’exposition pertinents [Thèse de doctorat]. Université de Lorraine; 2022. Disponible sur: <https://theses.fr/2022LORR0070>

31. Moulin S, Corteel E, Montignies F. Optimum measurement locations for large-scale loudspeaker system tuning based on first-order reflections analysis. In: Audio Engineering Society. New York; 2019.
32. Corteel E, Coste-Dombre H, Combet C, Horyn Y, Montignies F. On the efficiency of flown vs. ground-stacked subwoofer configurations. In: Audio Engineering Society. New York; 2018.
33. Santos TSD, Bordiga P, Avan P. Auditory changes in awake guinea pigs exposed to overcompressed music. *Hear Res.* 1 nov 2024;453:109120.
34. Helleman HW, Dreschler WA. Short-term music-induced hearing loss after sound exposure to discotheque music: the effectiveness of a break in reducing temporary threshold shift. *Int J Audiol.* févr 2015;54 Suppl 1:S46-52.
35. Rintelmann WF, Lindberg RF, Smitley EK. Temporary Threshold Shift and Recovery Patterns from Two Types of Rock and Roll Music Presentation. *J Acoust Soc Am.* 1 avr 1972;51(4B):1249-55.
36. Ramakers GGJ, Kraaijenga VJC, Cattani G, van Zanten GA, Grolman W. Effectiveness of Earplugs in Preventing Recreational Noise-Induced Hearing Loss: A Randomized Clinical Trial. *JAMA Otolaryngol-- Head Neck Surg.* 1 juin 2016;142(6):551-8.
37. Qian P, Zhao Z, Liu S, Xin J, Liu Y, Hao Y, et al. Alcohol as a risk factor for hearing loss: A systematic review and meta-analysis. *PloS One.* 2023;18(1):e0280641.
38. Popelka MM, Cruickshanks KJ, Wiley TL, Tweed TS, Klein BE, Klein R, et al. Moderate alcohol consumption and hearing loss: a protective effect. *J Am Geriatr Soc.* oct 2000;48(10):1273-8.
39. Dawes P, Cruickshanks KJ, Moore DR, Edmondson-Jones M, McCormack A, Fortnum H, et al. Cigarette Smoking, Passive Smoking, Alcohol Consumption, and Hearing Loss. *J Assoc Res Otolaryngol.* 1 août 2014;15(4):663-74.
40. Curhan SG, Eavey R, Shargorodsky J, Curhan GC. Prospective Study of Alcohol Use and Hearing Loss in Men. *Ear Hear.* févr 2011;32(1):46-52.
41. Choi HG, Hong SK, Lee HJ, Chang J. Acute Alcohol Intake Deteriorates Hearing Thresholds and Speech Perception in Noise. *Audiol Neurotol.* 2021;26(4):218-25.
42. Upile T, Sipaul F, Jerjes W, Singh S, Nouraei SAR, El Maaytah M, et al. The acute effects of alcohol on auditory thresholds. *BMC Ear Nose Throat Disord.* 18 sept 2007;7:4.
43. Hwang J haur, Tan ,Ching-ting, Chiang ,Ching-wen, and Liu T chen. Acute Effects of Alcohol on Auditory Thresholds and Distortion Product Otoacoustic Emissions in Humans. *Acta Otolaryngol (Stockh).* 1 août 2003;123(8):936-40.
44. Muchnik C, Sahartov E, Peleg E, Hildesheimer M. Temporary threshold shift due to noise exposure in guinea pigs under emotional stress. *Hear Res.* févr 1992;58(1):101-6.
45. Mazurek B, Haupt H, Joachim R, Klapp BF, Stöver T, Szczepek AJ. Stress induces transient auditory hypersensitivity in rats. *Hear Res.* 1 janv 2010;259(1):55-63.

