irsst

Fédérateur de connaissances
pour éclairer l'action en santé
et en sécurité du travail

RAPPORT SCIENTIFIQUE

Étude multidisciplinaire du confort des bouchons d'oreilles : Vers une protection auditive efficace en milieu de travail

Olivier Doutres[1], Franck Sgard [2], Alessia Negrini [2], Alain Berry [3], Chantal Gauvin [2]

RS-1233-fr

[1] École de technologie supérieure (ÉTS) [2] Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST)
[3] Université de Sherbrooke (UdeS)

NOS RECHERCHES travaillent pour vous !

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

Pour en savoir plus

Visitez notre dépôt institutionnel PhareSST ! Vous y trouverez une information complète et à jour. De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement.
www.pharesst.irsst.qc.ca

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement :

- au magazine Prévention au travail, publié conjointement par l'Institut et la CNESST (preventionautravail.com)
- au bulletin électronique InfoIRSST

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2026
ISBN 978-2-89797-343-8 (PDF)

https://doi.org/10.70010/FCRZ6556

Divulgation de l'utilisation de l'intelligence artificielle générative (IAG)

© Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail, 2026

Ce document est sous une licence Creative Commons. Attribution - Utilisation non commerciale - Pas d'œuvre dérivée 4.0 International. Cette licence autorise l'utilisation et le partage du document, à condition que l'IRSST soit cité en tant que source, que le contenu est diffusé sans modification et qu'il est utilisé à des fins non commerciales. Si vous souhaitez modifier son contenu ou l'utiliser à des fins commerciales, veuillez contacter : publications@irsst.qc.ca

IRSST — Service des communications et des relations publiques
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec) H3A 3C2
Téléphone : 514 288-1551
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca

Note au lectorat

Cette étude a été financée par l'IRSST. Les conclusions et recommandations sont celles des autrices et auteurs. Les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document n'ont pas fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

Avis de non-responsabilité

L'IRSST ne donne aucune garantie relative à l'exactitude, la fiabilité ou le caractère exhaustif de l'information contenue dans ce document. En aucun cas l'IRSST ne saurait être tenu responsable pour tout dommage corporel, moral ou matériel résultant de l'utilisation de cette information. Notez que les contenus des documents sont protégés par les législations canadiennes applicables en matière de propriété intellectuelle. Cette publication est disponible en version PDF sur le dépôt institutionnel de l'IRSST (PhareSST).

Cadre de référence pour la recherche en SST

Prévention des atteintes à l'intégrité physique et psychique

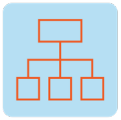
Réadaptation, retour et maintien au travail

Surveillance et prospection des données en SST

Identification des dangers, estimation et évaluation des risques

Élimination des dangers et maîtrise des risques

Métrologie appliquée à la SST



Organisation du travail

Santé mentale et psychologique

Population, société et SST

REMERCIEMENTS

- Les organismes subventionnaires ayant contribué à l'atteinte des objectifs du projet de recherche : IRSST, Mitacs (#IT10643), INRS en France, University of Sheffield au Royaume-Uni, Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (subventions RGPIN-2016-04926, RGPIN-2016–06795, I2IPJ 586099- 2023).
- Les membres du Comité de suivi de l'IRSST ainsi que les conseillers IRSST qui ont la charge de la valorisation et du transfert des connaissances (François Ouellet et René Dufresne).
- Les membres du comité aviseurs fabricants de bouchons d'oreilles et experts dans le domaine de la protection auditive et d'équipements de mesure.
- Les entreprises participantes, les responsables SST et les participants eux-mêmes.
- Stagiaires du Programme de baccalauréat de l'École de relations industrielles, Université de Montréal : Mélissa Naya Carvalho Gomes, Karine Lachapelle et Jessica Tello Tates.
- Stagiaire du Programme de stage d'été du Cégep de Sorel-Tracy en Environnement, hygiène et sécurité au travail : Léony-Anna Desmeules.
- Stagiaire du Programme de stage de fin d'études pour le Diplôme Universitaire de Technologie (DUT), Département d'Hygiène, Sécurité et Environnement (HSE) de l'IUT de l'Université Bordeaux I : Lolie Rabocelli.
- Le personnel de l'IRSST ayant contribué au développement et diffusion du matériel visuel (le personnel du Service des communications et des relations publiques), à la saisie des questionnaires (Brigitte Blanchette, Natalia Blinova, Gabriel Cormier, Marie-Josée Homier, Monica Mirea, Fabienne Ouellet, Catheline Pelletier) et à la révision / mise en forme du rapport.
- Francine Chea (ÉTS) pour le suivi des dossiers étudiants, des subventions MITACS, avec le comité d'éthique et des « rémunérations » pour les participants aux différentes études de terrain et en laboratoire.
- Les collaborateurs Caroline St-Germain (audiologiste), Mickel Khairallah et Alisanne Soly, finissants en audiologie de l'Université de Montréal.
- Olivier Bouthot (ÉTS) pour le suivi de toutes les commandes.

Ce rapport est dédié à la mémoire de Simon Benacchio, ancien boursier postdoctoral de l'IRSST à l'ÉTS, décédé subitement à l'âge de 35 ans en 2023. Chercheur brillant, passionné et profondément humain, Simon a marqué notre équipe par son engagement, sa rigueur scientifique et sa capacité à fédérer autour de projets novateurs. Son travail sur la modélisation réaliste du conduit auditif, notamment par le développement des premières oreilles artificielles dites « Simone », a permis à notre équipe de recherche de se positionner à l'international dans le domaine de la protection auditive. Bien que son départ laisse un vide immense, son héritage scientifique perdure à travers les travaux qu'il a initiés et que nous poursuivons avec le même dévouement.

SOMMAIRE

L'utilisation de protecteurs auditifs individuels (PICB), tels que les casques ou les bouchons d'oreilles souvent recommandés comme mesure temporaire, reste souvent le seul moyen d'assurer la protection des travailleuses et travailleurs exposés quotidiennement à des niveaux de bruit dangereux. Actuellement, le choix d'un PICB est principalement basé sur des considérations liées à l'atténuation acoustique qu'il offre (et mesurée en laboratoire par des organisations certifiées), et/ou à des caractéristiques de l'environnement de travail, telles que la chaleur, l'hygiène et la compatibilité avec d'autres équipements de protection individuelle (EPI). Le port de PICB est connu pour générer de nombreux inconforts qui peuvent amener la personne exposée au bruit à ne pas utiliser correctement ni de manière constante son protecteur, qui sera alors rapidement inefficace. Même si les barrières à l'utilisation des PICB existent et souvent prédominent, un PICB peut être également une source de confort, notamment en favorisant le sentiment de se sentir protégé du bruit, en améliorant la communication dans le bruit ou en impactant positivement la concentration, la productivité et la réalisation du travail. Le confort n'est donc pas seulement l'absence d'inconfort. Néanmoins, par souci de simplicité, nous utiliserons dans la suite le terme « confort » pour désigner les deux facettes, négative (inconfort) et positive (confort) du concept. L'évaluation du confort résulte d'interactions complexes entre la personne (l'utilisateur), le PICB porté et l'environnement dans lequel elle travaille, formant ainsi le concept d'une triade, où chacune des trois composantes est définie par des caractéristiques à la fois physiques et psychosociales. Ce projet visait à améliorer la compréhension du confort des PICB de type bouchon d'oreille en identifiant les caractéristiques de la triade qui influencent de manière significative les principaux attributs du confort.

Ce rapport synthétise un ensemble de publications issu des travaux de l'équipe de recherche dans le cadre d'un projet de recherche multidisciplinaire d'envergure. Celui-ci a permis des avancées significatives dans la compréhension du confort des PICB. D'abord, un cadre théorique a été établi pour étudier du confort de ces EPI. Une définition holistique du confort fondée sur le concept de triade ainsi qu'un modèle conceptuel qui en capture la complexité, en intégrant les dimensions physique, fonctionnelle, acoustique et psychologique, ont été élaborés. Ce cadre théorique a été complété par le développement et la validation d'un questionnaire innovant pour le contexte québécois, le COPROD-NAQ, qui mesure le confort des bouchons d'oreilles de manière multidimensionnelle, avec des indices de confort spécifiques et un indice global. Le confort a ainsi été mesuré auprès de participants à la fois sur le terrain et en laboratoire. Les caractéristiques psychosociales de la triade ont été évaluées par questionnaire, tandis que les caractéristiques physiques ont été obtenues grâce à des techniques de mesures éprouvées et à des approches originales. Les caractéristiques physiques résultant de la phase d'interaction du système oreille-bouchon (p. ex. géométrie déformée du canal auditif, pression mécanique induite sur le canal auditif par le bouchon, niveau sonore dans le canal occlus, etc.) peuvent être mesurées directement sur sujets humains ou estimées à l'aide d'outils de laboratoire

innovants, appelés « testeurs de confort ». Ces testeurs peuvent opérer dans le monde réel à l'aide de capteurs physiques; on parle alors de testeur « expérimental » ou bien dans une idéalisation du monde réel à l'aide de modèles numériques; on parle alors de testeur « virtuel ». Des analyses statistiques, principalement centrées sur les bouchons jetables ou réutilisables conçus pour s'adapter à la plupart des conduits auditifs, ont été effectuées pour identifier les principales caractéristiques physiques et psychosociales de la triade qui influencent les différents attributs et sous-dimensions du confort. Les résultats ouvrent la voie à l'élaboration d'indices de confort objectivés et à la conception de bouchons plus confortables.

Sur le terrain, les résultats montrent que le confort psychologique (bien-être, satisfaction) et fonctionnel (facilité d'utilisation) influencent davantage le confort global que les aspects purement physiques ou acoustiques. Plusieurs facteurs influencent le confort : l'environnement de travail (horaires, température), les caractéristiques individuelles (âge, latéralité) et le type de bouchon. Les bouchons sur mesure se révèlent généralement plus confortables. En laboratoire, la famille de bouchons d'oreille influence significativement le confort, principalement déterminé par sa dimension physique et influencé par les caractéristiques physiques du protecteur. Les effets de la famille diffèrent des observations sur le terrain, à l'exception de la dimension physique, ce qui souligne la complexité du phénomène. Les résultats indiquent également que les tests en laboratoire réalisés avec des utilisateurs novices peuvent suffire pour évaluer l'inconfort physique, cette dimension du confort étant principalement déterminée par les caractéristiques physiques du protecteur. Pour cette dimension, les conclusions observées en laboratoire et sur le terrain sont identiques vis-à-vis des caractéristiques influentes des bouchons d'oreille ainsi que de leurs effets. Les résultats en laboratoire ont aussi révélé que pour évaluer le confort des bouchons d'oreille, il n'est pas nécessaire d'y reproduire fidèlement un environnement sonore réaliste enregistré sur le terrain. En revanche, cette reproduction demeure indispensable pour mesurer l'effet des bouchons sur la détection d'alarmes et la compréhension de la parole, ce qui met en évidence que la perception d'un effet, mesurée par des tests perceptifs objectifs, et le confort, évalué à l'aide de questionnaires, représentent deux concepts distincts. Des testeurs de confort innovants, à la fois expérimentaux et virtuels, ont été conçus pour mesurer ou simuler les caractéristiques physiques liées à l'interaction entre le conduit auditif et le bouchon. Ces outils, combinant imagerie, modélisation et essais, ont permis d'approfondir la compréhension des mécanismes en jeu. L'analyse des facteurs influençant le confort révèle que les propriétés mécaniques des bouchons déterminent principalement le confort physique, tandis que les dimensions fonctionnelle et acoustique sont davantage liées aux caractéristiques individuelles et à l'expérience d'utilisation. Enfin, une étude ciblée en laboratoire sur la dimension acoustique a conduit, grâce à la conception d'un méta-bouchon intégrant des résonateurs de Helmholtz et destiné à réduire l'effet d'occlusion, à établir des liens entre l'effet d'occlusion perçu, ressenti et objectif, la taille de l'embout ainsi que certaines variables psychosociales des participants.

