



# Facteurs acoustiques, auditifs et émotionnels de l'hyperacousie

Rapport de stage

18 mars - 5 juillet 2024

**Charlotte Fernandez**

Master ATIAM

Sorbonne Université, Télécom Paris, IRCAM

**Encadrement : Vincent Isnard**

*vincent.isnard@def.gouv.fr*

Institut de Recherche Biomédicale des Armées

Département Neurosciences et Sciences Cognitives

Unité Perception



## Résumé

Cette étude explore les facteurs auditifs, acoustiques et émotionnels de l'hyperacousie, une condition caractérisée par une intolérance anormale aux sons quotidiens. Réalisée à l'Institut de Recherche Biomédicale des Armées, la recherche vise à mieux comprendre l'hyperacousie à travers des approches psychophysiques. Des tests audiologiques standards et poussés, incluant tympanométrie, audiométries tonale et vocale, et tests d'otoémissions acoustiques, ont été réalisés pour étudier les liens entre l'hyperacousie et l'état auditif. Nous avons également étudié l'influence des facteurs acoustiques et émotionnels dans l'évaluation du caractère agréable de stimuli sonores. Les résultats préliminaires suggèrent des corrélations significatives entre l'état auditif, l'hyperacousie et les réactions émotionnelles, offrant ainsi des perspectives sur la compréhension de ce trouble de l'audition encore peu exploré.

## Abstract

This study explores the auditory, acoustic, and emotional factors of hyperacusis, a condition characterized by abnormal intolerance to everyday sounds. Conducted at the French Armed Forces Biomedical Research Institute, the research aims to better understand hyperacusis through psychophysical approaches. Standard and advanced audiological tests, including tympanometry, pure-tone and speech audiometry, and otoacoustic emissions tests, were performed to study the links between hyperacusis and hearing status. We also studied the influence of acoustic and emotional factors in the assessment of the pleasantness of sound stimuli. Preliminary results suggest significant correlations between hearing status, hyperacusis, and emotional reactions, thus offering insights into the understanding of this still little-explored hearing disorder.

## Remerciements

Je souhaite exprimer ma sincère gratitude à toutes les personnes qui ont contribué au bon déroulement de mon stage et à la rédaction de ce rapport.

Tout d'abord, je remercie Vincent Isnard, mon responsable de stage, pour son accompagnement, ses précieux conseils, et son soutien tout au long de cette expérience. Merci de m'avoir fait confiance et permis de mener cette expérience.

Je tiens également à remercier Madame Françoise Darses, cheffe du département Neurosciences et Sciences Cognitives à l'IRBA, ainsi que Monsieur Justin Plantier, chef de l'unité Perception, pour m'avoir accueilli au sein de leur équipe et permis de réaliser ce stage dans les meilleures conditions.

Je suis reconnaissante envers l'équipe Espaces Acoustiques et Cognitifs à l'IRCAM pour m'avoir donné accès à leurs locaux pour y réaliser une partie des passations expérimentales. Leur accueil et leur collaboration ont été essentiels pour la réussite de cette partie du stage.

Je souhaite aussi remercier chaleureusement les professeurs du Master ATIAM qui ont rendu possible la réalisation et l'aménagement de ce stage facultatif. Leur flexibilité et leur compréhension m'ont permis d'enrichir mon parcours académique par cette expérience professionnelle.

Je remercie également tous les membres des équipes de l'IRBA et de l'IRCAM pour leur coopération et pour les échanges que j'ai pu avoir avec eux. Leur soutien a fait de ce stage une expérience enrichissante sur les plans personnel et professionnel.

Finalement, je remercie ma grand-mère pour son aide dans la relecture de ce rapport de stage et ses conseils précieux.

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
1.1	L'IRBA . . . . .	1
1.2	Le projet HYMIL . . . . .	1
1.3	Contributions au projet de recherche . . . . .	1
<b>2</b>	<b>Contexte et objectifs de la recherche</b>	<b>2</b>
2.1	Généralités sur l'hyperacousie . . . . .	2
2.2	Hyperacousie, état auditif et exposition au bruit . . . . .	3
2.3	Objectifs de la recherche . . . . .	3
<b>3</b>	<b>Matériels et méthodes</b>	<b>5</b>
3.1	Participants . . . . .	5
3.2	Évaluation de l'état auditif . . . . .	5
3.2.1	Questionnaires . . . . .	5
3.2.2	Tests audiologiques . . . . .	6
3.3	Évaluation émotionnelle . . . . .	6
3.4	Évaluation de l'hyperacousie . . . . .	7
3.4.1	Questionnaire d'Hyperacousie . . . . .	7
3.4.2	Échelles visuelles analogiques . . . . .	7
3.4.3	Corpus sonore . . . . .	7
3.5	Analyses statistiques . . . . .	8
<b>4</b>	<b>Résultats</b>	<b>11</b>
4.1	État auditif et hyperacousie . . . . .	11
4.1.1	Audiométrie tonale . . . . .	11
4.1.2	Audiométrie vocale dans le bruit . . . . .	11
4.1.3	Otoémissions acoustiques . . . . .	11
4.1.4	Acouphènes . . . . .	11
4.2	Évaluation de l'hyperacousie . . . . .	13
4.2.1	Questionnaire d'Hyperacousie . . . . .	13
4.2.2	Échelles visuelles analogiques . . . . .	13
4.2.3	Corpus de sons naturels . . . . .	15
4.3	Liens entre hyperacousie et le contenu acoustique et émotionnel de stimuli sonores . . . . .	15
4.3.1	Contenu émotionnel . . . . .	15
4.3.2	Contenu acoustique . . . . .	17
4.4	Évaluation de l'état émotionnel . . . . .	18
<b>5</b>	<b>Discussion générale</b>	<b>20</b>
5.1	Évaluation de l'hyperacousie . . . . .	20
5.2	Liens entre hyperacousie, état auditif et état émotionnel . . . . .	20
5.3	Facteurs acoustiques de la gêne sonore liée à l'hyperacousie . . . . .	21
<b>6</b>	<b>Conclusion</b>	<b>21</b>
<b>A</b>	<b>Annexe 1 : Interface de l'application MatlabApp</b>	<b>24</b>

# 1 Introduction

## 1.1 L'IRBA

L'Institut de Recherche Biomédicale des Armées (IRBA) est une institution de recherche du Ministère des Armées. Elle comprend 430 employés dont 150 chercheurs, environ 30 doctorants et 12 post-doctorants. Cet institut se consacre à la recherche biomédicale dans le domaine de la défense et de la sécurité nationale et vise en particulier à améliorer la protection des militaires et leur prise en charge médicale [1]. L'IRBA est basé à Brétigny-sur-Orge, avec également des unités distantes réparties sur l'ensemble du territoire : Clamart, Marseille, Toulon et Mont-de-Marsan. Les principaux domaines d'expertise de l'IRBA incluent les neurosciences, la physiologie, la toxicologie, ou encore les maladies infectieuses. En outre, l'IRBA mène des recherches avancées en perception auditive, visuelle et multisensorielle, visant à préserver les capacités sensorielles des soldats dans des environnements hostiles. Grâce à ses approches pluridisciplinaires et à ses collaborations internationales, l'IRBA joue un rôle crucial dans la protection et de la santé des militaires, tout en contribuant à des avancées significatives dans le domaine médical civil.

## 1.2 Le projet HYMIL

Le projet "Hyperacousie chez le militaire exposé au bruit" (HYMIL) est un projet intégrée au département Neurosciences et Sciences Cognitives de la division Santé du Militaire en Opération. Ce projet vise à étudier l'hyperacousie, une pathologie de l'audition caractérisée par une intolérance anormale à certains sons du quotidien chez les personnes concernées.

Dans le cadre de leurs activités, les militaires peuvent être exposés à des niveaux sonores très élevés (tirs, bruits de moteurs, etc.) pouvant entraîner des troubles de l'audition. Les conséquences de la sur exposition aigue (traumatisme sonore aigu, TSA) ou chronique sur l'audition des militaires font l'objet de recherches à l'IRBA. Cependant, d'autres troubles de l'audition moins connus peuvent apparaître suite à cette exposition accrue au bruit, tels que l'hyperacousie. Par ailleurs, l'hyperacousie toucherait 12% de la population et induirait une gêne importante impactant la vie sociale des personnes qui en souffrent [6].

Le projet HYMIL vise à répondre à plusieurs objectifs : étudier la prévalence de l'hyperacousie dans différentes populations exposées aux bruits, telles que les militaires et les musiciens. Il s'intéresse également, en lien avec d'autres recherches en cours de l'unité Perception, à la prévalence de l'hyperacousie chez les personnes ayant subi un TSA, mais aussi celles exposées à des traitements anti cancéreux.

Le projet vise à étudier les liens entre l'état auditif et l'hyperacousie. De plus, il doit permettre de caractériser les stimuli sonores induisant une gêne chez les hyperacousiques, d'un point de vue acoustique et émotionnel.

## 1.3 Contributions au projet de recherche

Mon stage s'est déroulé à l'IRBA, sur le site de Brétigny-sur-Orge, et partiellement à l'IRCAM, sur une durée de 3 mois et demi. Le projet HYMIL, dans lequel s'intègre mon stage, m'a permis de contribuer à la pluralité des problématiques auxquelles il souhaite répondre, en adoptant une approche principalement psychophysique. Cependant, durant ce stage, j'ai également pu mettre à contribution et approfondir mes connaissances en acoustique, traitement du signal et perception auditive. De plus, ce stage m'a offert l'opportunité d'apprendre à réaliser l'ensemble des tests audiologiques standards d'une pratique clinique.

D'un point de vue expérimental, durant ce stage, j'ai eu l'opportunité de mettre en place et de conduire une expérience de trois heures, comprenant plusieurs sous-tâches, dont des tests audiologiques, une mesure de temps de réaction multisensorielle (non présentée dans ce rapport) et une évaluation perceptive de stimuli sonores, avec une partie de l'expérience codée sous Matlab. J'ai organisé les sessions de passation et recruté 30 participants pour cette expérience. De plus, une analyse préliminaire des résultats est présentée dans ce mémoire.

A noter enfin que le travail de mise en place du protocole expérimental a fait l'objet d'un poster lors de la 14e édition des Journées Jeunes Chercheur-se-s en Audition, Acoustique musicale et Signal audio à Marseille [12].

## 2 Contexte et objectifs de la recherche

### 2.1 Généralités sur l'hyperacousie

L'hyperacousie est une pathologie de l'audition caractérisée par une intolérance aux sons perçus normalement par la majorité de la population et qui étaient tolérés auparavant par les personnes affectées [3, 19]. Une récente étude de l'IFOP, présentée en février 2024 lors de la Journée Nationale de l'Audition en partenariat avec l'association France Acouphènes, donne une estimation de la prévalence de l'hyperacousie dans la population générale, i.e. pour un échantillon de 1000 personnes interrogées de 15 ans et plus. D'abord, cette étude montre que l'hyperacousie est un trouble de l'audition encore mal connu (avec seulement 41% des participants qui connaissent le terme "hyperacousie", contre 95% pour "acouphènes"). Néanmoins, à la question "Souffrez-vous ou avez-vous souffert d'une hyperacousie", 12% des participants répondent positivement, et décrivent en outre une importante gêne associée (en moyenne 6.8/10; [6]). A noter que ces résultats sont en hausse par rapport aux données de 2018, et supérieurs à d'autres estimations antérieures [4].