46. Thompson PS, Dengerink ,Harold A., and George JM. Noise-induced Temporary Threshold Shifts: The Effects of Anticipatory Stress and Coping Strategies. *J Human Stress*. 1 mars 1987;13(1):32-8.
47. Leaver AM, Seydell-Greenwald A, Rauschecker JP. Auditory-limbic interactions in chronic tinnitus: challenges for neuroimaging research. *Hear Res*. avr 2016;334:49-57.
48. Hellström PA, Axelsson A, Costa O. Temporary threshold shift induced by music. *Scand Audiol Suppl*. 1998;48:87-94.
49. Kraaijenga VJC, van Munster JJCM, van Zanten GA. Association of Behavior With Noise-Induced Hearing Loss Among Attendees of an Outdoor Music Festival. *JAMA Otolaryngol--Head Neck Surg*. juin 2018;144(6):490-7.
50. Long R, Lin ME, Iyer A, Ayo-Ajibola O, Choi JS, Doherty J. New Paradigm of Music Listening: Hearing Protection Perceptions and Treatment Decision-Making Among Music Venue Attendees. *Otolaryngol Neck Surg*. 2024;170(3):776-87.
51. Gardenas J. Échelles et outils d'évaluation en médecine générale. In: *Le généraliste*, 2187. 2002. p. 1-54.
52. Northcote J, Livingston M. Accuracy of Self-Reported Drinking: Observational Verification of 'Last Occasion' Drink Estimates of Young Adults. *Alcohol Alcohol*. 1 nov 2011;46(6):709-13.
53. Wallaert N, Perry A, Quarino S, Jean H, Creff G, Godey B, et al. Performance and reliability evaluation of an improved machine learning-based pure-tone audiometry with automated masking. *World J Otorhinolaryngol - Head Neck Surg*. 2025;11(2):173-88.
54. Génin A, Louchet A, Balcon M, Ceccato JC, Venail F. Validation of a tablet-based application for hearing self-screening in an adult population. *Int J Audiol*. août 2024;63(8):639-47.
55. Smull CC, Madsen B, Margolis RH. Evaluation of Two Circumaural Earphones for Audiometry. *Ear Hear*. janv 2019;40(1):177-83.
56. Cheng HL, Han JY, Zheng WZ, Cheng YF, Chu YC, Lin CM, et al. Objective Signal Analysis for Investigating Feasibility of Active Noise Cancellation in Hearing Screening. *Sensors*. janv 2022;22(19):7329.
57. Bromwich MA, Parsa V, Lanthier N, Yoo J, Parnes LS. Active Noise Reduction Audiometry: A Prospective Analysis of a New Approach to Noise Management in Audiometric Testing. *The Laryngoscope*. 2008;118(1):104-9.
58. Paquier M, Koehl V, Jantzen B. Effect of headphone position on absolute threshold measurements. *Appl Acoust*. 1 avr 2016;105:179-85.
59. Falissard B. Focused Principal Component Analysis: Looking at a Correlation Matrix with a Particular Interest in a Given Variable. *J Comput Graph Stat*. 1 déc 1999;8(4):906-12.
60. Akaike H. A new look at the statistical model identification. *IEEE Trans Autom Control*. déc 1974;19(6):716-23.