Le projet a généré plusieurs retombées technologiques telles que des outils et méthodes innovants pour améliorer la conception et la sélection des bouchons d'oreilles. Le questionnaire COPROD-NAQ, validé scientifiquement, permet d'évaluer le confort multidimensionnel tant sur le terrain qu'en laboratoire et est déjà utilisé par des manufacturiers pour le développement de produit et l'analyse des retours client. Une étude morphologique réalisée sur 242 conduits auditifs a permis de concevoir des oreilles artificielles représentatives des participants afin de couvrir la variabilité interindividuelle de l'atténuation acoustique des bouchons testés. Intégrés aux têtes artificielles du commerce, ces conduits permettraient de concevoir de bouchons d'oreille adaptés au plus grand nombre possible. L'équipe de recherche a également mis au point la première méthode *in vivo* d'estimation des déplacements des tissus du conduit auditif par IRM lorsque le conduit auditif est occlus par un PICB. Les données ainsi recueillies peuvent être utiles pour valider les testeurs virtuels capables de prédire des variables acoustiques et mécaniques, tout en ouvrant la voie à la conception d'oreilles artificielles plus réalistes. Un outil simple, peu coûteux et utilisable sur le terrain (EST 3M™ Eargage « étendu ») a été proposé pour mesurer la taille du conduit auditif. Comparable à un pédimètre, il permet d'identifier les conduits exceptionnellement larges, à risque de moindre protection, et d'aider au choix de bouchons adaptés à la morphologie de la personne. Des testeurs de confort expérimentaux et virtuels développés pour estimer les caractéristiques telles que la pression mécanique, la force d'extraction, le frottement, l'atténuation acoustique et l'effet d'occlusion, résultant de l'interaction entre bouchon et canal auditif, ouvrent la voie à la conception de bouchons plus confortables. Par exemple, ce projet a permis de développer le premier conduit auditif artificiel doté d'une peau intelligente permettant de mesurer la pression mécanique exercée par le bouchon sur les parois du conduit. Une première oreille artificielle tronquée bio-fidèle (i.e., présence de tissus mous, os et cartilages artificiels) a aussi été conçue spécifiquement pour mesurer l'effet d'occlusion objectif et utilisée pour concevoir un bouchon qui réduit l'inconfort acoustique associé à la perception désagréable de sa propre voix lorsque les oreilles sont occluses. Enfin, les avancées du projet (quant à la mesure de l'inconfort acoustique associé à l'effet d'occlusion et au développement de testeurs de confort expérimentaux et virtuels dédiés à cet inconfort) ont permis le dépôt d'un brevet de méta-bouchon réduisant l'effet d'occlusion tout en maintenant une atténuation efficace.

Ce projet a également eu plusieurs retombées pour les milieux de travail. Outre la formation de personnel hautement qualifié, deux outils méritent d'être mentionnés. Le questionnaire COPROD-NAQ, par exemple, pourra être intégré aux programmes de prévention de la perte auditive afin d'optimiser la sélection et l'utilisation des bouchons d'oreilles, en tenant compte du confort et des caractéristiques des travailleurs. De même, l'outil EST 3M™ Eargage « étendu » vise à améliorer le processus du choix des bouchons en fonction de la morphologie des conduits auditifs. Une autre retombée concerne les aspects organisationnels et ergonomiques. Les résultats de l'évaluation du confort et des facteurs individuels et organisationnels qui l'influencent confirment certaines pratiques de prévention existantes, tout en ouvrant de nouvelles pistes pour améliorer la protection

auditive, dont certaines nécessitent des validations scientifiques supplémentaires. Ces recommandations portent notamment sur l'adaptation des bouchons à la morphologie du canal auditif, à la compatibilité avec les autres EPI portés, aux conditions thermiques, aux environnements sonores pour préserver la détection des signaux ainsi qu'à l'organisation du travail. Le rôle des différents acteurs dans la sélection des bouchons les plus adaptés aux travailleurs constitue également une retombée importante. L'identification des caractéristiques physiques et psychosociales de la triade influençant les dimensions physique, acoustique et fonctionnelle du confort des bouchons d'oreille fournit des repères aux manufacturiers pour concevoir des produits plus confortables et aux préventionnistes pour sélectionner les modèles les mieux adaptés. La dimension physique dépend principalement des propriétés du bouchon, relevant des manufacturiers, tandis que les dimensions fonctionnelle et acoustique sont liées aux caractéristiques individuelles, ce qui confère aux milieux de travail un rôle clé dans le choix des dispositifs appropriés. Une hiérarchisation des familles de bouchon selon le confort est également une autre retombée. Il s'avère que les bouchons sur mesure apparaissent comme les plus confortables, tandis que les bouchons prémoulés sont les moins appréciés. À l'avenir, l'intégration d'indices de confort objectivés dans les normes de certification pourrait être envisagée. Enfin, une dernière retombée concerne un conseil pratique : le confort physique des bouchons en mousse à comprimer pourrait être amélioré par de simples gestes lors de leur insertion.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION 1

1. RÉSUMÉS DES ARTICLES 4

1.1 Tâche 0 : Définition du confort des protecteurs et modèle de confort 4

1.1.1 Définition du confort des bouchons d'oreilles 4

1.1.2 Modèle de confort 6

1.2 Tâche 1 : Évaluation subjective du confort sur le terrain et en laboratoire 7

1.2.1 Évaluation du confort sur le terrain 7

1.2.2 Évaluation du confort en laboratoire 17

1.3 Tâche 2 : Détermination des caractéristiques physiques de la triade 19

1.3.1 Caractéristiques physiques de l'environnement 19

1.3.2 Caractéristiques physiques de la personne 20

1.3.3 Caractéristiques physiques des bouchons 24

1.4 Tâche 2 : Détermination des caractéristiques physiques de la phase d'interaction du système oreille-bouchon 24

1.4.1 Géométrie déformée du conduit auditif 28

1.4.2 Caractéristiques physiques mécaniques 29

1.4.3 Atténuation acoustique et effet d'occlusion 42

1.5 Tâche 3 : Étude des caractéristiques de la triade influençant les différentes dimensions du confort 60

1.5.1 Analyses statistiques 60

1.5.2 Caractéristiques de la triade influençant le confort physique 61

1.5.3 Caractéristiques de la triade influençant les dimensions fonctionnelle et acoustique du confort 62

1.5.4 Objectivation de l'effet d'occlusion 63

2. DISCUSSION GÉNÉRALE ET CONCLUSION 65

2.1 Contributions scientifiques (avancement des connaissances) 65

2.1.1 Définition et conceptualisation du confort 65

2.1.2 Évaluation subjective du confort sur le terrain 65

2.1.3 Expérimentations en laboratoire 66

2.1.4 Détermination des caractéristiques physiques de la triade 67

2.1.5 Détermination des caractéristiques physiques de la phase d'interaction pour le système oreille-bouchon 68

2.1.6 Facteurs influençant les différentes dimensions du confort 69

2.2 Retombées technologiques....71
2.3 Retombées pour les milieux de travail....73
2.4 Limites des travaux....75
2.5 Pistes de recherche....77

RÉFÉRENCES....82

ANNEXE A – LIMITATIONS DES TRAVAUX....93

ANNEXE B – PISTES DE RECHERCHE....104

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Bouchons testés lors de la campagne de mesure du confort sur le terrain au Québec 8

Tableau 2 : Classement de la force radiale et de la PMS 36

Tableau 3 : Classement de la force d'extraction et du coefficient de frottement peau/bouchon 40

Tableau 4 : Résumé des informations relatives aux testeurs....46

Tableau 5 : Limites détaillées des travaux....93

Tableau 6 : Pistes de recherche....104

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Modèle de confort des PICB. Acronymes utilisés dans cette figure pour les phases « ajustement/positionnement » (A), « interaction » (I), « effets internes au corps humain » (H) et « perception » (P) ; confort (C), inconfort (D) (initiale D de l'anglais « Discomfort ») ou sensation neutre (N). 6

Figure 2 : Description du processus de reconstruction du conduit auditif (haut) et paramètres clés du conduit auditif (bas). Les lignes pleines épaisses foncées représentent les parois du conduit auditif dans la région d'intérêt pour cette étude. Les lignes pointillées épaisses foncées représentent les régions du conduit auditif ignorées. Les lignes pleines fines foncées représentent les sections transversales de référence du conduit auditif. La ligne pointillée fine foncée représente l'axe curvilinéaire du conduit auditif. Les lignes mixtes fines représentent les diamètres les plus longs et les plus courts de la section transversale d'entrée. 22

Figure 3 : Illustration de la méthode utilisée pour obtenir la géométrie déformée du conduit auditif 29

Figure 4 : Testeurs de confort expérimentaux et virtuels pour déterminer les caractéristiques physiques mécaniques du système couplé bouchon-oreille.....30

Figure 5 : Testeur expérimental « RFT » utilisé pour mesurer la force radiale des bouchons d'oreilles.....31

Figure 6 : Testeurs virtuels pour déterminer la PMS (P0) exercée par un bouchon en mousse à comprimer cylindrique sur les parois d'un conduit auditif. a : rayon nominal du bouchon, r_0 rayon final du bouchon, α, β, μ : paramètres hyperélastiques du bouchon.....33

Figure 7 : Testeur de confort expérimental OPT pour mesurer la PMS locale dans un conduit auditif aux parois rigides de forme cylindrique ou complexe. (a) description du testeur (b) conduit auditif artificiel cylindrique (c) conduit auditif artificiel réaliste (d) sonde optique FISOTM (e) dispositif de compression manuel (Squeeze Buddy™) 37

Figure 8 : Testeur de confort expérimental pour mesurer la distribution spatiale de PMS dans un conduit auditif de forme cylindrique avec peau artificielle instrumentée (a) couche de peau artificielle (b) capteur flexible enroulé autour de la peau artificielle (c) description du testeur 38

Figure 9 : Testeur de confort expérimental pour mesurer la force d'extraction. (a) description du testeur (b) exemple de mesure de force d'extraction pour un bouchon en mousse cylindrique 39

Figure 10 : Principe de mesure du temps d'expansion d'un bouchon en mousse.....42

Figure 11 : Testeurs de confort expérimentaux et virtuels pour déterminer les caractéristiques physiques acoustiques du système couplé bouchon-oreille. La flèche jaune indique qu'à la fois le testeur virtuel et le testeur expérimental associé sont disponibles.....43

LISTE DES ACRONYMES, SIGLES ET ABRÉVIATIONS

Acronyme	Définition
AFC	Analyse factorielle confirmatoire
AFE	Analyse factorielle exploratoire
ATF	Tête ou oreille artificielle - Dispositif de test acoustique (Acoustical Test Fixture en anglais)
CBCT	Imagerie par tomographie volumique à faisceau conique (Cone Beam Computed Tomography en anglais)
CCI	Coefficient de corrélation intraclasse
CÉR	Comité d'éthique de la recherche
CNESST	Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail
COPROD-NAQ	Version québécoise du questionnaire sur le confort des protections auditives (Comfort of hearing Protection Device questionnaire for North America (Quebec), en anglais)
CRSNG	Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada
CT	Imagerie par tomographie volumique (Computed Tomography en anglais)
dB	Décibel
EF	Éléments finis
E	Section droite correspondant à l'entrée du canal auditif (Entrance en anglais)
EO	Effet d'occlusion
EPI	Équipement de protection individuelle
EST	Outil pour mesurer la taille du canal auditif (Earcanal Sizing Tool en anglais)
ETS	École de Technologie Supérieure
FAES	Système d'estimation de l'atténuation sur le terrain (Field Attenuation Estimation System en anglais)
FB	Section droite correspondant au premier coude du canal auditif (First Bend en anglais)
IEC	Commission électrotechnique internationale (International Electrotechnical Commission en anglais)
IL	Perte par insertion (dB)
IR	Ratio isopérimétrique (Isoperimetric Ratio en anglais)

IRM	Imagerie par résonance magnétique
LOC	Confort global latent (Latent Overall Comfort en anglais)
NRR	Indice de réduction du bruit (Noise Reduction Rating en anglais)
OPT	Testeur pour mesurer la PMS locale (Optical Tester en anglais)
PAR	Indice d'atténuation personnel (Personal Attenuation Rating en anglais)
PICB	Protecteur individuel contre le bruit
PMS	Pression mécanique statique
PVC	Polychlorure de vinyle (Polyvinyl Chloride en anglais)
QPU	Questionnaire du profil de l'utilisateur
RFT	Testeur pour mesurer la force radiale (Radial Force Tester en anglais)
SB	Section droite correspondant au second coude du canal auditif (Second Bend en anglais)
SEM	Modélisation par équations structurelles (Structural Equation Modeling en anglais)
SST	Santé et sécurité du travail
TDM	Tomodensitométrie
XS, S, M, L, XL, XXL, XXXL, XXXXL	Tailles disponibles dans l'EST : Extra-petit, petit, moyen, large, extra-large, extra-extra-large, extra-extra-extra-large, extra-extra-extra-extra-large