Chez les personnes qui en souffrent, les symptômes décrits incluent souvent une gêne ou même de la douleur, aggravée par le niveau sonore de certains sons [4], et semblent pouvoir se manifester soudainement [4]. De ce fait, l'hyperacousie a un impact significatif sur la vie sociale, induisant de l'anxiété, de l'isolement social et du stress [27]. Les différentes formes de manifestations de l'hyperacousie ont conduit à une classification en fonction de différents critères : niveau sonore, gêne, peur, douleur [33]. Cependant, l'hyperacousie, souvent associée à l'hypermotilité aux sons, se distingue de la misophonie, qui est une aversion spécifique à certains sons (par exemple des bruits de mastication, de couverts qui s'entrechoquent), et de la phonophobie, qui concerne la peur des sons considérés par l'individu comme susceptibles d'endommager l'oreille [17]. Elle diffère également du recrutement, une augmentation anormale de la perception des niveaux sonores liée à des pertes auditives dues à des dommages au niveau des cellules ciliées [23, 30].

L'hyperacousie est souvent associée à d'autres pathologies, en particulier aux acouphènes, puisque 80% des personnes souffrant d'hyperacousie rapportent souffrir d'acouphènes [4], tandis que 40% des personnes souffrant d'acouphènes souffrent également d'hyperacousie [15]. Cependant, les données varient beaucoup d'une étude à l'autre ( de 7.2 % [10] à 40 % [17]). L'hyperacousie est également associée aux migraines [4, 18]. Enfin, la prévalence de l'hyperacousie chez les personnes autistes est également importante, en particulier chez les enfants, 63% des enfants atteint d'autisme ont un niveau sonore d'inconfort en dessous de 80 dB HL contre 27% chez les enfants qui ne sont pas autistes [20].

Les principales méthodes de diagnostic de l'hyperacousie reposent sur l'entretien avec le patient, des questionnaires, et l'évaluation des niveaux sonores d'inconforts. La méthode de diagnostic la plus directe de l'hyperacousie repose sur la mesure de l'intolérance aux sons, autrement dit la mesure de seuil d'inconfort (ou *Uncomfortable Loudness Level*). Cette méthode consiste à augmenter le niveau sonore jusqu'à atteindre le seuil d'inconfort pour chaque fréquence testée. Les seuils obtenus sont en moyenne plus faibles chez les hyperacousiques et pour les hautes fréquences [2]. Une bonne correspondance existe entre ce test et le score du questionnaire de Khalifa et al.[2]. Cette méthode est cependant critiquée car elle implique d'exposer les personnes souffrant d'hyperacousie à des sons potentiellement dérangeants ou douloureux, ce qui peut en outre impacter leur compliance et donc la qualité du diagnostic.

C'est pourquoi, au moins dans le domaine de la recherche, le Questionnaire d'Hyperacousie (ou *Hyperacusis Questionnaire*) de Khalifa et al. semble être la méthode la plus fréquemment utilisée. Il présente l'avantage d'être assez court (14 questions à 4 choix "oui"/"non"), normalisé sur 201 participants, et spécialement conçu pour quantifier l'intensité de l'hyperacousie en fonction de son impact sur l'attention et sur la vie sociale et émotionnelle. En effet, ce questionnaire comprend trois dimensions : attentionnelle, sociale et émotionnelle. Bien qu'il soit critiqué pour sa stabilité statistique, notamment l'analyse du résultat par dimension [10], il reste largement utilisé comme méthode de diagnostic [10, 11]. Selon les auteurs de ce questionnaire, le seuil pour caractériser l'hyperacousie est fixé à 28 (pour un score maximum de 42). Cependant, d'autres auteurs suggèrent que ce score est trop élevé [2, 10, 22]. Une autre limite concerne le fait qu'il ne permet pas de quantifier la gêne ou la douleur générées par certains sons, ni la fatigue indépendamment de contextes sociaux particuliers. C'est pourquoi d'autres questionnaires ont été proposés pour prendre en compte ces aspects de l'hyperacousie, comme par exemple le questionnaire *Inventory of Hyperacusis Symptoms* [13]. Le Questionnaire d'Hyperacousie reste cependant le plus couramment utilisé.

Dans une étude récente, Enzler et al. proposent un nouveau test de diagnostic de l'hyperacousie, basé sur l'évaluation du caractère agréable de stimuli sonores naturels jugés agréables par les sujets non-hyperacousiques. Ce test permet de s'affranchir des biais méthodologiques liés à l'utilisation de méthodes

déclaratives telle que les questionnaires mais également de ne pas générer un désagrément pouvant induire une perte de compliance des sujets hyperacousiques comme c'est le cas des méthodes de recherche de seuil d'inconfort.

Enfin, il est important de relever qu'il n'existe actuellement pas de traitement curatif de l'hyperacousie. Les rares méthodes de traitement proposées visent à traiter les comorbidités de l'hyperacousie, telles que les acouphènes avec des thérapies d'habituation qui permettent dans certains cas de réduire les symptômes de l'hyperacousie [11].

## 2.2 Hyperacousie, état auditif et exposition au bruit

Les liens entre l'hyperacousie et l'état auditif ont été étudiés en raison de l'hypothèse de l'impact potentiel d'une surexposition au bruit. Le modèle du gain central propose que l'hyperacousie, comme les acouphènes, puisse être liée à une augmentation inadaptée du gain auditif central causée par des lésions périphériques [15]. Cependant, ce modèle reste insuffisant, car des cas d'hyperacousie sans pertes auditives visibles associées ont été observés [13]. D'autre part, de nombreuses études se sont intéressées aux liens entre hyperacousie et état auditif. Cependant, les résultats varient grandement d'une étude à l'autre et ne permettent pas de statuer sur d'éventuels liens entre hyperacousie et état auditif. En effet, [Greenberg and Carlos](#) n'ont pas trouvé de liens entre l'hyperacousie et les pertes auditives observées à l'audiométrie tonale [13]. [Anari et al.](#) n'ont trouvé aucune corrélation entre la capacité de compréhension de la parole dans le bruit et l'hyperacousie, ni entre l'audiométrie tonale et les seuils d'inconfort. A l'inverse, [Paulin et al.](#) établit que 59% des personnes souffrant d'hyperacousie présentent une forme de déficience auditive. Cependant, le type de déficience auditive examiné dans cette étude n'est pas indiqué, et est basé sur un questionnaire [25]. Il semble donc nécessaire d'examiner plus précisément et de façon plus systématique les liens entre hyperacousie et état auditif, en particulier en proposant une méthodologie permettant de caractériser de façon poussée l'audition des personnes souffrant d'hyperacousie.

Bien que dans l'étude de [Khalifa et al.](#) les auteurs n'ont pas trouvé de résultats concluants sur les liens entre exposition au bruit et hyperacousie, 49.2% déclarant une hyperacousie indiquent qu'elle est survenue après une exposition à long terme ou intense au bruit [25]. De plus, du fait des liens connus entre pertes auditives et exposition au bruit [34], il semble nécessaire d'inclure ce facteur dans l'analyse de l'influence de l'état auditif sur l'hyperacousie.

Afin d'expliquer l'hyperacousie, d'autres facteurs potentiels ont été étudiés. Des liens ont été identifiés entre l'hyperacousie et l'expérience d'idées magiques et d'aberrations perceptives, chez des participants qui adhèrent à des croyances magiques mais ne rapportent pas d'hallucinations. En particulier, les participants qui ont obtenu des scores élevés à l'échelle d'idéation magique de Chapman ont évalué leur sensibilité auditive plus élevée que les participants ayant un score plus faible [7]. L'hyperacousie semble aussi pouvoir être liée à d'autres types d'hypersensibilité, telles que la sensibilité à la lumière [4]. Par ailleurs, plusieurs auteurs interrogent les liens potentiels entre émotions et hyperacousie, en particulier avec le stress et l'anxiété [25, 35].

Finalement, les liens entre contenus acoustiques des stimuli sonores à l'origine de la gêne chez les hyperacousiques font l'objet de recherches. [Jastreboff and Jastreboff](#) émettent l'hypothèse que la réaction de gêne chez les hyperacousiques soit contrôlée par le spectre et l'intensité des stimuli sonores. [Anari et al.](#) établissent une liste de stimuli sonores en fonction de leurs caractéristiques acoustiques à l'origine de la gêne chez les hyperacousiques. Ils ne proposent cependant pas d'approche systématique permettant de caractériser la gêne en fonction du contenu acoustique chez les hyperacousiques permettant d'isoler les caractéristiques physiques des sons de leur contenu sémantique. Dans une étude récente, [Enzler et al.](#) montrent l'influence différente du niveau sonore sur l'évaluation du caractère agréable de stimuli sonores agréables et naturels entre les hyperacousiques et les non-hyperacousiques.

Du fait des hypothèses quant à l'influence de l'aspect émotionnel mais aussi acoustique et sonore dans l'hyperacousie exprimé dans la littérature, il semble pertinent de proposer une expérience permettant de contrôler à la fois les aspects acoustiques et sémantiques des stimuli sur la base du protocole proposé par [Enzler et al.](#), mais également de contrôler précisément l'état auditif des participants, afin d'étudier et de déterminer leur influence sur l'hyperacousie.

## 2.3 Objectifs de la recherche

L'expérience proposée vise à étudier l'hyperacousie, en particulier les liens entre l'état auditif et émotionnel et l'hyperacousie. Elle cherche également à examiner les relations entre le contenu acoustique et émotionnel des stimuli sonores et la gêne occasionnée chez les personnes hyperacousiques. Il s'agit à la fois d'établir

un profil pathophysiologique de l'hyperacousie et de mieux comprendre les origines de la gêne induite chez les personnes hyperacousiques.

L'objectif principal de cette étude est donc d'évaluer l'hyperacousie en fonction de l'état auditif et de l'état émotionnel d'un panel de participants en mettant en place des tests audiologiques et des questionnaires d'hyperacousie, émotionnels et d'antécédents médicaux. En particulier, nous étudierons l'influence de l'exposition au bruit à la fois sur l'hyperacousie et sur l'état auditif, et les liens entre hyperacousie et acouphènes chez nos participants.

L'objectif secondaire de ce travail est d'étudier les liens entre les caractéristiques spectro-temporelles et l'évaluation du caractère agréable et émotionnel (valence et intensité) de deux corpus sonores. Nous nous intéresserons en particulier à caractériser l'évaluation du caractère agréable de stimuli sonores chez les hyperacousiques ainsi que des liens entre l'évaluation du caractère émotionnel et agréable des sons chez les hyperacousiques.

L'expérience comprend deux parties distinctes : (1) l'établissement du profil audiologique des participants (évaluation de l'état auditif et émotionnel, évaluation de l'hyperacousie et de l'exposition au bruit) et (2) l'étude et l'évaluation d'un corpus de stimuli sonores.

## 3 Matériels et méthodes

### 3.1 Participants

Le recrutement des participants a été effectué par bouche-à-oreille et via la liste de diffusion RISC. Le recrutement des participants s’est concentré sur les personnes se déclarant hyperacousiques ou exprimant une gêne vis-à-vis des sons du quotidien. Compte tenu des liens potentiels entre l’exposition au bruit et l’hyperacousie, nous avons également priorisé le recrutement de participants exposés au bruit dans un cadre professionnel. En outre, nous avons recruté des participants ne déclarant pas de problème d’audition ni d’exposition au bruit pour constituer le groupe contrôle.