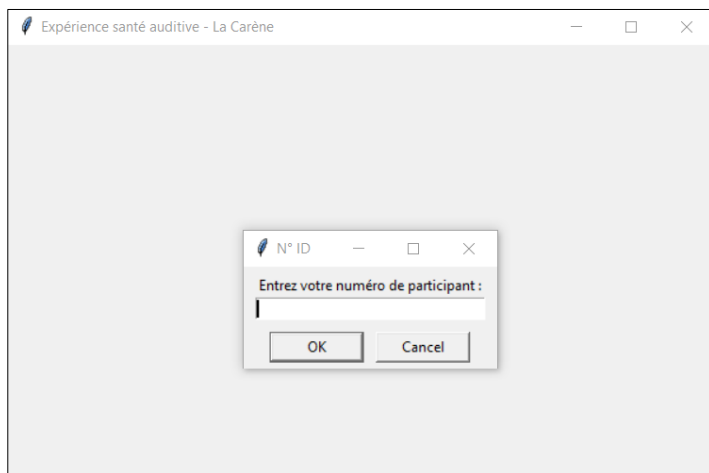
Annexes

ANNEXE I : Photos d'un dosimètre et des 10 postes installés dans *Le Club*



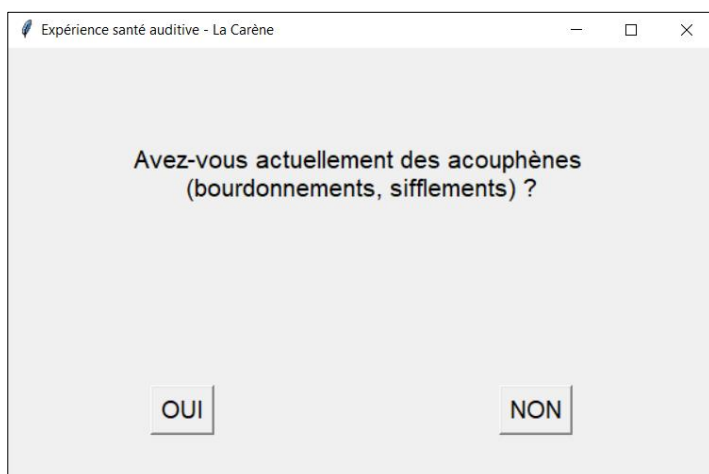
ANNEXE II : Interface utilisateur du logiciel développé pour le recueil des troubles auditifs

Étape 1 : Identification du participant

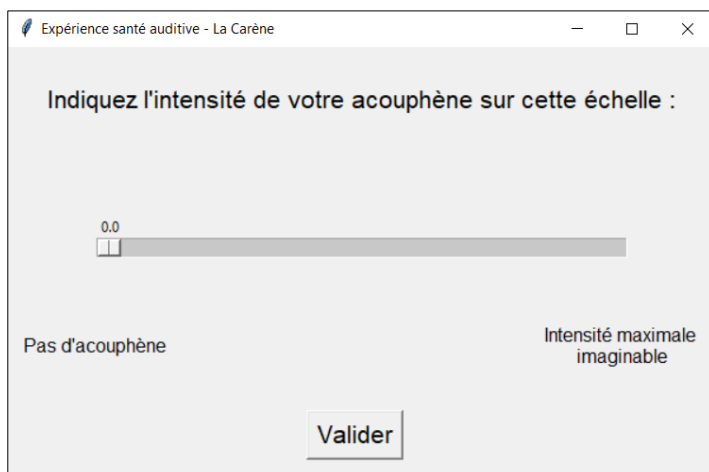


The screenshot shows a window titled "Expérience santé auditive - La Carène". In the center, there is a smaller dialog box titled "N° ID". The dialog box contains the text "Entrez votre numéro de participant :" followed by a text input field. Below the input field are two buttons: "OK" and "Cancel".

Étape 2 : Question sur acouphène potentiel et évaluation de son intensité

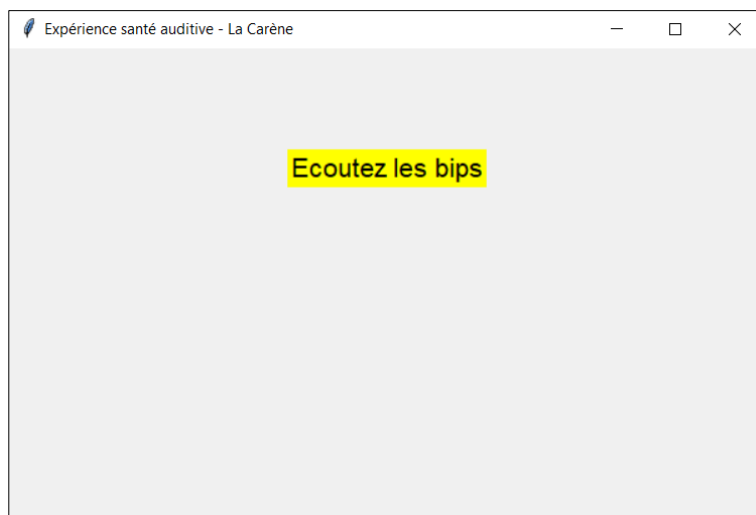
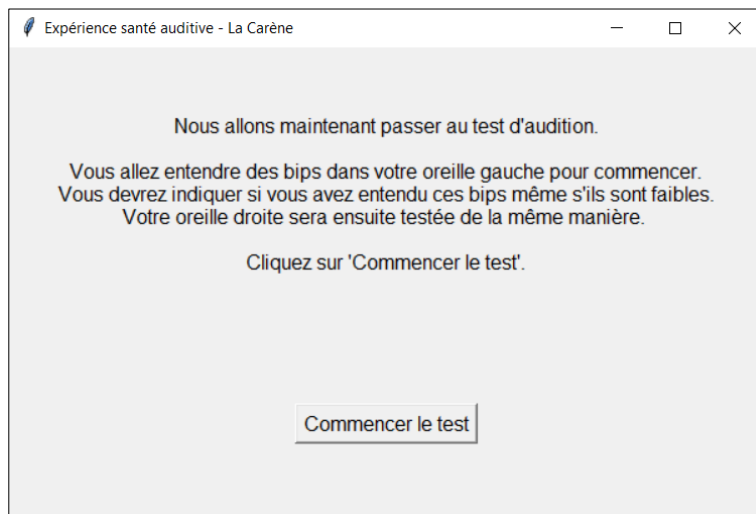