AVIS AU LECTEUR

Ce rapport présente une synthèse du projet qui s'appuie principalement sur des travaux publiés par l'équipe de recherche dans des revues scientifiques à comité de lecture (Benacchio *et al.*, 2018; Benacchio, Doutres, Varoquaux *et al.,* 2019; Carillo *et al.*, 2020c; Carillo, Doutres *et al*, 2021a, 2021b, 2021c, 2024; Carillo *et al.*, 2022a; Carillo, Sgard, Dazel, *et al.*, 2023; Carillo *et al.*, 2025; Carillo, Sgard, *et al.*, 2021; Dalaq *et al.*, 2023; Doutres *et al.*, 2019;Doutres *et al.,* 2025; Doutres, Sgard, *et al.*, 2022; Doutres, Terroir, *et al.*, 2022; Kersten *et al.*, 2024a; Luan, Sgard, Benacchio, *et al.*, 2019; Melo *et al.*, 2024; Negrini *et al.*, 2025; Poissenot-Arrigoni *et al.*, 2026; Poissenot-Arrigoni, Law, Berbiche, Sgard, *et al.*, 2022; Poissenot-Arrigoni *et al.*, 2025; Poissenot-Arrigoni *et al*., 2023a; Saint-Gaudens *et al.*, 2022; Terroir *et al.*, 2021; Valentin *et al.*, 2024; Xu *et al.*, 2021b). Ces publications sont indiquées en couleur bleue dans la section RÉFÉRENCES pour les différencier clairement des autres. Les auteurs tiennent à souligner que la production scientifique de ce projet est toutefois beaucoup plus large que les articles dans des revues avec comité de pairs. De nombreuses autres publications ont été publiées telles que (i) des comptes rendus de conférence, (ii) des manuscrits de thèses de doctorat et mémoires de maîtrise, (iii) des rapports internes IRSST et (iv) des écrits vulgarisés destinés au grand public. Ces publications non revues par les pairs fournissent des détails non mentionnés dans les articles de revue avec comité de lecture ainsi que des aspects du projet non couverts par ces derniers. A ce titre, elles méritent d'être évoquées afin que les lecteurs intéressés puissent les consulter. Dans la suite du rapport, ces références sont indiquées en notes de bas de page pour les distinguer clairement des publications évaluées par les pairs. A noter que toutes ces références sont accessibles gratuitement sur les dépôts institutionnels de l'IRSST « PhareSST » et de l'ÉTS « EspaceETS ».
Par ailleurs, il est important de préciser que plusieurs des travaux référencés, ayant contribué à l'atteinte des objectifs du projet, ont été réalisés dans le cadre de cinq autres projets « satellites » en relation avec le confort des bouchons d'oreilles et financés, d'une part par l'IRSST (Benacchio, Doutres, *et al.*, 2020; Nélisse *et al.*, 2021) et d'autre part par le CRSNG (Doutres, 2016, 2023; Sgard, 2016) pour les travaux à caractère plus fondamental. Afin d'identifier clairement les publications issues de ces projets, les symboles suivants sont utilisés à la fin des références correspondantes: #1 pour (Benacchio *et al.* 2020), #2 pour (Nélisse *et al*., 2021), #3 pour (Doutres, 2016), #4 pour (Doutres, 2023) et #5 (Sgard, 2016).

INTRODUCTION

Nos travaux de recherche ont été réalisés dans le contexte de la protection auditive des travailleurs qui sont exposés au bruit dans leurs milieux de travail. L'*Enquête québécoise sur la santé de la population* (EQSP 2020-2021) montre que 4,4 % des québécois de 15 ans et plus sont atteints d'une surdité professionnelle (Camirand *et al.*, 2023), une condition qui engendre des coûts humains et financiers considérables. Malgré la législation encadrant la réglementation en matière de santé et de sécurité au travail (*Règlement sur la santé et la sécurité du travail*, RLRQ, c. S-2.1, r. 13 [RSST]), qui oblige l'employeur à mettre en place des mesures pour protéger les travailleurs contre l'exposition au bruit, la surdité professionnelle demeure la maladie professionnelle la plus fréquemment déclarée au Québec. Elle représente également le coût le plus élevé pour l'État québécois, et ces chiffres continuent d'augmenter d'année en année (Busque *et al.*, 2022; Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail [CNESST], 2020, 2025). Cela souligne l'importance de poursuivre les efforts afin de répondre aux obligations légales en matière de prévention des atteintes à la santé liées à l'exposition au bruit (CNESST, 2025). Afin de garantir la protection auditive des travailleurs exposés quotidiennement à des niveaux de bruit dangereux, diverses options peuvent être envisagées. Ces options comprennent la réduction des émissions sonores à la source, la mise en place de moyens de protection collective, des mesures administratives et le recours à des protecteurs individuels contre le bruit (PICB) dans le cas où les options précédentes ne peuvent être choisies. Bien que les deux premières options soient préférables, elles peuvent s'avérer longues et complexes à mettre en œuvre ou simplement ne pas être adaptées comme c'est le cas pour certains secteurs industriels, tels que les mines, la construction, la sécurité publique. Par conséquent, l'utilisation de PICB, tels que des serre-têtes ou des bouchons d'oreilles, qui est souvent recommandée à titre temporaire, demeure le seul moyen d'assurer une protection du travailleur.

Cependant, les utilisateurs perçoivent souvent les PICB comme une source d'inconfort plutôt que comme un moyen de protection. Par conséquent, il est fréquent de constater une utilisation limitée ou incorrecte des PICB. Plusieurs raisons sont avancées pour expliquer ce phénomène, notamment une méconnaissance des risques pour la santé auditive et des interactions avec d'autres équipements de protection individuelle (EPI). Toutefois, l'inconfort des PICB est identifié comme l'une des causes principales de cette utilisation inefficace. En effet, des observations ont montré que le niveau de confort influe sur la durée de port, la qualité du positionnement du PICB, l'exposition au bruit et, en fin de compte, les risques pour l'audition des personnes exposées. Ainsi, un protecteur perçu comme inconfortable n'est pas porté correctement, est mal positionné ou est utilisé de manière intermittente, alors qu'une protection efficace exige un port adéquat et continu. Notons que le PICB peut être également une source de confort et encourager un port adéquat et consistant, par exemple en favorisant le sentiment de se sentir protégé du bruit, en améliorant la communication dans le bruit ou en impactant positivement la

concentration, la productivité et l'exécution des tâches. Le confort n'est donc pas seulement l'absence d'inconfort. Néanmoins, par souci de simplicité, nous utiliserons dans la suite le terme « confort » pour désigner les deux facettes, négative (inconfort) et positive (confort) du concept.

Actuellement, le choix d'un protecteur se base principalement sur des considérations liées à l'environnement de travail, telles que la chaleur, l'hygiène, et la compatibilité avec d'autres EPI. L'accent est ensuite mis sur l'atténuation des niveaux sonores, avec la croyance fréquente que plus l'atténuation est élevée, meilleure est la protection. Cependant, le confort de l'utilisateur est rarement pris en compte dans les critères de sélection. Lorsqu'il est pris en compte, il est généralement abordé de manière qualitative, sans recours à des outils d'évaluation scientifiquement validés. Par conséquent, les PICB sont principalement évalués en fonction de leur capacité à réduire le bruit, quantifiée par l'atténuation acoustique, mesurée en laboratoire par des organismes certifiés. Cependant, cet indicateur seul est insuffisant pour évaluer la performance globale des PICB, qui devrait inclure à la fois l'atténuation et le confort.

Le jugement de confort découle des interactions complexes entre la personne[1], son environnement de travail et son PICB (ici, les bouchons d'oreilles), formant ainsi le concept de triade, où chacune des trois composantes est définie par des caractéristiques à la fois physiques et psychosociales. Ce projet visait à améliorer notre compréhension du confort de PICB de type bouchons d'oreilles passifs en identifiant les caractéristiques de la triade exerçant une influence significative sur les principaux attributs du confort.

Le projet était composé de plusieurs tâches séquentielles et complémentaires. Une tâche préliminaire au projet (tâche 0) traitait de la question du confort des bouchons en débutant par une revue de la littérature, suivie de la proposition d'une définition multidimensionnelle de ce concept. Un modèle holistique du confort des PICB a ensuite été proposé afin d'établir un cadre théorique pour l'étude du confort de tels équipements de protection. Dans la première tâche du projet, le confort des bouchons a été mesuré sur des participants, à la fois sur le terrain (tâche 1.1) et en laboratoire (tâche 1.2).
Les caractéristiques psychosociales de la triade ont été évaluées au moyen de questionnaires dans les deux tâches tandis que les caractéristiques physiques ont été mesurées en laboratoire à l'aide de dispositifs expérimentaux et modèles numériques respectivement appelés par abus de langage, « testeurs de confort » expérimentaux et virtuels. Des analyses statistiques ont permis d'établir des indices de confort pour les différentes dimensions, en s'appuyant sur des niveaux de confort associés aux attributs pertinents de chacune d'elles. Un indice de confort global intégrant à la fois ces indices dans chaque dimension et des caractéristiques de la triade a également été proposé.
La tâche 2 avait pour objectif le développement de ces testeurs de confort permettant de mesurer ou simuler certaines caractéristiques physiques des bouchons et de l'utilisateur.

[1] Dans le rapport, les termes « personne » et « utilisateur » seront employés de manière interchangeable.

Dans la tâche 3, des analyses statistiques ont été effectuées afin d'identifier les principales caractéristiques physiques et psychosociales de la triade qui influencent les attributs des différentes dimensions du confort en vue d'établir, dans le futur, des indices de confort objectivés à caractère prédictif.

1. RÉSUMÉS DES ARTICLES

1.1 Tâche 0 : Définition du confort des protecteurs et modèle de confort

Cette section s'appuie principalement sur trois publications (Doutres *et al.*, 2019; Doutres, Sgard, *et al.*, 2022; Doutres, Terroir, *et al.*, 2022). Deux d'entre elles sont des revues de littérature consacrées au confort des PICB, en particulier des bouchons d'oreilles (Doutres *et al.*, 2019; Doutres, Sgard, *et al.,* 2022)[2], et sont synthétisées dans la section 1.1.1. La section 1.1.2 présente ensuite, de manière succincte, le modèle de confort des PICB, proposé par (Doutres, Terroir, *et al.*, 2022). Ce modèle met en lumière les caractéristiques de la triade « environnement / personne / PICB », qui peuvent influencer le confort ressenti.

1.1.1 Définition du confort des bouchons d'oreilles

Le mot confort, dans le contexte de l'utilisation de protecteurs auditifs, est généralement employé pour désigner les perceptions subjectives liées au contact mécanique entre le protecteur auditif et le corps. Même si ce concept est partagé par les utilisateurs, il semble simpliste et ambigu, car d'autres aspects (par exemple, acoustiques, fonctionnels et psychologiques) jouent un rôle dans la perception globale du confort et affectent la bonne utilisation des PICB (i.e. bien portés et pendant toute la durée d'exposition au bruit).

À la lumière des observations tirées de la revue de la littérature (Doutres *et al.*, 2019), l'équipe de recherche a proposé un concept multidimensionnel du confort des PICB basé sur quatre dimensions, et défini comme suit : « un équilibre entre les facteurs physiques, fonctionnels, acoustiques et psychologiques qui caractérisent la relation entre l'usager et le protecteur auditif lors de la réalisation de son activité de travail, et ce dans un contexte d'utilisation spécifique (ici, un environnement de travail donné) ».

Vue à travers le prisme de ce concept holistique, la revue de littérature (Doutres *et al.*, 2019) a permis d'identifier les principaux attributs de confort des bouchons d'oreilles pour les quatre dimensions du confort:

- **Physique** : perception de l'utilisateur des interactions biomécaniques (p. ex., douleur, sensation de pression mécanique, irritation) et thermiques (p. ex., oreille chaude, perception de la capacité du PICB à évacuer la chaleur).
- **Fonctionnelle** : acceptabilité pratique des PICBs et se réfère à l'utilisabilité, l'efficacité et l'utilité du PICB ;
- **Acoustique** : modification de la perception des bruits externes (p. ex., machineries) et internes (p. ex., bruits physiologiques, sa propre voix) ;

[2] Voir aussi (Doutres *et al.*, 2018; Doutres *et al.*, 2017; Doutres *et al.,* 2020; Terroir, 2019; Terroir *et al.*, 2017; Terroir et Wild, 2019)

- **Psychologique** : bien-être de l'utilisateur et satisfaction envers certaines caractéristiques des PICB. Le bien-être est évalué à travers la confiance, l'habituation et le sentiment de protection ressentis par l'utilisateur lors de l'utilisation des bouchons. De manière générale, il comprend les affects ressentis par l'utilisateur et les aspects relationnels de ce dernier avec son entourage au travail lors de l'utilisation des bouchons. Les attributs de cette dimension de confort sont rarement présents dans la littérature liée au confort des PICB. Seules quelques études mentionnent leur importance (Brown-Rothwell, 1986; Doutres *et al.*, 2019) et montrent même que ces attributs peuvent permettre de différencier de manière significative différents modèles de bouchons d'oreilles.

La revue de la littérature (Doutres *et al.*, 2019) a montré que des différences quantifiables sont observées dans le confort induit par le port des bouchons d'oreilles. Cependant, en raison de la nature subjective du confort, une grande variété de concepts de confort et de méthodes de mesure a été utilisée par le passé. Il est donc difficile (i) de comparer les résultats de l'évaluation du confort disponibles dans la littérature et (ii) de classer les attributs de confort dans un ordre d'importance quelconque.