Trente participants ont été recrutés pour participer à l’expérience. Cependant, 2 participants ont été exclus : l’un avait subi une perforation tympanique moins d’un mois avant l’expérience, et l’autre était en cours de traitement pour un cholestéatome et portait un implant cochléaire à gauche. Parmi les 28 participants restants, 3 d’entre eux présentaient une tympanométrie légèrement anormale pour au moins une des deux oreilles, aucun d’entre eux n’étant hyperacousique. De plus, 5 participants présentaient des bouchons de cérumen, dont 2 étaient hyperacousiques.

Le panel final comprenait 4 participants hyperacousiques non-exposés au bruit, 5 participants hyperacousiques exposés au bruit, 11 participants contrôles non-exposés au bruit, et 8 participants contrôles exposés au bruit (cf. Tableau 1). Pour les catégoriser, les participants du groupe ‘Hyperacousiques’ devaient avoir un score supérieur ou égal à 26 au Questionnaire d’Hyperacousie [19]. Suivant les études, le score proposé comme seuil au questionnaire de Khalfa et al. diffère de celui établi initialement de 28. Plusieurs études suggèrent que ce score est trop élevé [2, 22]. Nous avons choisi d’utiliser le seuil de 26, légèrement plus faible que celui proposé. Le score moyen au questionnaire dans le groupe hyperacousique était de  $30.7 \pm 3$ . Les participants du groupe ‘Contrôles’ avaient un score d’hyperacousie inférieur à 26, avec une moyenne de  $13.7 \pm 5.5$  (cf. Figure 2).

Les participants ont également été catégorisés en fonction de leur exposition au bruit. Le panel comprenait 13 participants exposés au bruit, dont 5 souffraient d’hyperacousie, et 15 non-exposés, dont 4 souffraient également d’hyperacousie. Les participants considérés comme exposés au bruit étaient ceux travaillant dans des environnements bruyants, tels que les ingénieurs du son, les musiciens professionnels et les conducteurs de la RATP.

L’étude a été validée par le comité de protection des personnes Ouest I sous la référence 2020-A01504-24. Tous les participants signaient un consentement de participation avant toute collecte de données. La participation à l’expérience était indemnisée à hauteur de 40 euros pour les 3 heures de passation expérimentale. Elle se déroulait à l’IRBA en cabine audiométrique IAC à double paroi (14 participants), ou à l’IRCAM en studio 4 (14 participants).

Bruit	Hyperacousiques			Contrôles		
	Total	Exposés	Non-exposés	Total	Exposés	Non-exposés
Nombre	N = 9	N = 5	N = 4	N = 19	N = 8	N = 11
H - F	3 - 6	2 - 3	1 - 3	8 - 11	2 - 6	6 - 5
Âge	$30 \pm 11$	$31 \pm 14.6$	$29.5 \pm 5.9$	$28.6 \pm 9.3$	$30 \pm 8.7$	$27.5 \pm 10$
Score QH	$30.7 \pm 3$	$29.2 \pm 2.4$	$32.8 \pm 2.6$	$13.7 \pm 5.5$	$16.3 \pm 6.3$	$11.9 \pm 4.4$
Acouphènes	N = 4	N = 3	N = 1	N = 8	N = 4	N = 4

TABLEAU 1 : Catégories de participants. Chaque groupe est décrit en fonction de leur exposition au bruit, du nombre de participants, du genre, de l’âge, du score au Questionnaire d’Hyperacousie (les participants étaient catégorisés comme hyperacousiques pour un score supérieur ou égal à 26), et du nombre de participants acouphéniques.

### 3.2 Évaluation de l’état auditif

#### 3.2.1 Questionnaires

Tout d’abord, l’expérience comprenait la réalisation de plusieurs questionnaires visant à établir le profil des participants, incluant des données démographiques (âge, genre, niveau d’étude, profession), les antécédents médicaux, l’exposition au bruit (dans le cadre professionnel, dans les loisirs, temps d’écoute quotidienne aux écouteurs ou casque), et les acouphènes (questionnaires THI et TFI, ainsi que 2 échelles

visuelles analogiques [24]). De plus, dans le cadre d'études complémentaires (cf. Introduction), ils complétaient les questionnaires EQ-5D-L5 (autonomie de la personne), CIPN20 (qualité de vie), 15iSSQ (habilité auditive), et DHI (troubles de l'équilibre). Le protocole incluait également 2 échelles visuelles analogiques pour évaluer le niveau de fatigue et le niveau de douleur. Ces questionnaires étaient administrés de manière numérique via une interface codée sur Max/MSP à l'exception des échelles visuelles analogiques pour les acouphènes, qui ont été réalisées sur une interface développée sur MatlabApp avec d'autres tests (voir paragraphes suivants).

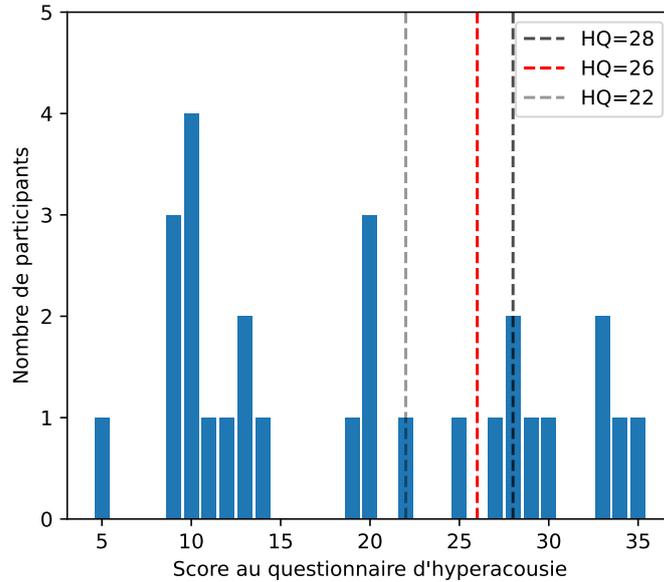


FIGURE 2 : Histogramme de répartition des scores au questionnaire d'hyperacousie. Les lignes verticales en pointillés indiquent les différents seuils utilisés pour définir l'hyperacousie. Le seuil à 28 est proposé par Khalifa et al. [19], celui à 26 par Meeus et al. [22] (cf. [2]), et celui à 22 par Fackrell et al. [11].

### 3.2.2 Tests audiologiques

Les participants effectuaient un bilan auditif complet. D'abord, une otoscopie numérique était réalisée à l'aide d'un vidéo otoscope RE-VO. Les participants inclus étaient ceux ayant une otoscopie normale pour au moins une des deux oreilles.

Ensuite, une tympanométrie standard et une mesure du réflexe stapédien ipsilatéral étaient réalisées à l'aide d'un tympanomètre Interacoustics Titan. Cependant, la mesure du réflexe stapédien, qui s'est avérée mal tolérée par certains participants hyperacousiques, a été ensuite retirée du protocole afin d'assurer la continuité des passations expérimentales (de même, le protocole initial incluait également une électrocochléographie qui a également été retirée avant de trouver un protocole adéquat).

Les participants effectuaient ensuite une audiométrie tonale standard et hautes fréquences au casque aux fréquences suivantes : 0.250, 0.500, 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12.5, 14 et 16 kHz. Ce test était réalisé avec un audiomètre Echodia Elios. Puis une audiométrie vocale dans le bruit avec un test de logatomes [34], réalisé sur une interface Matlab. Ces deux tests étaient réalisés avec le casque Radioear DD450, comme les tests suivants sur l'Elios.

Les otoémissions acoustiques étaient mesurées en DPOAE et TEOAE, avec l'Elios.

### 3.3 Évaluation émotionnelle

Pour évaluer l'état émotionnel des participants, la partie TRAIT du questionnaire STAI [31] a été administrée. Ce questionnaire a été complété sur une interface numérique, codée sur MatlabApp.

## 3.4 Évaluation de l’hyperacousie

### 3.4.1 Questionnaire d’Hyperacousie

Pour évaluer l’hyperacousie, nous avons utilisé le questionnaire d’hyperacousie de Khalfa et al. [19]. Bien que l’utilisation de ce questionnaire comme méthode de diagnostic soit discutée (cf. Paragraphe 1.3), elle reste la plus courante et la plus facile à mettre en place. Elle permet également de minimiser la gêne occasionnée chez les participants hyperacousiques par l’écoute de sons pour les méthodes de seuil d’inconfort, assurant ainsi la compliance des participants pour le reste de l’expérience. La valeur seuil de l’hyperacousie ne fait pas consensus. Nous avons catégorisé les participants ayant un score au questionnaire d’hyperacousie supérieur à 26 comme hyperacousiques.

### 3.4.2 Échelles visuelles analogiques

Nous avons également proposé deux nouvelles échelles visuelles analogiques pour l’évaluation de l’hyperacousie (cf. Figure 3). Ces échelles sont basées sur les échelles existantes pour les acouphènes [24] ainsi que sur les définitions et questions utilisées dans les études les plus récentes sur l’hyperacousie [6].

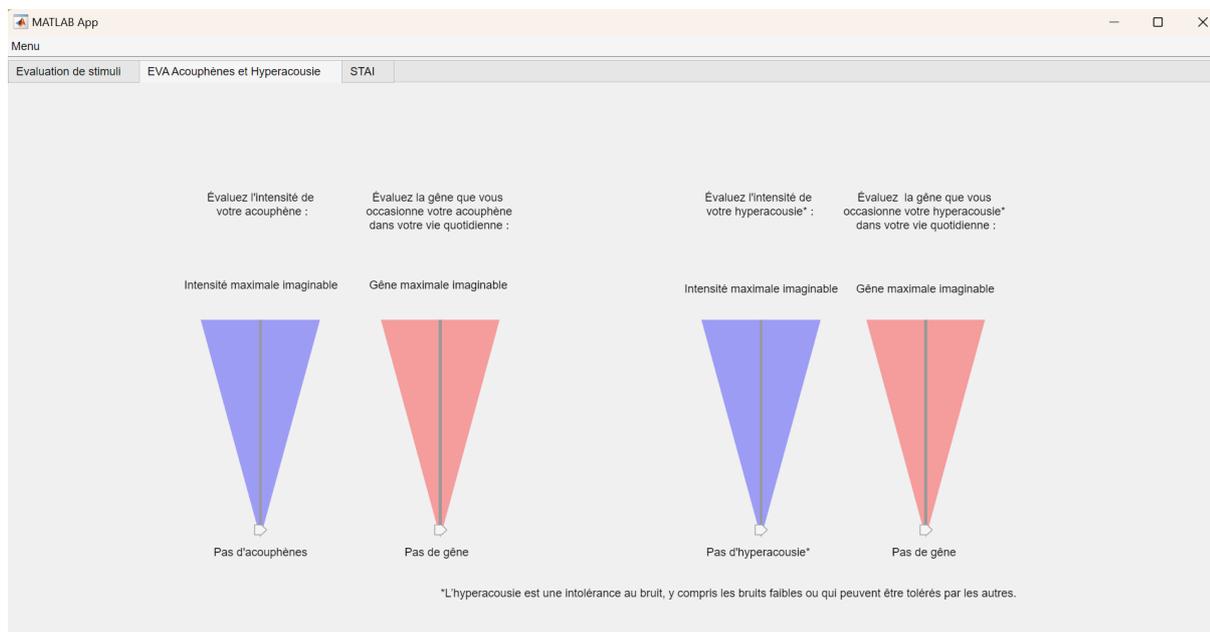


FIGURE 3 : Interface d’évaluation des acouphènes et de l’hyperacousie par échelles visuelles analogiques.