The screenshot shows a window titled "Expérience santé auditive - La Carène". The main text in the window is "Avez-vous actuellement des acouphènes (bourdonnements, sifflements) ?". At the bottom of the window, there are two buttons: "OUI" and "NON".



The screenshot shows a window titled "Expérience santé auditive - La Carène". The main text in the window is "Indiquez l'intensité de votre acouphène sur cette échelle :". Below this text is a horizontal slider scale. The left end of the scale is labeled "0.0" and "Pas d'acouphène". The right end of the scale is labeled "Intensité maximale imaginable". A small vertical bar is positioned at the left end of the scale. At the bottom of the window, there is a button labeled "Valider".

Étape 3 : Instructions puis interface du test d'audition



ANNEXE III : Résumé des analyses statistiques des métriques acoustiques des 3 concerts

Catégorie	Métrique	ANOVA sur le facteur Concert	Niveau(x) le plus haut	Niveau le plus bas
Niveaux sonores moyens	$L_{Ex,2h}$	$F(2, 60) = 107, p < 0.01$	Concert 3	Concert 2
	AVG_A	$F(2, 60) = 77.5, p < 0.01$	Concert 3	Concert 2
	AVG_C	$F(2, 60) = 182, p < 0.01$	Concert 3	Concert 2
	AVG_SPL	$F(2, 60) = 181, p < 0.01$	Concert 3	Concert 2
Niveaux sonores maximums	MAX_A	$F(2, 60) = 8.15, p < 0.01$	Concert 1, Concert 3	Concert 2
	MAX_C	$F(2, 60) = 78.3, p < 0.01$	Concert 1, Concert 3	Concert 2
	MAX_SPL	$F(2, 60) = 83, p < 0.01$	Concert 1, Concert 3	Concert 2
Dynamique des niveaux sonores	$DynRange$	$F(2, 60) = 7.55, p < 0.01$	Concert 2	Concert 3
Niveau de basses fréquences	LF	$F(2, 60) = 7.92, p < 0.01$	Concert 3	Concert 2