Une seconde revue de la littérature axée sur l'analyse des principales caractéristiques affectant l'évaluation du confort des protecteurs auditifs (par exemple, le concept de confort, les caractéristiques de l'environnement de mesure et des participants) a ensuite été réalisée (Doutres, Sgard, *et al.*, 2022). Une meilleure compréhension de ces caractéristiques est nécessaire afin d'améliorer les méthodes de mesure, l'analyse des données et, en fin de compte, la conception de protecteurs auditifs plus confortables adaptés au porteur et à son environnement de travail. Cette seconde revue de littérature a permis de mettre en évidence plusieurs sources de variabilité des mesures de confort. Certaines sont liées à la diversité des concepts du confort proposés par les chercheurs et à la possible divergence entre ces concepts et ceux des participants. D'autres sources de variabilité peuvent être attribuées aux multiples caractéristiques de la triade environnement/personne/bouchons d'oreilles, qui varient d'une étude à l'autre. Au final, la revue de la littérature (Doutres, Sgard, *et al.*, 2022) a permis de dégager les recommandations suivantes pour améliorer la compréhension du confort perçu des protecteurs auditifs et de réduire la variabilité des mesures de confort: (a) utiliser le concept multidimensionnel du confort proposé dans Doutres, Sgard, *et al.* (2022) et calculer un indice de confort pour chaque dimension (c'est-à-dire physique, acoustique, fonctionnelle et psychologique) ainsi qu'un indice global ; (b) utiliser des questionnaires exhaustifs et valides pour appréhender la complexité de ce concept multidimensionnel ; (c) quantifier autant de caractéristiques de la triade que possible et les utiliser comme variables indépendantes ou de contrôle pour identifier les plus significatives ; (d) évaluer la qualité de l'ajustement des bouchons d'oreilles et l'efficacité de l'atténuation, même dans le cadre d'études sur le terrain.

1.1.2 Modèle de confort

Un modèle multidimensionnel de confort des PICB (Doutres *et al.*, 2022) a été proposé dans le projet et visait à : (i) identifier les facteurs qui influencent le confort et leurs interactions, ou expliquer le processus de jugement de confort; (ii) identifier les méthodes et les outils de mesure pour évaluer le confort de manière objective et subjective ; et (iii) informer, orienter et améliorer les pratiques de recherche. Le modèle proposé est représenté à la Figure 1 et s'inspire de modèles initialement conçus pour les vêtements (Branson et Sweeney, 1991) et pour les produits en général (Vink et Hallbeck, 2012). Les éléments du modèle sont classés en utilisant le concept de triade Environnement / Personne / PICB décrivant ainsi le contexte d'utilisation, l'utilisateur et le PICB.

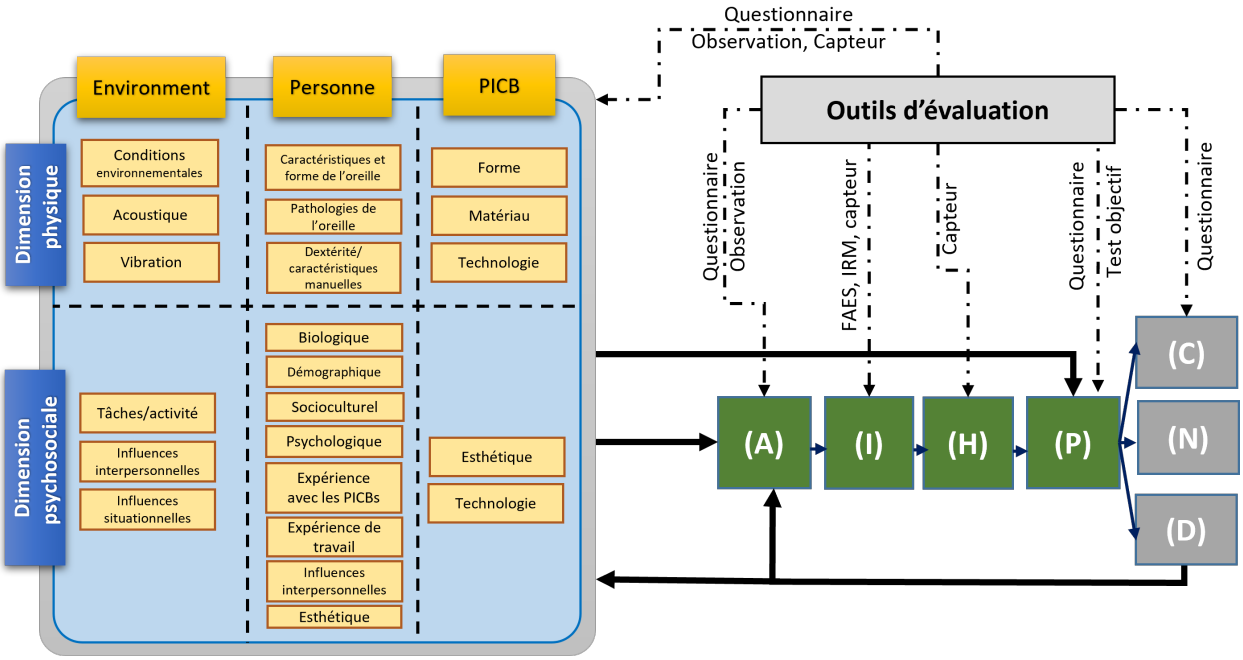


Figure 1 : Modèle de confort des PICB. Acronymes utilisés dans cette figure pour les phases « ajustement/positionnement » (A), « interaction » (I), « effets internes au corps humain » (H) et « perception » (P) ; confort (C), inconfort (D) (initiale D de l'anglais « Discomfort ») ou sensation neutre (N).

Le modèle de confort dédié aux PICB a d'abord été élaboré afin de tenir compte des mécanismes complexes à l'origine des « obstacles » et des avantages qui ont déjà été identifiés comme des prédicteurs majeurs des comportements liés à l'utilisation des protecteurs auditifs. Ces mécanismes complexes, liés au confort, impliquent successivement (i) l'ajustement/positionnement du protecteur auditif (phase [A]), (ii) les interactions entre le protecteur auditif et l'oreille externe (phase [I]), (iii) les effets internes résultant de ces interactions (par exemple, déformation des tissus, compression des nerfs) (phase [H]), (iv) la perception de ces derniers effets (phase [P]), et (v) les

jugements d'(in)confort (phases [C] pour « confort », [D] pour « inconfort » ou [N] pour « sensation neutre »).

1.2 Tâche 1 : Évaluation subjective du confort sur le terrain et en laboratoire

Une collaboration internationale a été initiée en 2017 pour aborder la question du confort des bouchons d'oreilles grâce à une approche globale novatrice. Cette collaboration a impliqué, au Québec, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST), l'École de technologie supérieure (ÉTS), l'Université de Sherbrooke et l'Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR), ainsi que l'Institut national de la recherche scientifique (INRS) en France, l'Université de Sheffield au Royaume-Uni et un comité de manufacturiers de bouchons.

1.2.1 Évaluation du confort sur le terrain

La revue de littérature et la définition du confort multidimensionnel présentées précédemment ont permis de concevoir le questionnaire COPROD (COnfort des PROtections auDitives) par les équipes québécoises et françaises pour recueillir les ressentis des participants dans des conditions réelles d'utilisation. Une première publication (non présentée dans ce rapport, car issue principalement du travail des collègues de l'INRS) propose une version du questionnaire ainsi que les étapes successives de validation en France (Terroir, Perrin, Wild, *et al.*, 2021)[3].

La suite de cette section est consacrée à la synthèse d'un deuxième article (Negrini *et al.*, 2025) qui présente la version québécoise du questionnaire, détaille son processus de validation et analyse les données de confort recueillies sur le terrain. Cette étude compare également le confort de quatre familles de bouchons d'oreilles : en mousse à comprimer, prémoulés, en mousse prémoulée à tige et sur mesure.

Cette étude a obtenu l'approbation éthique du Comité d'éthique de la recherche (CÉR) de l'École de technologie supérieure (ÉTS) (numéro de référence : H20171101).

Bouchons testés

Neuf modèles de bouchons d'oreilles provenant de différents fabricants, représentant les types les plus couramment utilisés en Amérique du Nord, ont été testés sur le terrain. Parmi ceux-ci, sept ont été classés comme « jetables et réutilisables », tandis que les deux autres sont des bouchons d'oreilles sur mesure (voir Tableau 1).

[3] Voir aussi Coupal *et al.*, 2022; Martin *et al.*, 2019; Negrini *et al.*, 2021; Terroir, 2019, 2022a, 2022b; Terroir, Perrin et Wild, 2021; Terroir *et al.*, 2022; Terroir et Wild, 2019.

Tableau 1 : Bouchons testés lors de la campagne de mesure du confort sur le terrain au Québec

Famille	Modèle	Modèle de bouchon sonde	NRR et critère de réussite (CR) sur le PAR_{80}
Mousse à comprimer	3M™ – EAR classic Taille : régulière et petite	3M™ – Ear classic (probed test) Taille : régulière et petite	NRR=29 dB CR : **14,5 dB**
	3M™ – 1100	3M™ – 1100 (probed test)	NRR=29 dB CR : **14,5 dB**
	Honeywell™ – Howard Leight Max Taille : régulière et petite	3M™ – EZFit (probed test) Taille : régulière et petite	NRR=33 dB CR : **16,5 dB**
Mousse prémoulée à tige	3M™ – Push-ins	3M™ – Push-ins (probed test)	NRR=28 dB CR : **14 dB**

	 3M™ – SofTouch	 3M™ – Grip rings (probed test)	NRR = 31 dB CR : **15,5 dB**
	 Honeywell™ – TrustFit	 3M™ – Push-ins (probed test)	NRR=28 dB CR : **14 dB**
Prémoulé (de référence)	 3M™ – Ultrafit	 3M™ – Ultrafit (probed test)	NRR=25 dB CR : **12,5 dB**
Sur mesure	 Laboratoire auditif Laviolette	Aucun test d'ajustement	NRR≤ 30 dB CR : Vérification visuelle et tactile de la mise en place
	 Custom Protect Ear	Aucun test d'ajustement	NRR=26 dB CR : Vérification visuelle et tactile de la mise en place

Protocole de test

Un total de N=173 personnes (27 femmes, 146 hommes) travaillant dans trois entreprises différentes au Québec, dont deux dans le secteur de la fabrication et la troisième dans celui de l'agroalimentaire, ont participé à l'étude de terrain.

Pour chaque participant, l'étude terrain s'est étalée sur huit semaines. Au cours de la Semaine 0, l'équipe de recherche a présenté le projet et mené des entretiens d'éligibilité avec les travailleurs des entreprises intéressés à participer. Les critères d'inclusion étaient les suivants : être âgé de 18 ans ou plus, avoir une bonne compréhension du français, et être sensibilisé au concept de protection auditive. Les critères d'exclusion comprenaient :

utiliser une double protection auditive la majorité du temps de travail, avoir des antécédents de chirurgie ou de pathologies de l'oreille, de troubles neurologiques, avoir vécu un épisode de vertiges ou d'étourdissements, avoir suivi un traitement médicamenteux pouvant affecter l'excitabilité neuronale au cours de la dernière année, avoir déjà reçu une chimiothérapie, présenter une quantité excessive de cérumen dans les conduits auditifs ou une surdité importante unilatérale ou bilatérale connue (sur tout le spectre fréquentiel). Ce dernier critère était aussi vérifié par un examen visuel du conduit auditif et du tympan (otoscopie) du travailleur, réalisé par l'audiologiste. Après l'otoscopie, l'audiologiste mesurait la taille de l'entrée des conduits auditifs du travailleur et effectuait des dépistages auditifs à l'aide d'un audiomètre (voir section 2.3.1).

Si le travailleur était éligible et souhaitait toujours participer au projet de recherche, les membres de l'équipe de recherche sur place lui attribuaient un numéro de participant (code alphanumérique) pour assurer l'anonymat de ses réponses aux questionnaires. La passation du Questionnaire du profil de l'utilisateur (QPU) pouvait alors être démarrer. Une fois le QPU rempli, un fabricant de bouchons d'oreilles sur mesure moulait les canaux auditifs des participants afin de recueillir des données morphologiques.

Enfin, une courte rencontre de formation en groupe était offerte par les membres de l'équipe de recherche. La formation permettait la diffusion de plusieurs visuels et informations les bouchons d'oreille à tester, notamment une vidéo produite par l'INRS (partenaire du projet de recherche) (p.ex. INRS, 2013) et les fiches d'utilisation et de port des différents fournisseurs de bouchons. Un atelier pratique permettait aux participants de s'exercer à rouler les bouchons en mousse à comprimer et à les insérer dans un gabarit illustrant le diamètre idéal avant insertion. La vidéo, les fiches d'informations et l'atelier restaient accessibles aux participants durant toute la période de test, sur demande.