### 3.4.3 Corpus sonore

**Stimuli** Afin d’évaluer l’influence des paramètres acoustiques et émotionnels sur l’évaluation du caractère agréable des stimuli sonores, nous avons utilisé deux corpus sonores. Nous avons réutilisé le corpus proposé par Enzler et al., qui se compose de 7 stimuli sonores naturels : son d’oiseau, piano, harpe, fontaine, sous l’eau, océan et rire (corpus CDS). Le corpus de sons a été fourni par l’un des auteurs de l’étude. Les sons proposés par Enzler et al. [9] diffèrent par leur contenu acoustique et sémantique. Afin d’étudier les liens entre l’évaluation émotionnelle des sons (valence, intensité) et les paramètres physiques des sons avec l’hyperacousie, il était nécessaire de proposer un corpus de stimuli sonores fixant la dimension sémantique. En identifiant l’objet comme source du son, nous nous assurons que l’évaluation du caractère agréable et émotionnel ne dépend que des caractéristiques physiques et sonores. À cet effet, nous avons ajouté un deuxième corpus de stimuli sonores. Ce corpus est composé de 30 sons d’oiseaux, tirés de l’étude de Isnard et al. [16]. L’ensemble des stimuli a une durée de 2 secondes et a été normalisé à un niveau de RMS moyen de 60 dB SPL. Enzler et al. a démontré que ce niveau sonore est suffisant pour distinguer les individus hyperacousiques des non-hyperacousiques, tout en minimisant l’inconfort lié au volume des stimuli chez les participants hyperacousiques. Afin de prendre en compte le fait que certains participants du fait d’éventuelles pertes auditives puissent ne pas entendre certains stimuli à ce niveau sonore, un bouton permettait aux participants d’indiquer s’ils n’avaient pas entendu les stimuli.

**Analyses acoustiques** Le protocole proposé par [Enzler et al.](#) repose sur une différence dans l'évaluation du caractère agréable des stimuli sonores entre les individus hyperacousiques et non-hyperacousiques. Afin de mieux comprendre les caractéristiques physiques des sons responsables de la gêne chez les personnes hyperacousiques, nous avons identifié une liste de descripteurs acoustiques pertinents susceptibles d'influencer la perception de l'agréabilité des stimuli sonores.

[Arnal et al.](#) a mis en évidence l'influence de la quantité d'énergie présente dans certaines zones du spectre de modulation (MPS), notamment entre 30 et 150 Hz en modulations temporelles, sur la rugosité perçue de certains sons. La rugosité est associée à des signaux d'alarme naturels tels que les cris ou les pleurs, et est souvent liée au caractère désagréable d'un son. De plus, la rugosité a un impact sur le temps de réaction [5, 32] et est corrélée à des émotions comme la peur. Il est donc pertinent d'étudier l'impact de ce paramètre sonore sur le caractère désagréable associé à certains sons par les individus hyperacousiques.

Par ailleurs, [Rosi et al.](#) a étudié l'influence de plusieurs descripteurs spectraux et temporels sur des attributs perceptifs du son, tels que la rugosité et la rondeur, qui peuvent jouer un rôle dans le jugement de l'agréabilité des stimuli sonores. Sur la base de ces travaux, nous avons sélectionné plusieurs descripteurs pour évaluer leur influence sur l'évaluation du caractère agréable des stimuli sonores par nos participants. Ces descripteurs incluent :

- le centre de gravité spectrale (en Hz) ;
- la crête spectrale (ratio entre la valeur maximale et la moyenne du spectre) ;
- le temps d'attaque logarithmique (en s) ;
- la pente d'attaque (en dB/s) ;
- le temps de relâchement (en s) ;
- la fréquence de modulation (en Hz) ;
- l'amplitude de modulation (en dB).

Ces descripteurs ont été calculés à l'aide de la Timbre Toolbox [26], ainsi que le MPS (défini comme l'énergie dans le spectre de modulation entre 30 et 150 Hz de modulations temporelles [8, 14]). Tous les calculs ont été effectués avec Matlab.

**Tâche expérimentale.** Le protocole incluait l'évaluation du caractère agréable des corpus de stimuli sonores naturels, selon la méthode d'échelle visuelle analogique proposée par [Enzler et al.](#) [9]. Nous y avons également intégré une évaluation émotionnelle des stimuli par échelles visuelles analogiques (valence et intensité ; [29]). Ainsi, les participants effectuaient l'évaluation de la valence et de l'intensité émotionnelles de l'ensemble des stimuli sonores, suivie d'une pause de 10 s, puis celle de leur caractère agréable (cf. Annexe A).

L'ordre d'apparition des stimuli était randomisé pour chaque sous-tâche. L'emplacement du curseur sur les EVA était aléatoire. Il était demandé aux participants de répondre sans établir de stratégie, en particulier sans juger la qualité d'un stimulus en fonction du précédent. La valence et l'intensité étaient illustrées par l'exemple suivant : « Lorsque j'attends le métro et qu'il est en retard, j'évaluerai la valence comme négative, mais pas intense ; à l'inverse, si j'assiste au concert de mes rêves avec mon artiste favori, j'évaluerai la valence comme positive et intense. » Pour le caractère agréable ou désagréable : « Beaucoup de personnes trouvent le bruit d'une craie sur un tableau extrêmement désagréable. »

L'interface était codée sur MatlabApp. L'écoute des stimuli était fait au casque Radioear DD450 et une carte son. Cette tâche avait une durée approximative de 15 minutes. Les participants pouvaient interrompre l'audio si nécessaire grâce à un bouton stop sur l'interface, en effet, [Enzler et al.](#) soulève l'importance de permettre aux participants hyperacousiques de contrôler le stimulus sonore. En raison du niveau sonore faible choisi, l'interface comprenait également un bouton permettant aux participants d'indiquer s'ils n'avaient pas entendu le stimulus présenté. Aucun participant n'a interrompu l'expérience ni indiqué ne pas avoir entendu les stimuli présentés.

### 3.5 Analyses statistiques

Pour étudier les effets des différents facteurs pris en compte, *i.e.* Groupe (Hyperacousiques, Contrôles), Exposition au bruit (Bruit, Non-exposé), nous avons effectué plusieurs analyses de variance (ANOVA à un ou deux facteurs). Les effets significatifs étaient analysés à l'aide de tests post hoc de Tukey HSD. Les analyses de corrélation ont été réalisées en utilisant le coefficient de corrélation de Pearson. Pour évaluer

les tailles d'effet, nous avons calculé le  $d$  de Cohen.

Un résultat statistique était considéré comme significatif lorsque  $p < 0,05$ . Toutes les analyses statistiques ont été effectuées sous RStudio, version 4.3.1 (2023-06-16), en utilisant les packages rstatix (version 0.7.2) et effectsize (version 0.8.9).

A noter que l'expérience incluait également une mesure du temps de réaction multisensorielle. Cette tâche était réalisée au début de l'expérience et avait une durée de 10 minutes. Bien que cette tâche ait été incluse dans l'expérience que je menais, je ne la décrirai pas ici, n'ayant pas participé à sa mise en place ni à l'analyse des résultats.

## 4 Résultats

### 4.1 État auditif et hyperacousie

#### 4.1.1 Audiométrie tonale

La Figure 4a présente la moyenne des seuils d'audition en dB HL par groupe, sur l'ensemble des 56 oreilles. Les analyses ont été effectuées sur le seuil en dB HL en fonction des facteurs 'Groupe' ('Hyperacousiques' ou 'Contrôles'), 'Fréquence' (0.250 à 16 kHz), 'Oreille' (Droite ou Gauche), 'Exposition au bruit' ('exposé' ou 'non-exposé'). Les analyses n'indiquent pas d'effet significatif de l'oreille ( $F = 0.20$ ,  $p = 0.653$ ), ni de l'exposition au bruit ( $F = 2.18$ ,  $p = 0.14082$ ). L'analyse montre un effet principal significatif de la fréquence ( $F = 7.73$ ,  $p = 1.33e - 12$ ). On observe une diminution des seuils avec l'augmentation de la fréquence, à partir de 8 kHz ( $p < 0.05$ ) et 12.5 kHz ( $p < 0.001$ ). Surtout, elle montre un effet principal significatif du groupe ( $F = 8.877$ ,  $p = 0.003$ ), indiquant des seuils plus faibles pour les participants hyperacousiques.

#### 4.1.2 Audiométrie vocale dans le bruit

La Figure 4b présente la moyenne des scores d'audiométrie vocale dans le bruit par groupe. Les analyses ont été effectuées sur le score en pourcentage obtenu en fonction des facteurs 'Groupe' ('Hyperacousiques' ou 'Contrôles'), 'Oreille' (Droite ou Gauche) et 'Exposition au bruit' ('exposé' ou 'non-exposé'). Les analyses n'indiquent pas d'effet significatif de l'oreille ni de l'exposition au bruit. En revanche, on observe une tendance pour le facteur 'Groupe' ( $F = 3.85$ ,  $p = 0.0549$ ), les participants hyperacousiques présentant un score moyen inférieur aux non-hyperacousiques au test des logatomes.

#### 4.1.3 Otoémissions acoustiques

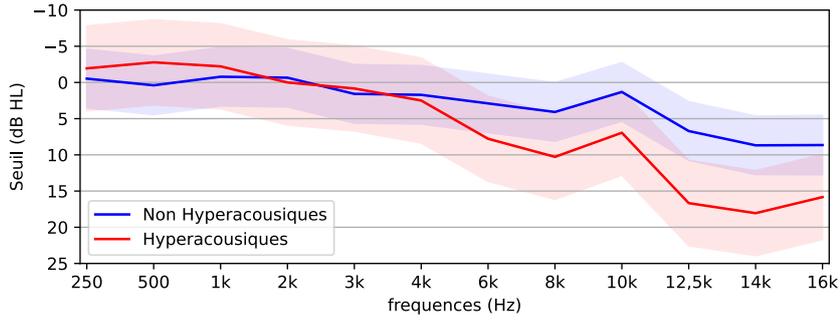
Nous avons mesuré le niveau des otoémissions acoustiques par deux méthodes : (1) les otoémissions acoustiques provoquées par des produits de distorsion (DPOAE, Distortion Product Otoacoustic Emissions) et (2) par la méthode des otoémissions acoustiques évoquées par transitoires (TOEAE, Transient Otoacoustic Emissions).