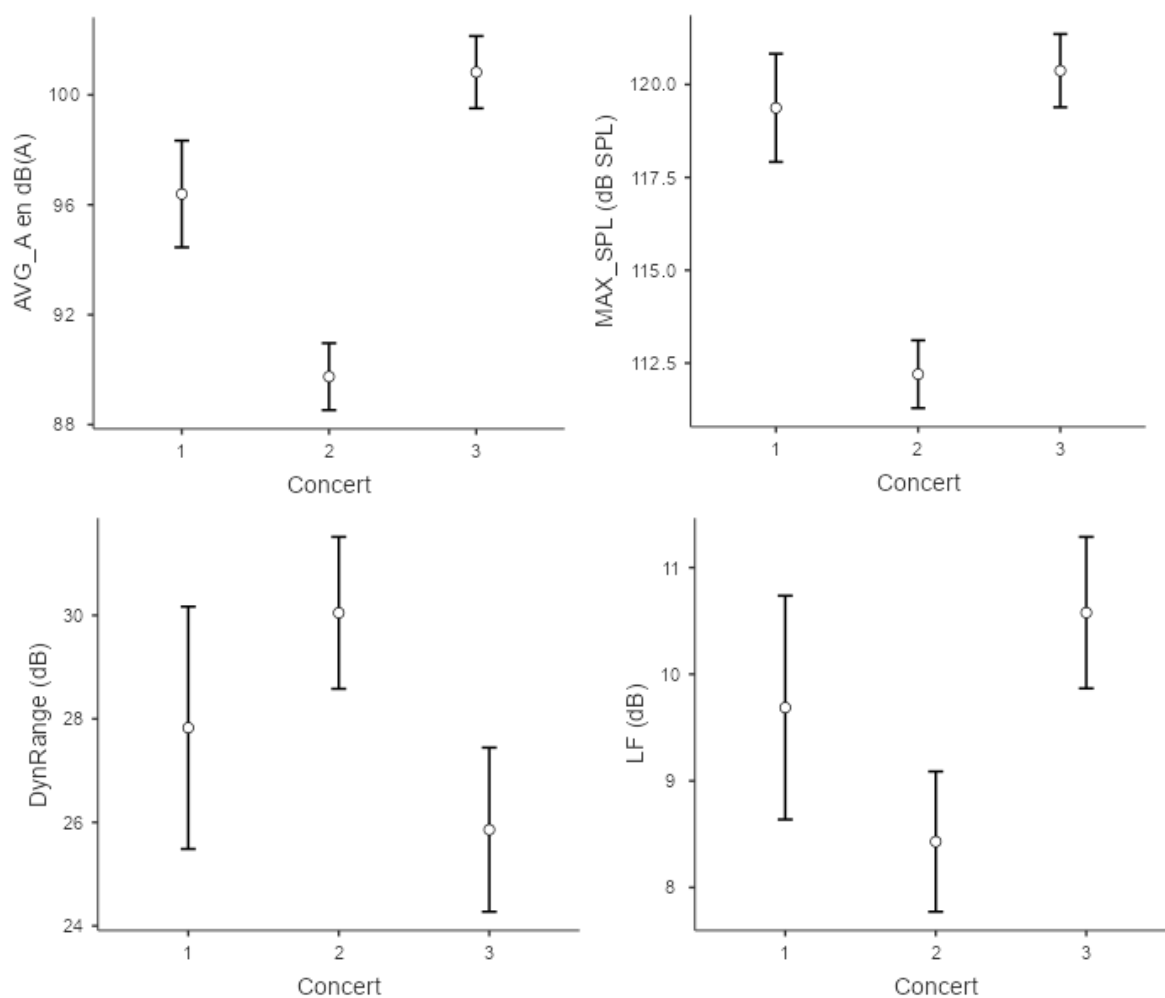
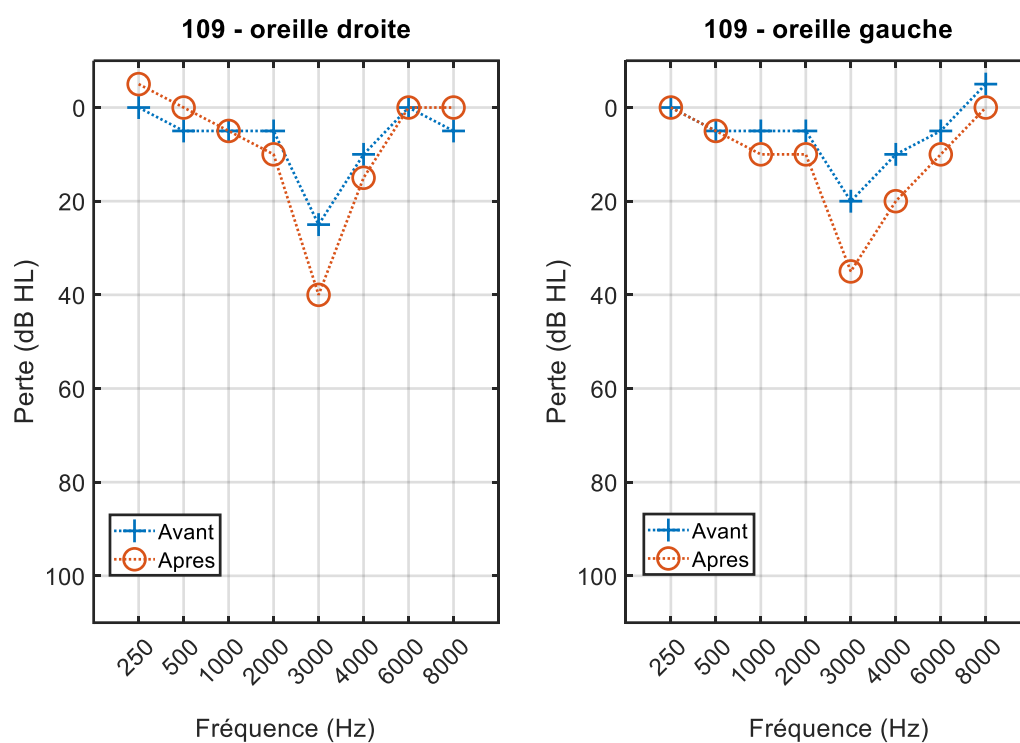