Au cours des sept semaines suivantes (Semaines 1 à 7), les participants ont testé un bouchon d'oreille de chaque famille : mousse à comprimer, prémoulé, mousse prémoulée à tige et sur mesure. Pour les bouchons d'oreilles en mousse à comprimer et en mousse prémoulée à tige, les participants portaient le même modèle pendant une semaine, puis l'utilisaient de nouveau deux semaines plus tard. Plusieurs paires étaient fournies[4], afin qu'ils puissent remplacer leurs bouchons au besoin, en fonction de leur environnement de travail et de l'usure liée à leur utilisation au cours de la semaine. Les bouchons sur mesure étaient portés consécutivement lors des deux dernières semaines car ils demandent un temps d'adaptation plus long. Le bouchon d'oreille prémoulé n'a jamais été testé deux fois par le même participant. Contrairement aux autres bouchons d'oreilles, tous les participants ont évalué le bouchon prémoulé (bouchon de référence).
Une semaine de test typique comprenait une formation individuelle sur l'insertion et l'utilisation du bouchon d'oreille, dispensée par une audiologiste. Le système d'estimation

[4] Le nombre de paires de bouchons données aux participants variait selon le modèle testé : p.ex., un modèle jetable nécessitait un remplacement après chaque utilisation, un modèle réutilisable pouvait être porté pendant une semaine, tandis qu'aucun remplacement n'était requis pour les bouchons moulés sur mesure.

de l'atténuation sur le terrain 3M™ EARfit™ Dual-Ear Validation System (« fit test » en anglais), a été utilisé pour la formation, conformément à la norme CSA Z94.2 (Groupe CSA, 2014). Pour les modèles de bouchons d'oreilles incompatibles avec ce système, un modèle de remplacement similaire en forme et matériau était choisi (voir colonne « modèle de bouchon sonde » du Tableau 1). Après la formation individuelle, si le bouchon d'oreille offrait une atténuation adéquate pour le participant (voir colonne « NRR et critère de réussite pour le PAR84 » du Tableau 1), la semaine de test commençait. Sinon, un autre bouchon était sélectionné au hasard pour la semaine de test, de préférence dans la même famille. À la fin de la semaine, les participants remplissaient le Questionnaire sur le confort des dispositifs de protection auditive - Amérique du Nord (COPROD-NAQ) pour exprimer leur opinion sur les quatre dimensions du confort des bouchons d'oreilles : physique, fonctionnelle, acoustique et psychologique. Chaque dimension était évaluée à l'aide d'un ou deux éléments généraux, ainsi que de plusieurs éléments explicatifs pour mesurer les niveaux spécifiques de confort et faciliter l'interprétation des éléments généraux[5].

Pour les quatre dimensions du confort, des exemples d'attributs étudiés étaient :

- physique : pression et irritation ressenties dans l'oreille;
- fonctionnelle : maintien en position, facilité d'utilisation, d'insertion et retrait;
- acoustique : capacité à entendre les sons utiles, gêne par les bruits physiologiques et sa propre voix associée à l'effet d'occlusion[6];
- psychologique : sentiment de protection, d'isolement, de confiance.

Tant le QPU que le COPROD-NAQ ont été adaptés pour étudier ultérieurement le confort en laboratoire dans la tâche 1.2 ainsi que dans la tâche 1.3.

Caractéristiques psychosociales des composantes de la triade

[5] À noter que seuls les questionnaires « Profil utilisateur », « Fin de la semaine de test » et « Votre bouchon idéal » ont été exploités dans le cadre de cette étude. Bien que des données supplémentaires aient été recueillies à l'aide du questionnaire journalier « Journal de bord », celles-ci n'ont pas été analysées. En effet, une étude pilote menée par les collègues de l'INRS a révélé que ces données n'apportaient pas d'informations nouvelles, les scores obtenus étant fortement corrélés à ceux du questionnaire « Fin de la semaine de test ». Ces données complémentaires pourront toutefois faire l'objet d'analyses ultérieures, si nécessaire.

[6] Le terme "effet d'occlusion" (EO) est couramment utilisé pour décrire la perception accrue des sons qui se transmettent par voie tissulaire (peau, cartilage, os), en particulier aux basses fréquences, lorsque l'entrée du canal auditif est obstruée par un protecteur auditif ou une prothèse auditive. Cet effet est souvent décrit comme une perception amplifiée et déformée des bruits physiologiques, tels que notre propre voix, pouvant être perçue comme plus grave et caverneuse. Cette perception résulte à la fois de l'augmentation de la transmission par conduction osseuse, généralement aux fréquences graves en dessous de 1 kHz, et de la diminution de la transmission par conduction aérienne due à la présence du dispositif d'occlusion. L'EO perçu (noté EO_{perc}) (phase « P » sur la **Figure 1**), peut être évalué via des tests audiométriques ou des questionnaires. Cette perception est généralement évaluée comme de l'inconfort par les participants (phase « D » sur la **Figure 1**), conduisant à un EO ressenti ou vécu (noté EO_{ress}), lui aussi pouvant être évalué via des questionnaires. L'EO peut être mesuré objectivement (noté EO_{obj}), en effectuant la différence de niveau sonore en oreille ouverte et occluse par le protecteur pour une stimulation par conduction tissulaire induite par les bruits physiologiques ou un ossivibrateur. Il est important de bien faire la distinction entre ces différents concepts d'EO (Saint-Gaudens *et al.*, 2022; Carillo *et al.*, 2025).

De nombreuses caractéristiques physiques et psychosociales de la triade Personne / Environnement / Bouchon d'oreille, potentiellement pertinentes pour le confort des bouchons d'oreilles (voir bloc de gauche de la Figure 1) ont été évaluées sur le terrain à l'aide du QPU. Cette section décrit brièvement toutes les caractéristiques psychosociales. Les caractéristiques physiques de la triade considérées dans cette étude ainsi que leur détermination font l'objet de la section 1.3.

Personne

Les informations synthétisées dans la Figure 1 ont été recueillies pour chaque participant.

Les données collectées ne se limitaient pas seulement aux caractéristiques sociodémographiques. Elles incluaient également les expériences antérieures des travailleurs avec les bouchons d'oreilles, notamment les années de port de bouchons d'oreilles au travail et la famille habituellement portée. Une variable dichotomique (oui/non) a été créée. La valeur « oui » était attribuée si le participant avait testé un bouchon d'oreille classé dans une famille qu'il avait l'habitude de porter alors que la valeur « non » indiquait qu'il n'avait jamais porté de bouchon d'oreille de cette famille auparavant.

En plus des informations précédentes, les participants ont également fourni des détails sur la durée pendant laquelle ils portaient généralement leurs bouchons d'oreilles au cours de leur quart de travail, en choisissant parmi les options : quelques minutes, quelques heures ou toute la journée. De plus, leur confiance dans l'efficacité des bouchons d'oreilles a été évaluée en leur demandant de donner leur avis sur l'affirmation « En général », le port de bouchons d'oreilles aide à prévenir les problèmes auditifs, en utilisant une échelle de Likert à 5 points, variant de 1 (tout à fait en désaccord) à 5 (tout à fait d'accord).

Environnement

Les caractéristiques psychosociales mesurées pour l'environnement sont liées aux catégories Tâches / activité et Influences situationnelles telles que définies dans (Doutres, Terroir, *et al.*, 2022) (voir Figure 1). Dans la catégorie Tâches / activité, les participants ont été interrogés sur leurs heures de travail hebdomadaires, et une variable continue a été créée pour représenter la durée du travail. De plus, chaque personne au travail a estimé son temps d'exposition au bruit sur une semaine, ce qui a conduit à la création de deux variables associées : une première représentant les heures d'exposition au bruit par jour, et une seconde représentant le pourcentage de temps exposé au bruit par semaine. Par ailleurs, les participants ont fourni des informations sur leurs horaires de travail (semaine, fin de semaine, ou les deux ainsi que jour, soir et/ou nuit). Trois variables dichotomiques ont été utilisées pour déterminer si les travailleurs devaient parler, bouger

la tête, ou se pencher pour effectuer leurs tâches. Les participants ont également été questionnés sur toute interférence éventuelle d'équipement de protection supplémentaire avec leurs bouchons d'oreilles, ainsi que sur le fait de travailler en équipe.

Dans la catégorie Influences situationnelles de l'environnement de travail, les participants ont été invités à évaluer leur perception du bruit dans leur environnement de travail sur une échelle de Likert à 5 points, allant de 1 (calme) à 5 (très bruyant). De plus, il leur a été demandé s'ils avaient la possibilité de changer de département ou d'équipe au sein de l'entreprise.

Bouchons d'oreilles

Dans ce projet, seules les caractéristiques physiques des bouchons d'oreilles ont été prises en compte. Les caractéristiques psychosociales telles que l'attrait ou le design esthétique n'ont pas été mesurées dans le QPU.

Validation du questionnaire COPROD-NAQ

Le questionnaire COPROD-NAQ a été développé et validé selon une approche systématique rigoureuse, à l'aide de diverses méthodes statistiques et psychométriques, confirmant ainsi sa validité et sa fiabilité pour mesurer le confort des bouchons d'oreilles au travail (Negrini *et al.*, 2025)[7]. Cette approche comprenait plusieurs étapes séquentielles :

- **Développement du questionnaire** :
    - Une équipe multidisciplinaire a examiné la littérature sur la définition et la mesure du confort des protecteurs auditifs (Doutres *et al.*, 2019; Doutres, Sgard *et al.,* 2020a).
    - Si disponibles et pertinents, les items des questionnaires existants sur le confort ont été adaptés et intégrés dans le COPROD-NAQ.
    - Des traductions et adaptations transculturelles ont été effectuées.
    - De nouveaux items ont été ajoutés pour couvrir toutes les dimensions et attributs du confort.
    - La première version du questionnaire (v1.0) comprenait 69 items.
- **Validation du contenu** :
    - La clarté des items et leur cohérence avec la définition du concept mesuré ont été vérifiées.
    - Les items ont été répartis en quatre catégories conceptuelles : confort physique, fonctionnel, acoustique et psychologique.

[7] Voir aussi Coupal *et al.*, 2022; Negrini *et al.*, 2021.

- Une échelle de Likert à 5 points a été utilisée pour la plupart des réponses.
- Des experts canadiens ont évalué la validité du contenu et les propriétés pratiques du questionnaire.
- La version 2.0, comprenant 61 items, 15 items descriptifs, cinq questions ouvertes et un item final sur le confort général, a été approuvée par le Comité d'éthique de la recherche de l'ÉTS.

- **Propriétés psychométriques et analyses des données** :
  - **Validité de construit** :
    - Des analyses factorielles exploratoires (AFE) ont été réalisées pour vérifier la présence de dimensions conceptuelles et réduire le nombre d'items.
    - Des analyses factorielles confirmatoires (AFC) ont été effectuées pour vérifier si les solutions factorielles correspondaient aux données.
    - Un modèle d'équation structurelle (SEM) a été utilisé pour tester si les données correspondent à la structure du questionnaire hypothétisée.
    - La version finale (v3.0) du COPROD-NAQ est composée de 51 items répartis sur 11 sous-dimensions conceptuelles :
      - ✓ Confort physique : « inconfort physique » et « sentiment de protection contre le bruit ».
      - ✓ Confort fonctionnel : « impact sur le travail », « retrait du bouchon » et « insertion du bouchon ».
      - ✓ Confort acoustique : « bruits externes », « bruit internes »,
      - ✓ Confort psychologique : « satisfaction », « émotions », « immersion » et « confiance/habituation ».

  - **Cohérence interne** :
    - Le coefficient alpha de Cronbach a été calculé pour chaque dimension afin de valider la capacité de chaque ensemble d'items à mesurer un concept. Les valeurs d'alpha de Cronbach entre 0.70 et 0.95 ont été considérées comme ayant une cohérence interne acceptable.
  - **Fiabilité test-retest** :
    - Les coefficients de corrélation intra-classe (CCI) ont été calculés pour évaluer la stabilité du questionnaire sur un intervalle d'une semaine.
  - **Validité prédictive** :
    - Une analyse de régression multivariable a été utilisée pour évaluer la capacité du questionnaire à prédire le confort global. Les variables du modèle final ont été sélectionnées en suivant la littérature existante.

- **Validité divergente** :
  - Une analyse de régression linéaire multivariée a été réalisée pour comparer les quatre familles de bouchons d'oreilles sur des indices de confort.

- **Résultats des analyses** :
  - Les AFE ont révélé des valeurs propres allant de 1,10 à 9,36, faisant émerger 52 questions réparties sur 11 sous-dimensions conceptuelles.
  - Les AFC ont confirmé la structure du questionnaire, et la version finale contient 51 items répartis en 11 sous-dimensions conceptuelles.
  - Les indices d'ajustement du modèle étaient satisfaisants pour la plupart des sous-dimensions.
  - Les CCI ont montré que les 11 sous-dimensions étaient stables sur une période d'une semaine.
  - Des indices de confort pour les quatre dimensions du confort ont été définis et expriment le confort ressenti dans une dimension donnée en fonction des niveaux de confort spécifiques. Autrement dit, les scores des réponses obtenues aux questions relatives aux attributs des sous-dimensions, identifiées via les analyses statistiques, décrivent effectivement la dimension concernée.
  - Un modèle de confort global latent, décrit par un indice de confort global latent (LOC), a été établi à partir des indices de confort de chacune des quatre dimensions ainsi que des caractéristiques de la triade « environnement/personne/bouchon d'oreille ». Ce modèle, fondé sur des analyses statistiques, a été validé.
    - Les contributions les plus significatives proviennent des dimensions psychologiques et fonctionnelles.
    - Les caractéristiques de la triade « environnement/personne/bouchon d'oreille » influençant le LOC sont les suivantes:
      - ✓ Environnement de travail – caractéristiques psychosociales
        - ➢ L'absence d'interférence des bouchons avec d'autres EPI, le travail en semaine avec un horaire de jour, et la possibilité de changer de poste ou de département sont associés à un meilleur confort des bouchons d'oreilles.
      - ✓ Environnement de travail – caractéristiques physiques
        - ➢ Travailler dans un environnement froid est associé à une diminution du confort des bouchons d'oreilles.
      - ✓ Personne - caractéristiques psychosociales
        - ➢ Être droitier augmente le confort général des bouchons d'oreilles et être âgé de 44 ans ou moins diminue le confort.