**Otoémissions DPOAE** La Figure 4c représente la moyenne des otoémissions acoustiques provoquées par des produits de distorsion (DPOAE), effectuées sur les 56 oreilles. Les analyses ont été effectuées sur le niveau d'otoémissions en fonction des facteurs 'Groupe' ('Hyperacousiques' ou 'Contrôles'), 'Oreille' (Droite ou Gauche), 'Fréquence'. Les analyses statistiques n'indiquent pas d'effet significatif de l'oreille ni du groupe. Cependant, l'analyse montre un effet significatif de la fréquence ( $F = 4.27$ ,  $p = 0.000789$ ) sur le niveau d'otoémissions, avec une augmentation des niveaux d'otoémissions à 1 kHz par rapport à 1.344 kHz ( $p < 0.05$ ) et une diminution des niveaux d'otoémissions entre 2 et 0.656 kHz ( $p < 0.05$ ).

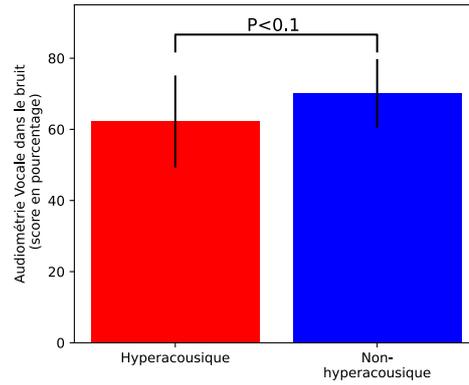
**Otoémissions TOEAE** La Figure 4d représente la moyenne des otoémissions, mesuré par la méthode TOEAE, effectuées sur l'ensemble des 56 oreilles. Les analyses ont été effectuées sur le niveau d'otoémissions en fonction des facteurs 'Groupe' ('Hyperacousiques' ou 'Contrôles'), 'Fréquence' (1 à 5 kHz) et 'Oreille' (Droite ou Gauche). Les analyses statistiques n'indiquaient pas d'effet significatif de l'oreille ( $F = 0.11$ ,  $p = 0.744$ ). Cependant, l'analyse montrait un effet principal significatif du groupe ( $F = 18.11$ ,  $p = 2.78e - 05$ ), indiquant des niveaux d'otoémissions plus élevés pour les hyperacousiques. L'analyse montre également un effet principal significatif de la Fréquence ( $F = 117.58$ ,  $p = < 2e - 16$ ), avec une diminution des niveaux à partir de 3 kHz (entre 1, 2 et 3 kHz :  $p < 0.0001$  ; entre 3 et 4 kHz  $p < 0.0001$  ; et entre 4 et 5 kHz :  $p < 0.000001$ ). On note cependant la limite de ces résultats du fait des très faibles niveaux d'otoémissions observés ici.

#### 4.1.4 Acouphènes

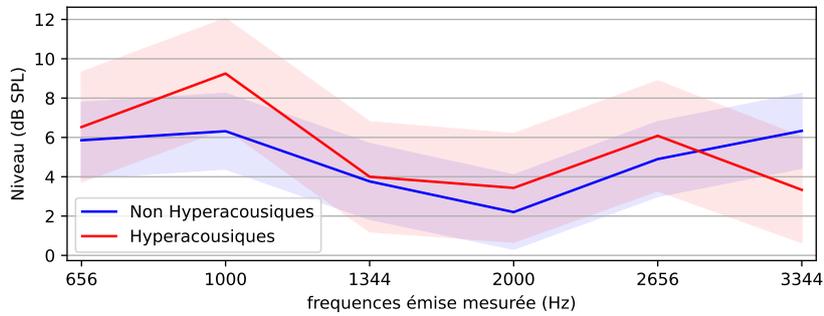
Nous avons analysé les liens entre acouphènes et hyperacousie. Quatre participants du groupe 'Hyperacousiques', dont 3 exposés au bruit, ont déclaré avoir déjà souffert d'acouphènes. Dans le groupe 'Contrôles', 8 participants (4 exposés au bruit et 4 non-exposés) ont également indiqué avoir déjà eu des acouphènes.



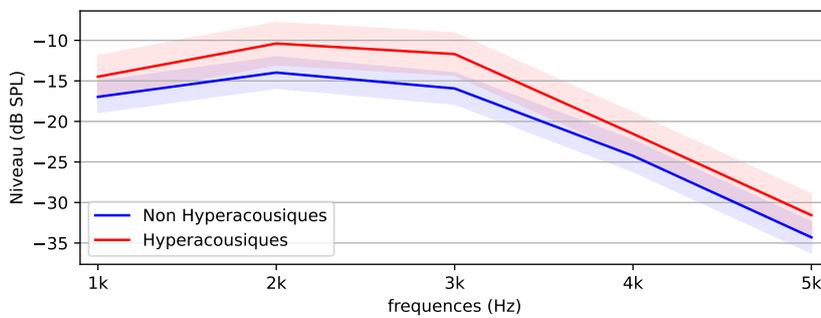
(a) Audiométrie tonale.



(b) Audiométrie vocale dans le bruit.



(c) Otoémissions DPOAE.



(d) Otoémissions TOEAE.

FIGURE 4 : Résultats des tests audiolgiques sur l'ensemble des 56 oreilles pour les groupes 'Hyperacousiques' et 'Contrôles'. Les graphiques présentent les moyennes et les écarts-types.

Tous les participants ayant déclaré des acouphènes, à l'exception d'un seul, avaient un score inférieur à 16 au questionnaire *Tinnitus Handicap Inventory* (THI; cf. [21]), indiquant un handicap léger induit par l'acouphène. Un seul participant du groupe 'Contrôles', exposé au bruit, avait un score supérieur à 16, suggérant un handicap modéré dû aux acouphènes. Il n'a pas été observé d'effet significatif de la présence d'acouphènes sur le score d'hyperacousie ( $F = 0.11$ ,  $p = 0.744$ ).

## 4.2 Évaluation de l'hyperacousie

### 4.2.1 Questionnaire d'Hyperacousie

La Figure 2 présente la répartition des scores au questionnaire d'hyperacousie de Khalifa et al.. Cependant, le seuil pour être considéré comme hyperacousique varie en fonction des études. Sur les 28 participants, 9 sont hyperacousiques avec un seuil à 26 utilisé ici d'après Meeus et al. [22] (cf. [2]). Ils seraient 8 hyperacousiques avec le seuil de 28 au questionnaire proposé par Khalifa et al. [19], ou 11 hyperacousiques avec un seuil de 22 au questionnaire proposé par Fackrell et al. [11], également utilisé dans l'étude de Enzler et al. [9].

Les analyses ont été effectuées sur le score d'hyperacousie en fonction des facteurs Bruit, Âge et Genre. L'analyse statistique ne montre pas d'effet statistiquement significatif de l'exposition au bruit sur le score d'hyperacousie ( $F = 1.12$ ,  $p = 0.3004$ ). Elle ne montre pas non plus d'effet statistiquement significatif de l'âge ( $F = 0.00$ ,  $p = 0.993$ ) ni du genre ( $F = 2.10$ ,  $p = 0.165$ ) sur le score d'hyperacousie.

### 4.2.2 Échelles visuelles analogiques

Notre étude propose également d'évaluer l'hyperacousie par deux échelles visuelles analogiques. Les analyses ont été effectuées sur l'intensité de l'hyperacousie exprimée par les participants et la gêne induite par l'hyperacousie dans la vie quotidienne en fonction des facteurs 'Groupe' ('Hyperacousiques' ou 'Contrôles') et Bruit ('Exposés' ou 'Non-exposés'). En raison de données manquantes, un participant du groupe Contrôle a été exclu, et l'analyse est donc effectuée sur 27 participants.

L'analyse statistique montre un effet significatif du facteur principal Groupe sur l'intensité de l'hyperacousie ( $F = 22.13$ ,  $p = 9.73e - 05$ ). Il n'y a pas d'effet significatif du facteur principal Bruit ( $F = 1.33$ ,  $p = 0.261$ ) sur l'intensité de l'hyperacousie. L'analyse montre également un effet significatif du facteur principal Groupe sur la gêne induite par l'hyperacousie ( $F = 47.14$ ,  $p = 5.32e - 07$ ). Il n'y a pas d'effet significatif du facteur Bruit ( $F = 1.12$ ,  $p = 0.3011$ ) sur la gêne induite par l'hyperacousie. Enfin, une tendance à une interaction entre l'exposition au bruit et l'hyperacousie sur la gêne induite par l'hyperacousie est observée ( $F = 3.96$ ,  $p = 0.0585$ ). En particulier, les hyperacousiques non exposés au bruit indiquent une gêne statistiquement plus importante que les participants du groupe contrôle non exposés au bruit ( $p = 0.00002$ ) et exposés au bruit ( $p = 0.001$ ). Les hyperacousiques exposés au bruit indiquent quant à eux une gêne plus importante que les participants du groupe contrôle exposés au bruit ( $p = 0.01$ ) et non exposés au bruit ( $p = 0.0001$ ). On n'observe pas d'interaction significative entre les participants du groupe hyperacousique exposés au bruit et non exposés ( $p = 0.74$ ), ainsi qu'entre les participants du groupe contrôle exposés et non exposés au bruit ( $p = 0.21$ ).

Nous avons également effectué des analyses de corrélations entre l'intensité de l'hyperacousie, la gêne induite par l'hyperacousie et le score au questionnaire d'hyperacousie. Les analyses montrent une corrélation positive significative entre l'intensité de l'hyperacousie exprimée par les participants et le score au questionnaire d'hyperacousie ( $R = 0.66$ ,  $p = 0.0001706$ ). On trouve également une corrélation statistiquement significative entre la gêne induite par l'hyperacousie dans la vie quotidienne et le score au questionnaire d'hyperacousie ( $R = 0.77$ ,  $p = 2.462e - 06$ ). De plus, il y a une corrélation statistiquement significative entre l'intensité de l'hyperacousie et la gêne induite dans la vie quotidienne ( $R = 0.91$ ,  $p = 8.802e - 11$ ), comme présenté en Figure 5.

On note également que l'ensemble des participants du groupe Hyperacousiques rapportent une gêne induite par leur hyperacousie dans la vie quotidienne supérieure à 60/100. Ce seuil peut être choisi pour différencier les hyperacousiques des non-hyperacousiques avec l'utilisation des EVA pour le diagnostic. Ce chiffre est comparable à ce qui est utilisé pour les EVA des acouphènes [24]. Par ailleurs, un participant du groupe Contrôle déclare une intensité et une gêne importantes, associées à un score au questionnaire d'hyperacousie de 22.

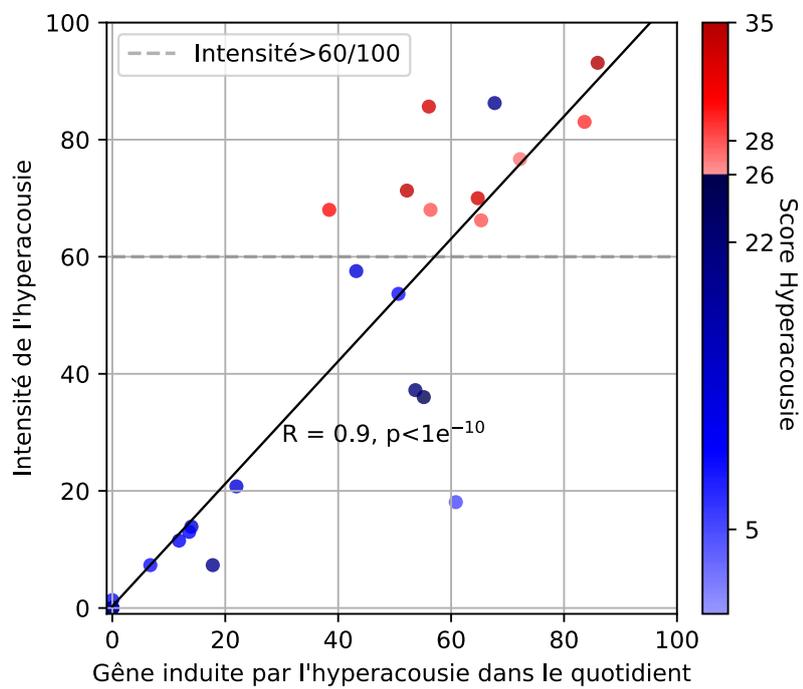


FIGURE 5 : Corrélation entre l'intensité de l'hyperacousie et la gène induite par l'hyperacousie, les couleurs représentent les scores au questionnaires d'hyperacousie.