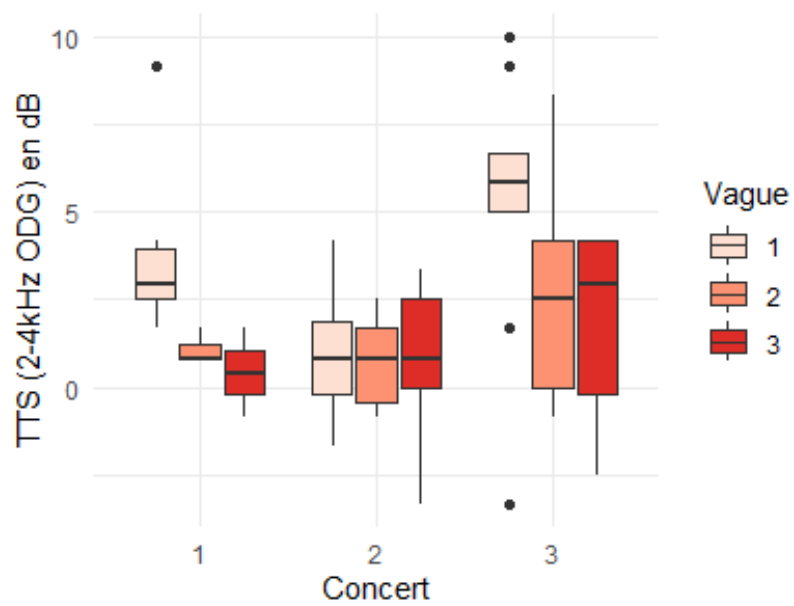