- ✓ Bouchon – caractéristiques physiques
  - ➢ L'un des modèles de bouchon d'oreille sur mesure contribue positivement au confort par rapport aux autres modèles testés.

- Les familles de bouchons ont été comparées et les observations suivantes ressortent :
  - Confort global
    - ✓ Les bouchons sur mesure sont perçus comme significativement plus confortables que les autres familles pour six sous-dimensions du confort.
  - Confort physique
    - ✓ Concernant la dimension physique, les bouchons sur mesure induisent moins d'inconfort que les autres modèles.
  - Confort fonctionnel :
    - ✓ Les bouchons sur mesure sont jugés plus efficaces et utiles pour la protection contre le bruit.
    - ✓ Les bouchons sur mesure favorisent une meilleure concentration, une qualité de travail accrue et une meilleure productivité.
    - ✓ L'insertion des bouchons sur mesure est également plus aisée. Par ailleurs, les bouchons en mousse à comprimer sont perçus comme plus confortables que les bouchons en mousse prémoulée à tige et les bouchons prémoulés pour la protection contre le bruit et l'impact sur le travail.

  - Confort acoustique
    - ✓ Les bouchons sur mesure présentent l'avantage d'induire moins de difficultés pour entendre les sons utiles, tandis qu'aucune différence n'est constatée entre les familles concernant les inconforts liés au bruit interne.
  - Confort psychologique :
    - ✓ Les travailleurs sont plus satisfaits des bouchons sur mesure par rapport aux autres familles testées.
    - ✓ Les bouchons en mousse à comprimer sont également jugés plus confortables que les bouchons en mousse prémoulée à tige et les bouchons prémoulés sur cette dimension.
    - ✓ Pour les aspects d'immersion et de confiance/habituation, les bouchons en mousse prémoulée à tige semblent être préférés.

- ✓ Aucune différence n'a été observée entre les familles concernant les émotions ressenties.

Le COPROD-NAQ est simple d'utilisation, pouvant être auto-administré ou administré par un tiers, sans nécessiter de formation. La version validée du questionnaire, composée de 51 items, se complète en environ 20 minutes. Le questionnaire est disponible en français et en anglais sur demande, en écrivant à l'adresse suivante : alessia.negrini@irsst.qc.ca.

1.2.2 Évaluation du confort en laboratoire

Cette section s'appuie principalement sur deux publications (Carillo *et al.*, 2025; Valentin *et al.*, 2024;) portant sur deux études distinctes en laboratoire menées par les équipes québécoises. La première s'est penchée sur le confort multidimensionnel dans un environnement acoustique réaliste (Valentin *et al.*, 2024) [8], et est résumée dans la section 2.2.2.1 **Confort multidimensionnel de bouchons dans un environnement acoustique réaliste**. La seconde, présentée dans la section 2.2.2.2 **Évaluation objective et subjective de l'EO**, a exploré la dimension acoustique du confort en analysant l'EO perçu et vécu pour des bouchons innovants (Carillo *et al.*, 2022b; Carillo, Sgard, Dazel, *et al.*, 2023)[9], conçus spécialement pour réduire ce phénomène, en comparaison avec des bouchons en mousse classiques (Carillo *et al.*, 2025). Il est important de mentionner qu'une autre étude en laboratoire (Saint-Gaudens, 2025), issue d'un travail doctoral qui n'a pas encore fait l'objet de publication, s'est également penchée sur l'EO, cette fois en lien avec des bouchons d'oreilles commerciaux. Cette recherche a permis distinguer l'EO perçu de l'EO vécu, d'identifier les facteurs physiques et psychosociaux influençant l'EO vécu en présence ou en absence de bruit ambiant, et de proposer une méthode d'objectivation de cet attribut.

1.2.2.1 Confort multidimensionnel de bouchons dans un environnement acoustique réaliste

L'étude de Valentin *et al.* (2024) a obtenu l'approbation éthique du CÉR de l'Université de Sherbrooke (numéro de référence : 2019-1929/Berry). Elle vise à déterminer l'influence de l'environnement sonore et du type de bouchons sur le confort. L'impact de l'environnement sonore a été analysé spécifiquement sous l'angle acoustique, en s'appuyant sur deux attributs : l'intelligibilité des signaux d'alarme et l'inconfort causé par les bruits physiologiques. Des tests perceptifs ont été réalisés dans des environnements sonores industriels virtuels, reproduisaient des conditions réelles d'exposition au bruit. Ces tests incluaient des tâches de détection d'alarmes et de compréhension de la parole dans le bruit pour trois types de bouchons d'oreilles (mousse à comprimer, mousse prémoulée à tige, et prémoulé). Des évaluations subjectives ont également été menées via des questionnaires portant sur plusieurs dimensions du confort (acoustique, physique,

[8] Voir aussi Ezzaf, 2024; Ezzaf *et al.*, 2023; Valentin *et al.*, 2022; Valentin *et al.*, 2020; Valentin *et al.*, 2019.

[9] Voir aussi Carillo *et al.*, 2022a; Carillo, Saint-Gaudens, *et al.*, 2024; Carillo, Sgard et Doutres, 2023.

fonctionnel et psychologique). L'étude a été réalisée auprès de 24 participants naïfs quant à l'usage des protecteurs auditifs.

Les tests objectifs de détection d'alarme ont révélé que, lorsque la tâche est difficile (faible rapport signal/bruit), l'environnement sonore peut avoir un impact significatif sur la capacité à détecter les alarmes, quel que soit le modèle de bouchon. Plus précisément, un environnement sonore avec plus d'énergie dans la plage de fréquences de 630 Hz à 6300 Hz rend la détection d'alarmes plus difficile. Les tests de perception de la parole dans le bruit ont montré que l'environnement sonore influence la compréhension de la parole pour des niveaux vocaux élevés (voix criée et forte), indépendamment du type de bouchon d'oreille. Un environnement avec moins d'énergie dans la gamme de fréquences de 630 Hz à 6300 Hz a permis une meilleure discrimination de la parole. Par ailleurs, le type de bouchons d'oreilles n'avait généralement pas d'impact significatif sur la compréhension de la parole dans le bruit, sauf dans certaines conditions spécifiques. Dans l'un des environnements testés et en condition de voix forte, les bouchons en mousse à comprimer ont entraîné une reconnaissance des mots significativement plus faible que les modèles à tige et les bouchons prémoulés.

Les questionnaires sur le confort n'ont pas révélé de différences significatives liées à l'environnement sonore. Concernant l'effet de la famille de bouchons sur le confort, les bouchons prémoulés ont été jugés plus confortables (avec moins de gêne due aux bruits internes) que ceux en mousse prémoulée à tige, eux-mêmes plus confortables que les bouchons en mousse à comprimer. Les bouchons en mousse à comprimer et en mousse prémoulée à tige causent moins d'inconfort physique et de douleur que les bouchons prémoulés, probablement en raison de la pression exercée par ces derniers. Le confort fonctionnel est jugé meilleur pour les bouchons en mousse prémoulée à tige. Le confort psychologique vis-à-vis de la satisfaction est significativement plus élevé pour les bouchons en mousse prémoulée à tige comparés aux prémoulés. Enfin, des analyses statistiques ont été effectuées pour évaluer les corrélations entre les caractéristiques mécaniques des bouchons et la dimension physique du confort. Ces résultats sont discutés dans la section 1.4.2.

1.2.2.2 Évaluation objective et subjective de l'EO

L'étude de (Carillo *et al.*, 2025) a testé des bouchons d'oreilles, innovants et intégrant des résonateurs de Helmholtz, appelés meta-bouchons, conçus pour réduire l'EO objectif calculé ou mesuré avec des testeurs de confort évoqués dans la section 1.4.3.
Ces dispositifs ont été comparés à des bouchons en mousse classiques sur un panel de 34 participants. Cette étude a obtenu l'approbation éthique du Comité d'éthique de la recherche (CÉR) de l'École de technologie supérieure (ÉTS) (numéro de référence : H20231112). Les mesures de l'EO objectif réalisées sur des participants ont corroboré celles obtenues à l'aide du testeur expérimental d'EO. Comparés à des bouchons en mousse classiques, ces nouveaux dispositifs ont réduit l'OE objectif jusqu'à 20 dB sous 1

kHz. Les participants ont également perçu une diminution de l'amplification des basses fréquences et ressenti une amélioration du naturel de leur voix. Dans l'ensemble, les méta-bouchons d'oreilles ont été préférés par 85 % des participants. Ce travail a permis de confirmer que la perception du phénomène et le confort associé sont deux concepts bien différents, et qu'il faut bien distinguer lorsqu'on interroge les participants sur le phénomène auquel on les expose (note : ces deux concepts sont bien dissociés dans le modèle de confort proposé à la Figure 1). L'étude s'est également intéressée à l'objectivation de l'EO perçu et ressenti, à partir de mesures objectives et de caractéristiques de la triade. Cette question est discutée dans la section 1.5.4.

1.3 Tâche 2 : Détermination des caractéristiques physiques de la triade

Cette section décrit les différentes techniques utilisées dans le cadre de ce projet de recherche pour mesurer une propriété physique intrinsèque d'une composante de la triade (bloc « dimension physique » en haut à gauche du modèle de confort de la Figure 1). Elle s'appuie principalement sur 5 publications en relation avec le projet (Negrini *et al.*, 2025; Poissenot-Arrigoni, Law, Berbiche, Sgard, *et al.*, 2022; Poissenot-Arrigoni *et al.*, 2026; Poissenot-Arrigoni *et al.*, 2025; Poissenot-Arrigoni *et al.*, 2023a).

Elle repose sur des techniques éprouvées permettant de mesurer certaines caractéristiques physiques de la triade (Negrini *et al.*, 2025; Poissenot-Arrigoni *et al.*, 2026; Poissenot-Arrigoni *et al.*, 2023a) qui comprennent :

- pour l'environnement, l'analyse des conditions atmosphériques et des niveaux de bruit ambiants (voir section 1.3.1).
- pour la personne, l'évaluation de l'acuité auditive et de la latéralité manuelle (voir section 1.3.2),
- pour le bouchon, la mesure de sa masse et la description de sa géométrie nominale (voir section 1.3.3),

Par ailleurs, la détermination de la morphologie nominale des canaux auditifs des participants, caractéristique physique propre à la personne, fait l'objet du développement d'approches originales (Poissenot-Arrigoni, Law, Berbiche, Sgard, *et al.*, 2022; Poissenot-Arrigoni *et al.*, 2025)[10] (voir section 1.3.2).

1.3.1 Caractéristiques physiques de l'environnement

Les caractéristiques physiques de l'environnement de travail considérées dans cette étude comprenaient des éléments tels que la qualité de l'air (présence de poussière), la température de l'air et l'humidité (Negrini *et al.*, 2025; Poissenot-Arrigoni *et al.*, 2026; Poissenot-Arrigoni *et al.*, 2023a), entre autres, comme décrit dans (Doutres *et al.*, 2022).

[10] Voir aussi Poissenot-Arrigoni, 2023; Poissenot-Arrigoni, Doutres, *et al.*, 2022; Poissenot-Arrigoni, Law, Berbiche, Doutres, *et al.*, 2022; Poissenot-Arrigoni, *et al.*, 2020a, 2020b, 2020c)

L'étude de terrain a impliqué trois entreprises différentes, et il n'y avait pas de surveillance continue des conditions atmosphériques à chaque poste de travail. Par conséquent, les caractéristiques physiques de l'environnement de travail ont été représentées par la variable catégorielle Entreprise, qui prend les valeurs 1, 2 ou 3. Cette variable a pu être utilisée dans les analyses statistiques pour déterminer si l'entreprise avait une influence sur le confort perçu des bouchons d'oreilles. Cependant, elle n'a pas fourni d'informations spécifiques sur quelles caractéristiques physiques ou psychosociales de l'entreprise étaient susceptibles d'influencer le confort physique.

Au cours de la campagne de test sur le terrain, une variable saison comportant quatre valeurs (printemps, été, automne et hiver) a aussi été mesurée afin d'approximer un score des conditions atmosphériques en entreprise[11], en supposant que la température de l'environnement de travail était plus élevée en été par rapport au printemps et à l'automne, et plus basse en hiver.