### 4.2.3 Corpus de sons naturels

**Méthode de Enzler et al. [9]** L'utilisation d'un corpus sonore permet d'observer une différence d'évaluation du caractère agréable entre les hyperacousiques et le groupe contrôle. Enzler et al. propose un corpus de 7 stimuli sonores naturels (corpus CDS), identifié dans l'étude comme permettant la meilleure discrimination entre les hyperacousiques et les non-hyperacousiques. Dans cette étude, nous avons repris ce corpus et ajouté 30 stimuli sonores d'oiseaux (corpus BIRDS). L'interface proposée aux participants est présentée en Annexe A.

Nous avons analysé l'influence des facteurs Groupe (Hyperacousiques/Contrôle) et Bruit sur l'évaluation du caractère agréable des stimuli des corpus CDS et BIRDS.

L'analyse statistique ne montre pas d'effet statistiquement significatif du facteur principal Groupe sur l'évaluation du caractère agréable du corpus de stimuli CDS ( $F = 0.78$ ,  $p = 0.378$ ), et il n'y a pas non plus d'effet significatif du facteur Bruit sur l'évaluation du caractère agréable des stimuli CDS ( $F = 0.96$ ,  $p = 0.327$ ). En revanche, l'évaluation du caractère agréable des stimuli sonores du corpus BIRDS en fonction des facteurs Groupe (Hyperacousiques/Contrôle) et Bruit montre un effet principal significatif du facteur Groupe ( $F = 9.62$ ,  $p = 0.00199$ ), les hyperacousiques évaluant les stimuli sonores comme moins agréables que le groupe contrôle. On observe également un effet significatif du facteur principal Bruit ( $F = 23.43$ ,  $p = 1.54e - 06$ ), les participants non-exposés au bruit évaluant les stimuli comme plus désagréables que les participants exposés au bruit. De plus, une interaction significative entre ces deux facteurs ( $F = 10.18$ ,  $p = 0.00147$ ) est observée sur l'évaluation du caractère agréable des stimuli du corpus BIRDS. En particulier, les participants du sous-groupe Hyperacousique non exposés au bruit évaluent les stimuli du corpus BIRDS comme plus désagréables que les participants des autres sous-groupes ( $p < 10^{-6}$ ).

**Classement des stimuli sonores en fonction de leur capacité de discrimination des groupes Hyperacousie et Contrôle.** Le corpus de stimuli sonores CDS issu de [9] a été établi en classant un ensemble de stimuli sonores en fonction de leur capacité à différencier les hyperacousiques des non-hyperacousiques dans l'évaluation du caractère agréable de ces sons. Par analogie, la Figure 6 présente la taille de l'effet ( $d$  de Cohen) du Groupe (Hyperacousie/Contrôle) sur l'évaluation du caractère agréable pour les deux corpus de stimuli.

Les analyses statistiques ont été effectuées sur l'évaluation du caractère agréable en fonction du facteur principal Groupe pour chacun des stimuli. Les analyses montrent un effet statistiquement significatif du groupe uniquement pour 1 stimulus du corpus BIRDS (et 3 autres avec une tendance statistique), et aucun effet significatif pour les stimuli du corpus CDS.

## 4.3 Liens entre hyperacousie et le contenu acoustique et émotionnel de stimuli sonores

Nous avons répliqué l'expérience proposée par Enzler et al., à laquelle nous avons ajouté un corpus de stimuli sonores (BIRDS) au corpus initial (CDS) ainsi qu'une évaluation du caractère émotionnel des stimuli sonores en complément de l'évaluation du caractère agréable.

### 4.3.1 Contenu émotionnel

Nous avons analysé l'influence des facteurs Groupe (Hyperacousie/Contrôle) et Bruit (Exposé/Non-exposé) sur l'évaluation du caractère émotionnel des stimuli sonores des corpus CDS et BIRDS.

L'analyse statistique montre un effet significatif du facteur principal Bruit sur l'évaluation de la valence des stimuli du corpus BIRDS ( $F = 6.25$ ,  $p = 0.0197$ ), les personnes exposées au bruit évaluant en moyenne les stimuli comme plus positifs que les participants non-exposés. Il y a également une interaction statistiquement significative entre les facteurs Groupe et Bruit ( $F = 5.07$ ,  $p = 0.0338$ ), les participants hyperacousiques non-exposés au bruit évaluant les stimuli du corpus BIRDS moins positivement que les participants des sous-groupes hyperacousiques exposés au bruit et non hyperacousiques exposés au bruit. Bien que la même tendance soit observée pour le corpus CDS (les participants non-exposés au bruit, en particulier les hyperacousiques non-exposés, évaluent en moyenne la valence moins positivement que les autres), l'effet du bruit et l'interaction avec l'hyperacousie ne sont pas statistiquement significatifs.

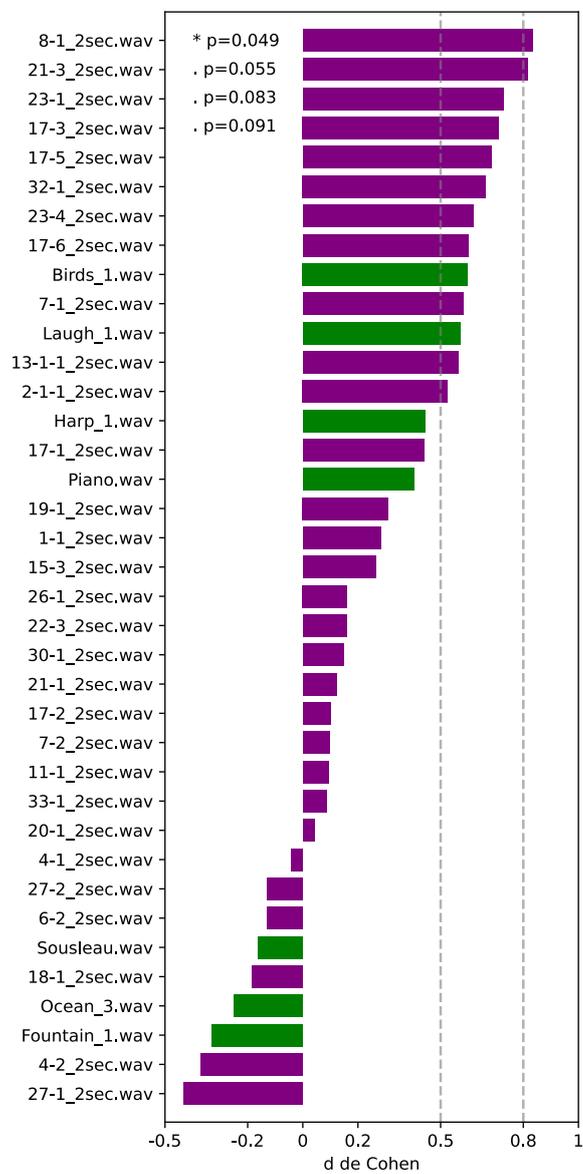


FIGURE 6 : Taille de l'effet de l'hyperacousie sur l'évaluation du caractère agréable pour chacun des stimuli des corpus CDS (vert) et Birds (pourpre).

Nous avons également analysé l’influence des facteurs Groupe (Hyperacousie/Contrôle) et Bruit sur l’évaluation de l’intensité émotionnelle des stimuli. Il n’y a aucun effet significatif du groupe ( $F = 1.49$ ,  $p = 0.234$ ) ni de l’exposition au bruit ( $F = 0.49$ ,  $p = 0.489$ ) sur l’évaluation de l’intensité des stimuli du corpus BIRDS. En revanche, il y a un effet significatif du facteur Groupe sur l’évaluation de l’intensité des stimuli du corpus CDS ( $F = 5.78$ ,  $p = 0.0243$ ), les hyperacousiques évaluant l’intensité des stimuli du corpus CDS comme plus importante que les participants du groupe Contrôle *i.e.* non-hyperacousiques.

Nous avons finalement analysé l’influence de l’évaluation du caractère émotionnel (valence et intensité) sur l’évaluation du caractère agréable des stimuli sonores pour les deux corpus, CDS et BIRDS. Les analyses effectuées étaient des analyses de corrélations de Pearson. Les résultats montrent une corrélation statistiquement significative entre l’évaluation du caractère agréable et la valence ( $R = 0.84$ ,  $p = 2.078e - 08$ ). En revanche, nous n’observons pas de corrélation significative entre l’évaluation de l’intensité et l’évaluation du caractère agréable des stimuli sonores ( $R = 0.13$ ,  $p = 0.5262$ ).

### 4.3.2 Contenu acoustique

Nous nous sommes intéressés à l’influence des descripteurs définis dans la section 3.5 sur l’évaluation du caractère agréable des stimuli sonores du corpus BIRDS. Le contenu sémantique est équivalent entre les stimuli, car chaque son provient d’un oiseau, mais ils diffèrent dans leur contenu acoustique. Nous pouvons ainsi étudier de façon indépendante l’influence des dimensions acoustiques sur l’évaluation du caractère agréable des stimuli sonores chez les hyperacousiques et le groupe contrôle.

Nous avons effectué une analyse de corrélation de Pearson entre chaque descripteur et la moyenne des évaluations du caractère agréable pour chacun des stimuli du corpus BIRDS. Les résultats sont présentés en Figure 7. Les analyses montrent une corrélation statistiquement significative entre l’évaluation du caractère agréable et le centroïde spectral (SpecCent) chez les hyperacousiques ( $R = -0.52$ ,  $p = 0.003$ ) et chez les participants du groupe contrôle ( $R = -0.49$ ,  $p = 0.006$ ). On observe également une corrélation statistiquement significative entre l’évaluation du caractère agréable des stimuli du corpus BIRDS et le crête spectral (SpecCrest) chez les hyperacousiques ( $R = 0.40$ ,  $p = 0.03$ ) et les contrôles ( $R = 0.46$ ,  $p = 0.01$ ).