Figure III.1 : Moyennes et intervalles de confiance à 95% pour les métriques AVG_A (en haut, à gauche), MAX_SPL (haut, droite), $DynRange$ (bas, gauche) et LF (bas, droite).

ANNEXE IV : Exemple de relevés de seuils auditifs avant et après l'exposition sonore



ANNEXE V : Effet conjugué des facteurs Concert et Vague sur les élévations de seuils



ANNEXE VI : Matrices de corrélation entre les variables explicatives

VI.1: Matrice de corrélation entre TTS_{2-4kHz} et les métriques acoustiques

Matrice de corrélation		TTS 2-4kHz (dB)	AVG_A	AVG_C	AVG_SPL	Dose_Lex,2h	MAX_A	MAX_C	MAX_SPL	DynRange (dB)	LF (dB)
TTS 2-4kHz (dB)	r de Pearson	—									
	ddl	—									
AVG_A	valeur p	—									
	r de Pearson	0.401 **	—								
	ddl	61	—								
AVG_C	valeur p	0.001	—								
	r de Pearson	0.389 **	0.954 ***	—							
	ddl	61	61	—							
AVG_SPL	valeur p	0.002	< .001	—							
	r de Pearson	0.386 **	0.952 ***	1.000 ***	—						
	ddl	61	61	61	—						
Dose_Lex,2h	valeur p	0.002	< .001	< .001	—						
	r de Pearson	0.405 ***	0.994 ***	0.963 ***	0.960 ***	—					
	ddl	61	61	61	61	—					
MAX_A	valeur p	< .001	< .001	< .001	< .001	—					
	r de Pearson	0.093	0.617 ***	0.554 ***	0.552 ***	0.570 ***	—				
	ddl	61	61	61	61	61	—				
MAX_C	valeur p	0.466	< .001	< .001	< .001	< .001	—				
	r de Pearson	0.292 *	0.842 ***	0.910 ***	0.912 ***	0.832 ***	0.715 ***	—			
	ddl	61	61	61	61	61	61	—			
MAX_SPL	valeur p	0.020	< .001	< .001	< .001	< .001	< .001	—			
	r de Pearson	0.296 *	0.841 ***	0.912 ***	0.915 ***	0.834 ***	0.661 ***	0.975 ***	—		
	ddl	61	61	61	61	61	61	61	—		
DynRange (dB)	valeur p	0.019	< .001	< .001	< .001	< .001	< .001	< .001	—		
	r de Pearson	-0.291 *	-0.528 ***	-0.436 ***	-0.432 ***	-0.526 ***	-0.313 *	-0.280 *	-0.308 *	—	
	ddl	61	61	61	61	61	61	61	61	—	
LF (dB)	valeur p	0.020	< .001	< .001	< .001	< .001	0.012	0.026	0.014	—	
	r de Pearson	0.073	0.133	0.422 ***	0.430 ***	0.181	-0.034	0.467 ***	0.472 ***	0.153	—
	ddl	61	61	61	61	61	61	61	61	61	—
valeur p		0.566	0.300	< .001	< .001	0.156	0.793	< .001	< .001	0.231	—

Note: * p < .05, ** p < .01, *** p < .001

VI.2: Matrice de corrélation entre TTS_{2-4kHz} et les variables non-acoustiques

Matrice de corrélation

		TTS 2-4kHz (dB)	Protection	Vague	Alcool (unité)	Fatigue	PTM (dB HL)	Sexe
TTS 2-4kHz (dB)	r de Pearson	—						
	ddl	—						
	valeur p	—						
Protection	r de Pearson	-0.229	—					
	ddl	61	—					
	valeur p	0.071	—					
Vague	r de Pearson	-0.340**	-0.280*	—				
	ddl	61	61	—				
	valeur p	0.006	0.026	—				
Alcool (unité)	r de Pearson	-0.195	-0.137	0.189	—			
	ddl	61	61	61	—			
	valeur p	0.125	0.285	0.138	—			
Fatigue	r de Pearson	-0.146	0.031	0.202	0.147	—		
	ddl	61	61	61	61	—		
	valeur p	0.254	0.809	0.112	0.251	—		
PTM (dB HL)	r de Pearson	0.013	-0.031	0.103	-0.125	0.191	—	
	ddl	61	61	61	61	61	—	
	valeur p	0.918	0.809	0.420	0.329	0.134	—	
Sexe	r de Pearson	0.330**	0.125	-0.215	0.047	-0.081	0.085	—
	ddl	61	61	61	61	61	61	—
	valeur p	0.008	0.327	0.091	0.712	0.530	0.506	—

Note. * $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$

ANNEXE VII : Modèles de régression linéaire considérés et AIC associés

Exemple de modèles linéaires considérés :