Bien qu'il n'y ait pas eu de surveillance continue des niveaux de bruit pendant la campagne de mesure de ce projet, l'exposition au bruit des travailleurs a tout de même été estimée au moyen de mesures sonométriques et d'évaluations auditives dépersonnalisées réalisées par la Direction régionale de santé publique du Québec, soit deux ans avant l'étude, soit au début de celle-ci. Les mesures sonométriques ont été obtenues à l'aide d'un sonomètre Larson Davis de classe 1 sur différents postes de travail des entreprises participantes. En croisant les données sonométriques, les emplacements des employés recueillis à partir des QPU et les rapports de la Direction régionale de santé publique du Québec, un niveau d'exposition maximal a été estimé pour chaque travailleur.

1.3.2 Caractéristiques physiques de la personne

Les caractéristiques physiques de la personne collectées sur le terrain lors de l'entretien d'éligibilité étaient les suivantes : l'acuité auditive, la latéralité manuelle et la morphologie des conduits auditifs (Poissenot-Arrigoni *et al.*, 2026; Poissenot-Arrigoni, Law, Berbiche, Sgard, *et al.*, 2022, Poissenot-Arrigoni *et al.*, 2025; Poissenot-Arrigoni *et al.*, 2023a).

Acuité auditive

Au cours de la Semaine 0, l'acuité auditive de chaque participant a été évaluée.
Un audiologiste de l'équipe de recherche a effectué un audiogramme de dépistage pour chaque participant à l'aide d'un audiomètre portable. Le dépistage auditif a eu lieu dans une pièce calme de l'entreprise, avec des écouteurs intra-auriculaires recouverts de cache-oreilles. Pour chaque participant, quatre fréquences (500, 1000, 2000 et 4000 Hz) ont été testées. Une variable dichotomique a été créée pour l'oreille de chaque travailleur

[11] Au Québec, la température moyenne quotidienne varie entre 22°C en juillet et -15°C en janvier (source : climat.meteo.gc.ca).

(HL(L) et HL(R)) afin de déterminer si la personne au travail présentait une audition normale ou des pertes auditives.

Latéralité manuelle

Chaque participant a lui-même renseigné sa latéralité manuelle (gaucher, droitier ou ambidextre) dans le questionnaire UPQ.

Géométrie nominale du conduit auditif

Un processus objectif complet a été utilisé pour évaluer la morphologie des canaux auditifs gauche et droit de chaque participant à l'étude de terrain (Poissenot-Arrigoni, Law, Berbiche, Sgard, *et al.*, 2022). La morphologie des conduits auditifs a été obtenue en numérisant les empreintes de leurs conduits auditifs, réalisées lors de leur Semaine 0 (Figure 2). L'hypothèse retenue est que les numérisations des conduits auditifs obtenues représentent de manière précise la morphologie des conduits auditifs des participants. Le conduit auditif est un conduit en forme de S s'étendant entre la conque sur son côté latéral, et la membrane tympanique, sur son côté médial. La forme et la taille de la section transversale varient le long de l'axe curviligne du conduit, lequel passe par le centre des sections transversales du conduit auditif.

Trois sections transversales caractéristiques ont été utilisées : l'entrée (E), le premier coude (FB, pour « first bend » en anglais) et le deuxième coude (SB pour « second bend » en anglais). Les détails permettant de positionner ces sections de manière objective et reproductible sont détaillées dans (Poissenot-Arrigoni, Law, Berbiche, Sgard, *et al.*, 2022). Plusieurs indicateurs morphologiques caractéristiques de la taille et de la forme des conduits auditifs ont été employés dans cette étude.

Pour la taille :

- Circonférences des sections transversales E, FB et SB des oreilles droite (R) et gauche (L) notées respectivement CE(R), CE(L), CFB(R), CFB(L), CSB(R) et CSB(L).
- Surfaces des sections transversales E, FB et SB des oreilles droite (R) et gauche (L) notées respectivement SE(R), SE(L), SFB(R), SFB(L), SSB(R) et SSB(L).
- Longueurs curvilignes des conduits auditifs droit (LE-SB(R)) et gauche (LE-SB(L))

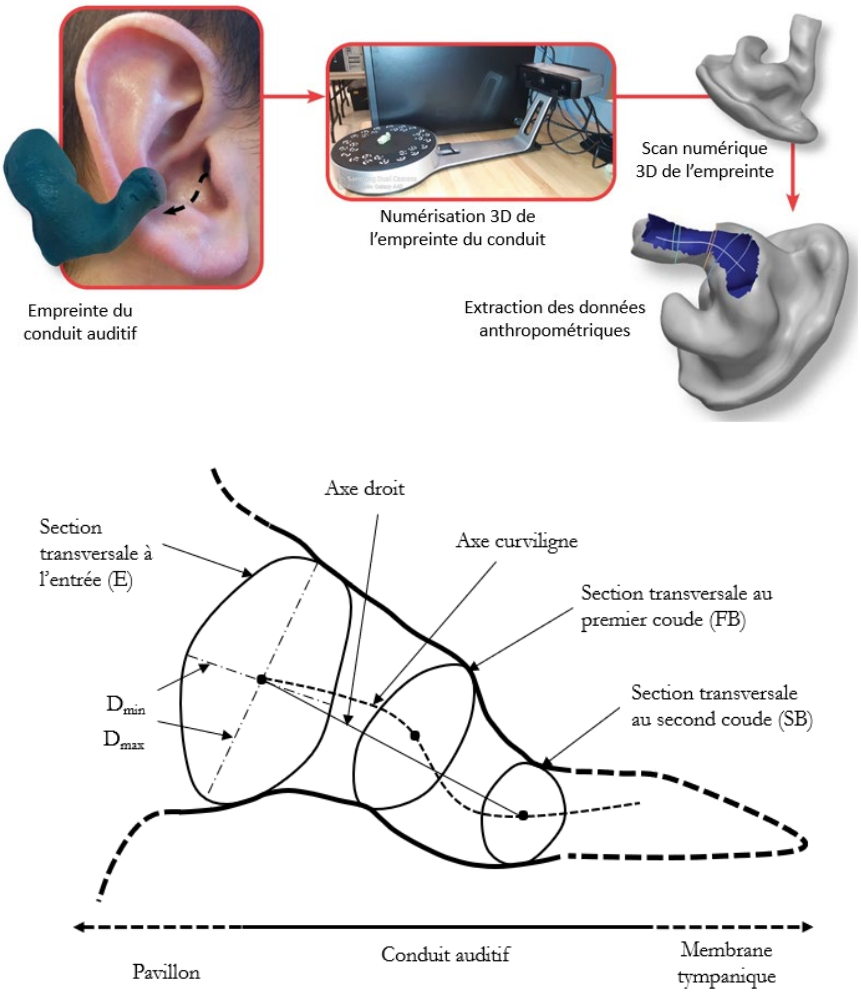


Figure 2 : Description du processus de reconstruction du conduit auditif (haut) et paramètres clés du conduit auditif (bas). Les lignes pleines épaisses foncées représentent les parois du conduit auditif dans la région d'intérêt pour cette étude. Les lignes pointillées épaisses foncées représentent les régions du conduit auditif ignorées. Les lignes pleines fines foncées représentent les sections transversales de référence du conduit auditif. La ligne pointillée fine foncée représente l'axe curvilinéaire du conduit auditif. Les lignes mixtes fines représentent les diamètres les plus longs et les plus courts de la section transversale d'entrée.

Adapté de « Morphologic clustering of earcanals using deep learning algorithm to design artificial ears dedicated to earplug attenuation measurement », par B. Poissenot-Arrigoni, C. H. Law, D. Berbiche, F. Sgard, *et al.*, 2022. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *152*(6), p. 3158 . ©ASA, 2022.

Pour la forme :

- Ellipticités[12] des sections transversales E, FB et SB des oreilles droite (R) et gauche (L), notées respectivement $IR_E(R)$, $IR_E(L)$, $IR_{FB}(R)$, $IR_{FB}(L)$, $IR_{SB}(R)$ et $IR_{SB}(L)$. L'ellipticité est quantifiée à partir du ratio isopérimétrique (IR), défini comme le rapport entre la surface et le périmètre au carré d'une section transversale, multiplié par 4 fois π. IR varie entre 0 et 1, les valeurs proches de 1 indiquant une section davantage circulaire.
- Rapports de forme des sections transversales E, FB et SB des oreilles droite (R) et gauche (L), notés respectivement $AR_E(R)$, $AR_E(L)$, $AR_{FB}(R)$, $AR_{FB}(L)$, ARSB(R) et $AR_{SB}(L)$. Le rapport de forme quantifie l'ovalité de la section transversale, et est défini comme le ratio entre le diamètre le plus long et le diamètre le plus court de la section.
- Conicités des conduits auditifs droit $F_{E\text{-}SB}(R)$ et gauche $F_{E\text{-}SB}(L)$, mesurant à quel point le conduit auditif se rétrécit en direction médiale. La conicité est calculée comme le rapport entre les surfaces des sections transversales E et SB.
- Tortuosités des conduits auditifs droit $T_{E\text{-}SB}(R)$ et gauche $T_{E\text{-}SB}(L)$, mesurant à quel point le conduit auditif est courbé. La tortuosité est calculée comme le rapport entre la longueur Euclidienne et curvilignes des conduits auditifs.

Les tailles des conduits auditifs des participants ont aussi été évaluées à l'aide de l'outil de mesure de la taille du canal auditif 3M™ Eargage étendue (décrit par l'acronyme EST pour « Earcanal Sizing Tool »). Cet EST comprend une sphère en plastique et une languette fixée à une tige. Il est disponible commercialement en cinq tailles de sphères, classant les conduits auditifs en cinq tailles différentes : extra-petit (XS), petit (S), moyen (M), grand (L) et extra-grand (XL). Dans l'étude de terrain, une version « étendue » faite maison de l'EST, intégrant trois sphères plus grandes supplémentaires (nommées XXL, XXXL et XXXXL), a été utilisée pour mesurer la taille du conduit auditif de tous les participants. Les tailles des conduits auditifs de toutes les personnes au travail ont ainsi été mesurées pour leurs oreilles droite et gauche selon la procédure de l'annexe B de l'ASA/ANSI S12.6-2016 (R2020) (American Standard Association [ASA], 2016) ((à noter que, pour utiliser en toute sécurité l'EST sur tous les travailleurs, des doigtiers en nitrile fins ont été utilisés pour recouvrir l'EST et ont été changés pour chaque travailleur).

Une étude complémentaire (Poissenot-Arrigoni *et al.*, 2025) sur l'outil de mesure de taille du conduit auditif 3M™ Eargage « étendu » a été réalisée pendant le projet, à partir de données secondaires, afin d'évaluer si cet EST pouvait être utilisé pour aider au choix des bouchons lors, par exemple, d'une formation délivrée par les hygiénistes. En effet, le choix des bouchons d'oreilles est une étape cruciale dans tout programme de conservation de l'audition. En particulier, les bouchons d'oreilles doivent être adaptés à la morphologie du conduit auditif de la personne à protéger. L'utilisation de l'outil de mesure 3M™ Eargage est la méthode la plus rapide, économique et simple pour évaluer la taille

[12] Également appelée « ovalité » dans Poissenot-Arrigoni, Law, Berbiche, Sgard, *et al.*, 2022

du conduit auditif (XS, S, M, L ou XL). Les résultats montrent que cet EST « étendu » permet d'estimer la taille du conduit auditif près du premier coude. Cet outil n'est pas suffisamment précis pour effectuer une classification morphologique précise des conduits auditifs. Cependant, l'EST « étendu » pourrait aider à identifier certains conduits auditifs extra-larges pour lesquels l'atténuation acoustique de certains modèles spécifiques de bouchons d'oreilles était significativement plus faible que celle obtenue avec les autres conduits auditifs. De plus, il a été démontré que les échelles de réduction classiques appliquées à l'indice de réduction du bruit (IRB) (Centre canadien d'Hygiène et de sécurité au travail [CCHST], 2025) étaient inappropriées pour ces conduits auditifs extra-larges.

1.3.3 Caractéristiques physiques des bouchons

Tout d'abord, les caractéristiques intrinsèques nominales des bouchons d'oreilles non comprimés ont été évaluées (Poissenot-Arrigoni *et al.*, 2026; Poissenot-Arrigoni *et al.*, 2023a). La forme des bouchons d'oreilles a été évaluée à l'aide de deux variables catégoriques : Con pour déterminer si le bouchon d'oreille était conique/cylindrique, et « Pod » pour identifier si le bouchon d'oreille avait une forme de boule (« pod » en anglais) ou non. De plus, deux diamètres caractéristiques ont été mesurés sur chaque bouchon d'oreille à l'aide d'un pied à coulisse. Le premier diamètre, D1, était situé près du côté latéral, et le deuxième diamètre, D2, était situé du côté médial. La masse de chaque bouchon d'oreille a été mesurée à l'aide d'une balance.