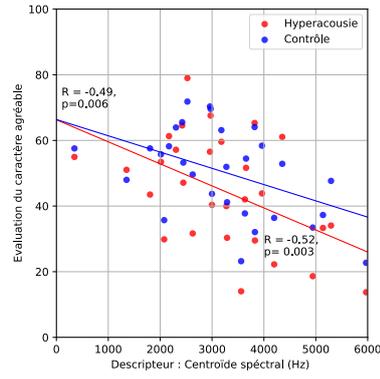
En revanche, nous ne trouvons pas de corrélations significatives entre le temps d’attaque logarithmique (Lat-Attack-Time, LAT) et l’évaluation du caractère agréable, ni pour les hyperacousiques ( $R = 0.29$ ,  $p = 0.12$ ) ni pour le groupe contrôle ( $R = 0.15$ ,  $p = 0.41$ ). On n’observe pas non plus de corrélations statistiquement significatives pour le paramètre pente d’attaque (Attack Slope, AttSlop), ni chez les hyperacousiques ( $R = 0.03$ ,  $p = 0.88$ ) ni dans le groupe contrôle ( $R = -0.04$ ,  $p = 0.83$ ). Aucune corrélation statistiquement significative n’est trouvée pour le paramètre modulation de fréquence (Frequency Modulation, FreqMod), ni chez les hyperacousiques ( $R = 0.05$ ,  $p = 0.76$ ) ni dans le groupe contrôle ( $R = 0.02$ ,  $p = 0.93$ ). De même, le paramètre modulation en amplitude (Amplitude Modulation, AmpMode) ne présente pas de corrélations significatives, ni chez les hyperacousiques ( $R = -0.01$ ,  $p = 0.94$ ) ni dans le groupe contrôle ( $R = -0.01$ ,  $p = 0.93$ ). Enfin, aucune corrélation statistiquement significative n’est observée pour le paramètre temps de relâchement (Release, REL), ni chez les hyperacousiques ( $R = 0.23$ ,  $p = 0.22$ ) ni dans le groupe contrôle ( $R = 0.23$ ,  $p = 0.22$ ).

Il y a une tendance de l’effet du paramètre de modulation de fréquence (MPS) sur l’évaluation du caractère agréable des stimuli du corpus BIRDS chez les hyperacousiques ( $R = -0.35$ ,  $p = 0.059$ ), cette tendance étant plus faible pour le groupe contrôle ( $R = -0.30$ ,  $p = 0.10$ ). Le MPS peut caractériser la rugosité des sons. Les sons les plus rugueux sont évalués comme plus désagréables, particulièrement par les hyperacousiques.

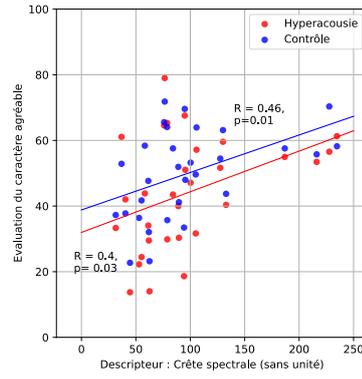
Les paramètres spectraux tels que le centroïde spectral et la crête spectrale semblent jouer un rôle important dans le jugement du caractère agréable des stimuli sonores, tant chez les hyperacousiques que dans le groupe contrôle. Les stimuli sonores du corpus BIRDS dont le centroïde spectral est plus élevé (indiquant une tonalité plus aiguë) sont évalués comme plus désagréables que les stimuli ayant un centroïde plus bas (indiquant une tonalité plus grave). D’autre part, les stimuli dont le spectre n’est pas plat (où certaines fréquences se distinguent des autres) sont jugés comme plus agréables que ceux dont le spectre est plus uniforme (comme du bruit large bande).

#### 4.4 Évaluation de l'état émotionnel

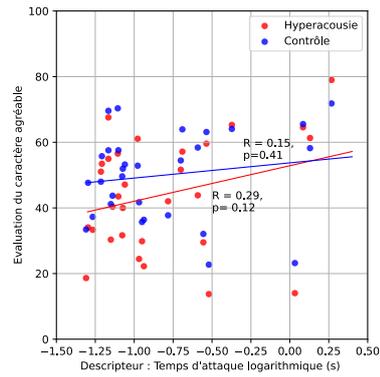
La partie Trait du questionnaire STAI (State-Trait Anxiety Inventory ; [31]) a été administrée aux participants. Les analyses ont été effectuées sur le score global au questionnaire en fonction des facteurs Groupe (Hyperacousiques, Contrôles) et Bruit. Les analyses statistiques n'indiquent pas d'effets significatifs du Groupe ( $F = 0.24$ ,  $p = 0.632$ ) ni de l'exposition au bruit ( $F = 0.66$ ,  $p = 0.426$ ) sur les résultats au questionnaire.



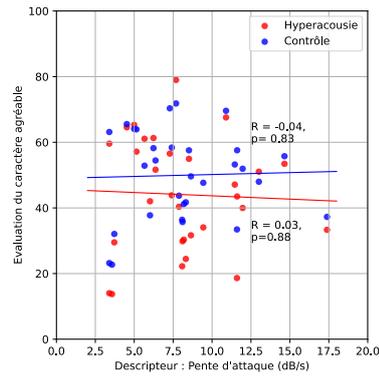
(a) Centroïde spectral



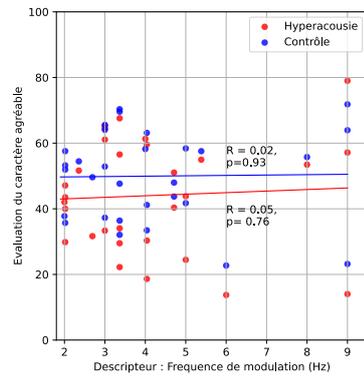
(b) Cete spectrale



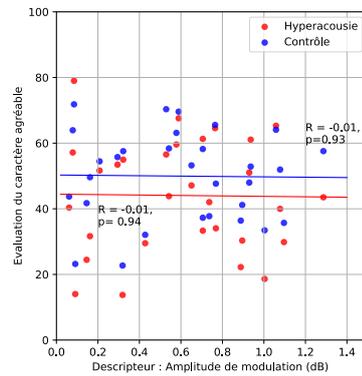
(c) LAT



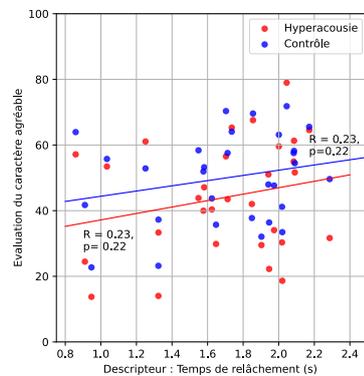
(d) Attslop



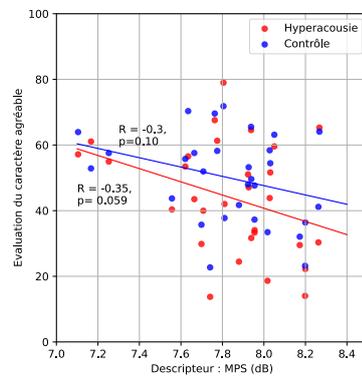
(e) freqmod



(f) ampmod



(g) REL



(h) mps

FIGURE 7 : Corrélation entre les descripteurs et la moyenne des évaluations du caractère agréable des stimuli sonores du corpus Birds.

## 5 Discussion générale

### 5.1 Évaluation de l’hyperacousie

Afin de définir l’hyperacousie, nous nous sommes basés dans cette étude sur le questionnaire de Khalfa et al. [19]. Bien que ce questionnaire soit largement utilisé dans la littérature comme méthode de diagnostic, il est conçu pour décrire l’importance de l’hyperacousie. De plus, les seuils utilisés pour catégoriser l’hyperacousie diffèrent d’une étude à l’autre, ce qui rend la comparaison des résultats difficile.

Dans cette étude, nous avons proposé des échelles pour évaluer l’hyperacousie, basées sur le principe des Échelles Visuelles Analogiques utilisées pour les acouphènes. La première échelle interroge l’intensité de l’hyperacousie, par analogie avec la méthode utilisée pour le sondage de la Journée Nationale de l’Audition [6]. La deuxième échelle mesure la gêne induite par l’hyperacousie dans la vie quotidienne. Une forte corrélation a été trouvée entre les deux échelles et l’hyperacousie. Il semble que le score de 60/100 permette de différencier les hyperacousiques des non-hyperacousiques, l’ensemble des hyperacousiques ayant un score supérieur à 60/100. Un seul participant a un score inférieur à 26, mais une intensité d’hyperacousie supérieure à 60/100.

Nous avons également mené des entretiens avec l’ensemble des participants hyperacousiques et ceux indiquant être gênés par les sons. Plusieurs participants ont signalé souffrir de douleurs causées par des sons très spécifiques, mais n’ayant pas un score d’hyperacousie élevé. Ces deux participants indiquent que cette douleur, n’intervenant que pour des sons spécifiques, ne les gêne pas dans leur quotidien. Comme le questionnaire d’hyperacousie porte en partie sur la gêne occasionnée par l’hyperacousie dans la vie quotidienne, il ne permet pas de détecter les participants hyperacousiques dont la gêne, bien qu’intense ou douloureuse, ne se manifeste pas au quotidien.

De plus, les profils des participants hyperacousiques sont très diversifiés. Ils diffèrent notamment par les stimuli à l’origine de leur gêne, la durée de leur hyperacousie, l’événement déclencheur, ainsi que par le type de symptômes occasionnés (gêne, douleur, fatigue, par exemple). Le questionnaire d’hyperacousie ne permet pas de classifier ces différents profils. Il serait pertinent de proposer une catégorisation plus fine des profils hyperacousiques afin d’étudier plus précisément les liens entre les symptômes décrits par les personnes hyperacousiques et leur état auditif.

### 5.2 Liens entre hyperacousie, état auditif et état émotionnel

Nous avons observé une tendance statistique entre le score à l’audiométrie vocale dans le bruit et le score au questionnaire d’hyperacousie. En raison de notre classification de l’hyperacousie, basée sur un score de 26 au questionnaire de Khalfa et al. — questionnaire qui interroge principalement les influences sur la vie sociale, le comportement et la gêne induite par l’hyperacousie dans la vie quotidienne, notamment la compréhension de la parole et la gêne dans le bruit — il semblerait cohérent que l’on observe un effet de l’hyperacousie sur les résultats de l’audiométrie vocale dans le bruit.

Par ailleurs, nous observons un effet de l’hyperacousie sur l’audiométrie en haute fréquence, les hyperacousiques semblant avoir une audiométrie vocale plus faible que les participants du groupe contrôle. Cependant, nous n’avons pas écarté les participants ayant des pertes auditives importantes, pour lesquels la gêne décrite pourrait être due à un mécanisme de recrutement.

Contrairement à ce que l’on pourrait attendre d’une audiométrie vocale et tonale plus faible chez les hyperacousiques, ceux-ci ont en moyenne un niveau d’otoémissions plus élevé que les participants du groupe contrôle, et ce, pour les deux tests (DPOAE et TEOAE). Ce résultat serait à vérifier sur un panel de participants plus large, avec une catégorisation de l’hyperacousie plus poussée.

De plus, nous avons trouvé une interaction significative entre les facteurs groupe (hyperacousie/contrôle) et bruit (exposé/non-exposé) dans l’évaluation du caractère agréable des stimuli sonores. En particulier, les participants du groupe hyperacousie non exposés au bruit évaluent les stimuli sonores comme étant, en moyenne, moins agréables que les participants des autres groupes. De plus, l’évaluation de la valence dépend de l’exposition au bruit, et les participants hyperacousiques évaluent l’intensité des stimuli du corpus CDS comme plus importante.