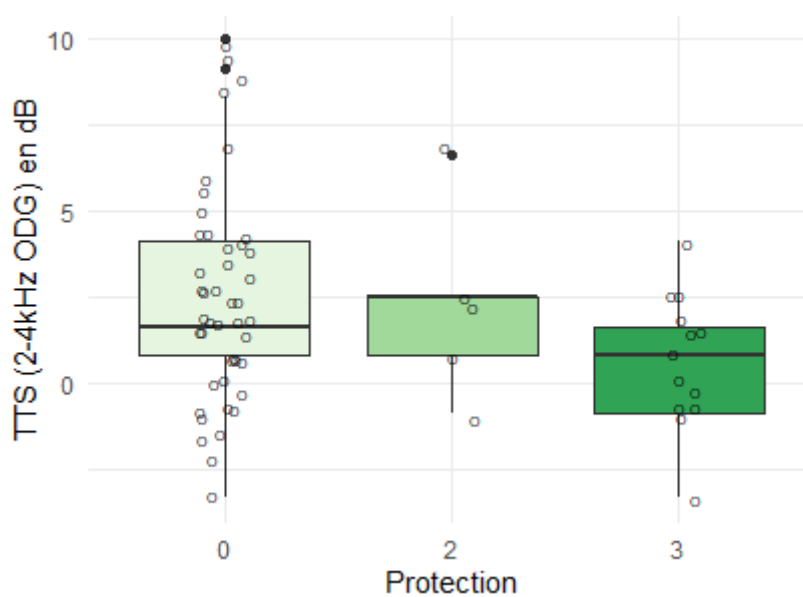
- **Nul** = $\text{lm}(\text{TTS_24kHz} \sim \text{Vague})$
- **AcBasic** = $\text{lm}(\text{TTS_24kHz} \sim \text{Vague} + \text{Lex2h_cat})$
- **AcIntermed1** = $\text{lm}(\text{TTS_24kHz} \sim \text{Vague} + \text{Lex2h_cat} + \text{DynRange})$
- **AcIntermed2** = $\text{lm}(\text{TTS_24kHz} \sim \text{Vague} + \text{Lex2h_cat} + \text{LF})$
- **AcIntermed3** = $\text{lm}(\text{TTS_24kHz} \sim \text{Vague} + \text{Lex2h_cat} + \text{MAX_SPL})$
- **HybridAcBasicNonAc1** = $\text{lm}(\text{TTS_24kHz} \sim \text{Vague} + \text{Lex2h_cat} + \text{Protection})$
- **HybridAcBasicNonAc2** = $\text{lm}(\text{TTS_24kHz} \sim \text{Vague} + \text{Lex2h_cat} + \text{Alcool})$
- **HybridAcBasicNonAc3** = $\text{lm}(\text{TTS_24kHz} \sim \text{Vague} + \text{Lex2h_cat} + \text{Fatigue})$
- **Advanced1** = $\text{lm}(\text{TTS_24kHz} \sim \text{Vague} + \text{Lex2h_cat} + \text{Protection} + \text{Alcool})$
- **Advanced2** = $\text{lm}(\text{TTS_24kHz} \sim \text{Vague} + \text{Lex2h_cat} + \text{Protection} + \text{Genre})$
- **Advanced3** = $\text{lm}(\text{TTS_24kHz} \sim \text{Vague} + \text{Lex2h_cat} + \text{Protection} + \text{PTM})$
- **Advanced2_LexContinu** = $\text{lm}(\text{TTS_24kHz} \sim \text{Vague} + \text{Lex2h} + \text{Protection} + \text{Genre})$

Valeurs d'AICc* et nombre de paramètres K des différents modèles linéaires considérés :

	K	AICc	Différence d'AICc	
Advanced2_LexContinu	8	291.71	0.00	
Advanced2	10	295.26	3.56	→ modèle retenu
HybridAcBasicNonAc1	9	296.01	4.31	
Advanced1	11	297.73	6.03	
Advanced3	10	298.28	6.57	
AcBasic	7	304.67	12.97	
AcIntermed1	8	306.80	15.09	
HybridAcBasicNonAc3	8	306.85	15.14	
AcIntermed3	8	306.86	15.16	
AcIntermed2	8	307.30	15.60	
HybridAcBasicNonAc2	9	308.45	16.74	
Nul	4	312.87	21.16	

* AICc ou « AIC corrigé » applique une correction sur le critère AIC, afin de tenir compte du nombre limité d'observations par rapport au nombre de paramètres considérés dans le modèle.

ANNEXE VIII : Élévations de seuils en fonction des catégories du port de protections auditives



Le niveau de protection est codé entre 0 et 3 :

- 0 : absence de protections,
- 1 : port de protections pendant moins de la moitié du concert
- 2 : port de protections pendant la majeure partie du concert
- 3 : port de protections pendant toute la durée du concert

ANNEXE IX : Répartition des scores d'intensité d'acouphène (EVA) dans le cas d'apparition d'acouphène