Nous avons ainsi trouvé des relations entre l’état auditif (pertes auditives, audiométrie vocale et tonale, et niveau d’otoémissions plus élevé) et l’hyperacousie. Nous avons également observé un effet de l’exposition au bruit et de l’hyperacousie sur l’évaluation du caractère agréable et émotionnel des sons.

Il serait judicieux de poursuivre ce travail en recrutant davantage de participants et en proposant une nouvelle expérience ciblant un profil d'hyperacousie précis, afin d'étudier ces liens dans une population homogène en termes d'exposition au bruit et de profil audiolgique.

### 5.3 Facteurs acoustiques de la gêne sonore liée à l'hyperacousie

Nous observons, de façon similaire aux résultats de Enzler et al. [9], que les hyperacousiques évaluent en moyenne l'ensemble des stimuli comme plus désagréables que les participants du groupe contrôle. Cependant, cette différence n'est significative que pour les stimuli du corpus Birds, indiquant que les stimuli de ce corpus permettent une meilleure catégorisation entre hyperacousiques et contrôles.

Dans ce travail, nous avons montré l'influence du contenu spectral (crête et centroïde spectraux) sur l'évaluation du caractère agréable/désagréable des stimuli sonores. Cependant, nous n'avons pas observé de différence entre les hyperacousiques et les participants du groupe contrôle dans l'évaluation des stimuli en fonction de ces descripteurs.

Nous avons également classé les stimuli sonores utilisés des corpus Birds et CDS issus de [9]. Bien que les stimuli du groupe CDS aient été identifiés comme permettant la meilleure discrimination entre les hyperacousiques et les contrôles dans l'étude réalisée par Enzler et al., nous observons que certains stimuli du corpus Birds permettent une meilleure différenciation entre hyperacousiques et contrôles. Étant donné que l'ensemble des stimuli du corpus Birds a le même contenu sémantique qu'un des stimuli du corpus CDS, il serait intéressant de poursuivre l'étude en s'intéressant à l'influence du contenu sémantique sur la gêne induite par les stimuli sonores chez les hyperacousiques.

## 6 Conclusion

Ce stage au sein de l'IRBA a permis de contribuer à l'étude des facteurs acoustiques, auditifs et émotionnels de l'hyperacousie dans le cadre du projet HYMIL. À travers l'élaboration et la conduite d'expériences psychophysiques, j'ai pu approfondir mes connaissances en acoustique et en traitement du signal, tout en acquérant des compétences pratiques en audiologie. Les résultats préliminaires obtenus mettent en lumière des corrélations intéressantes entre l'hyperacousie et les caractéristiques acoustiques et émotionnelles des stimuli sonores, ouvrant la voie à de futures recherches.

En particulier, nous avons trouvé des liens entre hyperacousie et état auditif. De plus, nous avons identifié l'influence des paramètres spectraux sur l'évaluation du caractère agréable des stimuli sonores, sans différences significatives entre hyperacousiques et contrôles. Par ailleurs, nous avons montré que l'évaluation du caractère émotionnel positif ou négatif des stimuli est corrélée à l'évaluation du caractère agréable de ces sons, ce qui n'est pas le cas de l'évaluation de l'intensité émotionnelle. Enfin, nous n'avons pas observé de liens entre hyperacousie et état émotionnel, mesuré à l'aide du questionnaire STAI.

Ce travail, dans lequel j'ai mené une étude préliminaire avec un nombre restreint de participants aux profils très diversifiés, a permis d'ouvrir la voie à de nouvelles expériences, ciblant des participants exposés au bruit et avec un profil audiolgique plus contrôlé.

## Références

- [1] Institut de recherche biomédicale des armées (irba). URL <https://irba.sante.defense.gouv.fr/>. Consulté le 31 Juillet 2024.
- [2] H. Aazh and B. C. Moore. Factors related to uncomfortable loudness levels for patients seen in a tinnitus and hyperacusis clinic. **International Journal of Audiology**, 56(10) :793–800, 2017.
- [3] B. Adams, M. Sereda, A. Casey, P. Byrom, D. Stockdale, and D. J. Hoare. A delphi survey to determine a definition and description of hyperacusis by clinician consensus. **International journal of audiology**, 60(8) :607–613, 2021.
- [4] M. Anari, A. Axelsson, A. Eliasson, and L. Magnusson. Hypersensitivity to sound : questionnaire data, audiometry and classification. **Scandinavian audiology**, 28(4) :219–230, 1999.
- [5] L. H. Arnal, A. Flinker, A. Kleinschmidt, A.-L. Giraud, and D. Poeppel. Human screams occupy a privileged niche in the communication soundscape. **Current Biology**, 25(15) :2051–2056, 2015.
- [6] Association France Acouphènes. Baromètre « acouphènes 2024 », vague 3, sondage ifop pour la journée nationale de l’audition. Février 2024.
- [7] S. Dubal and I. Viaud-Delmon. Magical ideation and hyperacusis. **Cortex**, 44(10) :1379–1386, 2008.
- [8] T. M. Elliott and F. E. Theunissen. The modulation transfer function for speech intelligibility. **PLoS computational biology**, 5(3) :e1000302, 2009.
- [9] F. Enzler, P. Fournier, and A. J. Norena. A psychoacoustic test for diagnosing hyperacusis based on ratings of natural sounds. **Hearing research**, 400 :108124, 2021.
- [10] K. Fackrell, C. Fearnley, D. J. Hoare, M. Sereda, et al. Hyperacusis questionnaire as a tool for measuring hypersensitivity to sound in a tinnitus research population. **BioMed research international**, 2015, 2015.
- [11] K. Fackrell, I. Potgieter, G. S. Shekhawat, D. M. Baguley, M. Sereda, D. J. Hoare, et al. Clinical interventions for hyperacusis in adults : a scoping review to assess the current position and determine priorities for research. **BioMed research international**, 2017, 2017.
- [12] C. Fernandez and V. Isnard. Protocole de recherche sur la prévalence de l’hyperacousie chez différentes populations exposées au bruit. In **Journées Jeunes Chercheur-se-s en Audition, Acoustique musical et Signal audio**, 2024.
- [13] B. Greenberg and M. Carlos. Psychometric properties and factor structure of a new scale to measure hyperacusis : Introducing the inventory of hyperacusis symptoms. **Ear and hearing**, 39(5) :1025–1034, 2018.
- [14] D. Griffin and J. Lim. Signal estimation from modified short-time fourier transform. **IEEE Transactions on acoustics, speech, and signal processing**, 32(2) :236–243, 1984.
- [15] S. Hébert, P. Fournier, and A. Noreña. The auditory sensitivity is increased in tinnitus ears. **Journal of Neuroscience**, 33(6) :2356–2364, 2013.
- [16] V. Isnard, M. Taffou, I. Viaud-Delmon, and C. Suied. Auditory sketches : very sparse representations of sounds are still recognizable. **PloS one**, 11(3) :e0150313, 2016.
- [17] M. M. Jastreboff and P. J. Jastreboff. Components of decreased sound tolerance : hyperacusis, misophonia, phonophobia. **ITHS News Lett**, 2(5-7) :1–5, 2001.
- [18] A. KAYAN and J. D. HOOD. Neuro-otological manifestations of migraine. **Brain**, 107(4) :1123–1142, 1984.
- [19] S. Khalfa, S. Dubal, E. Veuillet, F. Perez-Diaz, R. Jouvent, and L. Collet. Psychometric normalization of a hyperacusis questionnaire. **Orl**, 64(6) :436–442, 2002.
- [20] S. Khalfa, N. Bruneau, B. Rogé, N. Georgieff, E. Veuillet, J.-L. Adrien, C. Barthélémy, and L. Collet. Increased perception of loudness in autism. **Hearing research**, 198(1-2) :87–92, 2004.

- [21] A. McCombe, D. Baguley, R. Coles, L. McKenna, C. McKinney, and P. Windle-Taylor. Guidelines for the grading of tinnitus severity : the results of a working group commissioned by the british association of otolaryngologists, head and neck surgeons, 1999. **Clinical Otolaryngology & Allied Sciences**, 26(5) :388–393, 2001.
- [22] O. M. Meeus, M. Spaepen, D. D. Ridder, and P. H. V. d. Heyning. Correlation between hyperacusis measurements in daily ent practice. **International Journal of Audiology**, 49(1) :7–13, 2010.
- [23] B. C. Moore, B. R. Glasberg, R. F. Hess, and J. P. Birchall. Effects of flanking noise bands on the rate of growth of loudness of tones in normal and recruiting ears. **The Journal of the Acoustical Society of America**, 77(4) :1505–1513, 1985.
- [24] M. Ohresser. **Les acouphènes : diagnostic, prise en charge et thérapeutique**. Elsevier Health Sciences, 2017.
- [25] J. Paulin, L. Andersson, and S. Nordin. Characteristics of hyperacusis in the general population. **Noise and Health**, 18(83) :178–184, 2016.
- [26] G. Peeters, B. L. Giordano, P. Susini, N. Misdariis, and S. McAdams. The timbre toolbox : Extracting audio descriptors from musical signals. **The Journal of the Acoustical Society of America**, 130(5) :2902–2916, 2011.
- [27] D. Ponsot. L’hyperacousie :«état de la science». In **6ème colloque AFREPA**, 2015.
- [28] V. Rosi, P. Arias Sarah, O. Houix, N. Misdariis, and P. Susini. Shared mental representations underlie metaphorical sound concepts. **Scientific Reports**, 13(1) :5180, 2023.
- [29] J. A. Russell. A circumplex model of affect. **Journal of personality and social psychology**, 39(6) :1161, 1980.
- [30] L. Shi, R. Zhao, X. Li, W. Sun, and X. Liu. A review of the neurobiological mechanisms that distinguish between loudness recruitment and hyperacusis. **Medical science monitor : international medical journal of experimental and clinical research**, 28 :e936373–1, 2022.
- [31] C. D. Spielberger. State-trait anxiety inventory for adults. 1983.
- [32] M. Taffou, C. Suied, and I. Viaud-Delmon. Auditory roughness elicits defense reactions. **Scientific Reports**, 11(1) :956, 2021.
- [33] R. S. Tyler, M. Pienkowski, E. R. Roncancio, H. J. Jun, T. Brozoski, N. Dauman, C. B. Coelho, G. Andersson, A. J. Keiner, A. T. Cacace, et al. A review of hyperacusis and future directions : part i. definitions and manifestations. **American journal of audiology**, 23(4) :402–419, 2014.
- [34] E. Vannson, L. Cassou, P. Rajoelison, N. Paraouty, N. Wallaert, C. Lorenzi, J. Bouy, C. Suied, T. Fux, and G. Andéol. Vers un complément à l’audiométrie tonale pour le suivi auditif du militaire. **Revue Médecine et Armées**, 48(1) :23–34, 2022.
- [35] M. B. Wallén, D. Hasson, T. Theorell, and B. Canlon. The correlation between the hyperacusis questionnaire and uncomfortable loudness levels is dependent on emotional exhaustion. **International journal of audiology**, 51(10) :722–729, 2012.

## A Annexe 1 : Interface de l'application MatlabApp



FIGURE 8 : Interface Matlab pour l'évaluation de la valence des sons naturels.



FIGURE 9 : Interface Matlab pour d'évaluation du caractère agréable des sons naturels.