1.4 Tâche 2 : Détermination des caractéristiques physiques de la phase d'interaction du système oreille-bouchon

Lors de la phase d'interaction du modèle de confort (phase (I) de la Figure 1) (Doutres, Terroir, *et al.*, 2022, p. 20), le bouchon d'oreille interagit avec le conduit auditif de l'utilisateur, produisant des caractéristiques physiques supplémentaires qui peuvent influencer le confort vécu dans la tâche 3 (section 1.5). Cette section s'intéresse à la détermination de ces caractéristiques du système couplé « conduit/bouchon ». Plusieurs appareils et méthodes objectives ont ainsi été développés et on fait l'objet de publications en relation avec le projet (Benacchio *et al.*, 2018; Benacchio, Doutres, Varoquaux, *et al.*, 2019; Benacchio, Doutres, *et al.*, 2020; Carillo *et al.*, 2020b; Carillo, Doutres, *et al.*, 2021a, 2021b, 2021c, 2024; Carillo *et al.*, 2022b; Carillo, Sgard, Dazel, *et al.*, 2023; Carillo *et al.*, 2025; Carillo, Sgard, *et al.*, 2021; Dalaq *et al.*, 2023; Doutres *et al.*, 2025; Kersten *et al.*, 2024; Luan, Sgard, Benacchio, *et al.*, 2019; Melo *et al.*, 2024, Nélisse *et al.*, 2021; Poissenot-Arrigoni *et al.*, 2026; Poissenot-Arrigoni *et al.*, 2025; Poissenot-Arrigoni *et al.*, 2023a; Saint-Gaudens *et al.*, 2022; Xu *et al.*, 2021b). Même si certains testeurs illustrés aux **Figure 4 (d)** et **Figure 11 (b-c)** et **(h)** n'ont pas encore fait l'objet de publications à comité de lecture, il nous a paru important de les mentionner car ces derniers ont contribué de manière significative au développement méthodologique du projet ou à l'exploration de pistes innovantes. Leur documentation dans ce rapport vise à

assurer une transparence scientifique, renforcer la traçabilité des travaux réalisés, et ouvrir la voie à de futures valorisations ou publications.

La première caractéristique étudiée est de nature géométrique, à savoir la forme du conduit auditif une fois le bouchon inséré. Les bouchons d'oreilles induisent en effet un champ de déplacement du conduit auditif lors de leur insertion et peuvent provoquer une gêne due à la pression mécanique résultante, affectant de ce fait le confort[13]. De plus, la déformation du conduit peut influer sur les indicateurs acoustiques comme l'atténuation du protecteur et l'effet d'occlusion induit, qui jouent également sur le confort.
La connaissance du champ de déplacement est donc importante à la fois comme donnée d'entrée aux testeurs virtuels acoustiques qui nécessitent d'effectuer un modèle géométrique du système conduit auditif/bouchon le plus fidèle à la réalité. Elle peut également servir à calibrer les propriétés des matériaux utilisés dans les testeurs virtuels mécaniques et valider ces testeurs. Une approche originale pour estimer la géométrie du conduit auditif déformée par le bouchon a été proposée (Benacchio *et al.*, 2018; Benacchio, Doutres, Varoquaux, *et al.*, 2019; Benacchio, Doutres, *et al.*, 2020) (voir section 1.4.1).

Les autres caractéristiques physiques considérées sont des grandeurs mécaniques et acoustiques caractérisant le système couplé « conduit/bouchon » et tirées des travaux de la littérature (voir Doutres *et al.*, 2019 pour références, Giguère *et al.*, 2010 et Carillo *et al.*, 2025). Ces grandeurs peuvent être mesurées directement sur sujets humains ou à l'aide d'outils de laboratoire originaux, appelés « testeurs de confort »[14]. Ces testeurs sont destinés à aider les manufacturiers à améliorer le confort de leurs bouchons grâce à la connaissance de caractéristiques objectives qui influent sur le confort, mais en s'affranchissant de participants, à l'instar de ce qui est fait pour estimer la performance acoustique du protecteur via une mesure de son atténuation acoustique en laboratoire sur des têtes artificielles (aussi appelée ATF pour « Acoustical Test Fixture » en anglais), équipées de simulateur d'oreille. Ces testeurs de confort de bouchons peuvent opérer dans le monde réel à l'aide de capteurs physiques; on parle alors de testeur « expérimental », ou bien dans une idéalisation du monde réel à l'aide de capteurs virtuels; on parle alors de testeur « virtuel ». Dans ce dernier cas, on fait référence à un modèle analytique ou numérique capable de prédire les caractéristiques physiques d'intérêt. Un testeur virtuel peut être utile pour (i) mieux comprendre les mécanismes physiques impliqués dans la triade, (ii) étudier l'effet de divers facteurs sur la quantité

[13] Des travaux intéressants mais non publiés dans une revue à comité de lecture, sur la cartographie de la sensibilité cutanée du canal auditif de participants ont été effectués dans le cadre du projet. Cette sensibilité est un facteur potentiellement influant sur les attributs du confort mécanique. La méthode utilise un bouchon sonde inséré dans le conduit qui permet d'exercer une pression contrôlée dans certaines zones. Le lecteur peut se référer aux travaux de maîtrise de De Baermaker, 2020 et de Paris, 2018 pour plus de détails.

[14] Notons que la terminologie « testeur de confort » est un abus de langage puisque nous n'évaluons pas le confort mais plutôt les caractéristiques physiques qui l'influencent. Dans ce rapport, on utilisera également de façon alternative le terme « banc de confort ».

d'intérêt (acoustique ou mécanique), (iii) aider à concevoir des testeurs du monde physique.

Dans ce projet, seuls les bouchons « jetables et réutilisables » (7 bouchons sur les 9 testés sur le terrain) ont été caractérisés à l'aide de testeurs de confort. En effet, les testeurs de confort développés, notamment ceux permettant la détermination des caractéristiques mécaniques et l'effet d'occlusion, ne peuvent être utilisés ou ne sont pas encore assez matures pour appréhender les bouchons sur mesure. Développer des testeurs spécifiques à ces bouchons n'était pas envisageable à cause du temps et des ressources limités. Par ailleurs, un grand nombre de variables est nécessaire pour caractériser le processus de fabrication d'un bouchon sur mesure (et qui pourraient avoir une influence sur l'(in)confort généré), dont la prise d'empreinte et la façon de retravailler cette dernière, propre au manufacturier, pour aboutir au bouchon final. Or, pour des raisons de secret industriel, nous n'avions pas accès aux détails de fabrication.

Les caractéristiques mécaniques étudiées (voir section 1.4.2)[15] ont été exclusivement obtenues à l'aide de testeurs de confort virtuels et expérimentaux et comprennent

- la force radiale (Poissenot-Arrigoni *et al.*, 2023a) et la pression mécanique statique exercées par les bouchons sur les parois du conduit auditif (Dalaq *et al.*, 2023; Melo *et al.*, 2023),
- la force d'extraction nécessaire pour extirper le bouchon du conduit auditif (Poissenot-Arrigoni *et al.*, 2023a),
- le coefficient de frottement entre le conduit auditif et le bouchon (Poissenot-Arrigoni *et al.*, 2023a)
- le temps mis par les bouchons pour s'expandre dans le conduit auditif (Poissenot-Arrigoni *et al.*, 2026)

À noter que, dans les publications de Poissenot-Arrigoni *et al.*, 2023a et Poissenot-Arrigoni *et al.*, 2026, ces caractéristiques mécaniques ont été considérées comme des propriétés de la composante bouchon de la triade, et non comme des caractéristiques physiques de la phase d'interaction entre l'oreille et le bouchon. Cette approche se justifiait par la nature des testeurs de confort actuellement utilisés pour mesurer ces caractéristiques : ils présentent une forme simple et unique, ne comportent pas de peau, et sont secs (sans cérumen). Ainsi, ces testeurs permettent d'estimer soit (i) des caractéristiques intrinsèques aux bouchons (comme dans les publications mentionnées), ou (ii) des caractéristiques de la phase d'interaction (comme dans le présent rapport), mais de manière approximative et préliminaire, en raison de la simplicité des testeurs actuels. Ces limitations soulignent la nécessité de développer, à l'avenir, des testeurs plus

[15] Voir aussi Heni, 2024; Melo *et al.*, 2023; Poissenot-Arrigoni, 2023; Poissenot-Arrigoni *et al.*, 2023b; Sgard, Poissenot-Arrigoni, Melo *et al.*, 2024; Sgard, Poissenot-Arrigoni, Negrini, *et al.*, 2024.

réalistes, capables de mieux représenter l'interaction avec des conduits auditifs anatomiquement fidèles.

Les caractéristiques acoustiques considérées sont l'atténuation acoustique et l'effet d'occlusion et ont été soit obtenues sur sujets humains, soit avec des testeurs de confort. Plus spécifiquement,

Atténuation acoustique

- Utilisation de la méthode objective classique F-MIRE sur sujets humains avec l'équipement « 3M EARfit Dual-Ear Validation System » (Meinke *et al.*, 2022), en vue de mesurer l'atténuation acoustique fournie par les bouchons (Negrini *et al.*, 2025; Poissenot-Arrigoni *et al.*, 2026; Poissenot-Arrigoni, Law, Berbiche, Sgard, *et al.*, 2022).

- Utilisation de testeurs de confort virtuels et expérimentaux basés sur des oreilles tronquées, permettant de déterminer la perte par insertion ou la réduction du bruit (Luan, Sgard, Benacchio, *et al.*, 2019; Benacchio *et al.*, 2020; Poissenot-Arrigoni *et al.*, 2022; Carillo *et al.*, 2024). Ces derniers sont décrits dans la section 1.4.3[16].

Effet d'occlusion

- Utilisation de la méthode objective classique basée sur la mesure de pression dans le conduit en oreille ouverte et occluse de sujets humains pour une excitation par ossivibrateur pour mesurer l'effet d'occlusion objectif[17] (Nélisse *et al.*, 2021; Saint-Gaudens *et al.*, 2022)
- Utilisation d'une méthode de mesure alternative, simple, rapide et robuste, de l'effet d'occlusion objectif en utilisant la propre voix du participant et un indicateur basé sur la différence de niveau sonores à l'intérieur et à l'extérieur du canal auditif occlus par le bouchon (Carillo *et al.*, 2025; Nélisse *et al.*, 2021; Saint-Gaudens *et al.*, 2022)[18]. Cette méthode est brièvement décrite dans la section 1.4.3.
- Utilisation de testeurs de confort virtuels et expérimentaux, permettant de déterminer l'effet d'occlusion objectif, basés sur des oreilles tronquées (Benacchio, Doutres*, et al.*, 2020; Carillo *et al.*, 2020b; Carillo, Doutres*, et al.*, 2021a, 2021b, 2021c; Carillo *et al.*, 2022b; Carillo, Sgard, Dazel*, et al.*, 2023; Carillo *et al.*, 2025;

[16] Voir aussi Benacchio *et al.*, 2022, 2023; Benacchio, Poissenot-Arrigoni, *et al.*, 2019; Benacchio, Sgard, *et al.*, 2020; Ezzaf *et al.*, 2023; Kersten *et al.*, 2024b; Luan, 2021; Luan *et al.*, 2021; Luan, Sgard, Nélisse *et al.*, 2019; Poissenot-Arrigoni *et al.*, 2019; Sgard *et al.*, 2025.

[17] L'effet d'occlusion objectif traduit l'augmentation du niveau sonore dans le conduit auditif induit par la présence du bouchon, par rapport au niveau sonore dans le conduit ouvert.

[18] Voir aussi Saint-Gaudens, 2025; Saint-Gaudens, Nélisse, Doutres, *et al.*, 2019; Saint-Gaudens, Nélisse, Sgard et Doutres, 2023a, 2023b; Saint-Gaudens, Nélisse, Sgard, *et al.*, 2019.

Carillo, Sgard*, et al.*, 2021; Doutres *et al.*, 2025) ou une tête entière (Kersten *et al.*, 2024a; Xu *et al.*, 2021b). Ces testeurs sont décrits dans la section 1.4.3[19].

1.4.1 Géométrie déformée du conduit auditif

Déterminer le champ de déplacement du conduit auditif induit par l'insertion d'un bouchon représente un défi. Les techniques de mesure directe utilisant des capteurs de déplacement miniatures sont peu pratiques et peuvent affecter le couplage mécanique à l'interface conduit auditif/bouchon. Des techniques indirectes basées plutôt sur l'analyse des modifications de forme d'un solide déformable dues à une charge externe, telles que l'imagerie médicale et les méthodes de recalage non-linéaires, jamais encore explorées dans le cadre de cette problématique, sont de bonnes candidates pour évaluer la géométrie du conduit auditif déformé mais sont associées à des problèmes éthiques et techniques[20].

Une méthode novatrice non invasive pour évaluer le déplacement du conduit auditif induit par l'insertion de dispositifs intra-auriculaires, utilisant l'imagerie par résonance magnétique (IRM) et des techniques de recalage non-linéaire d'images segmentées, a donc été développée (Benacchio *et al.*, 2018; Benacchio, Doutres, Varoquaux*, et al.*, 2019; Benacchio, Doutres*, et al.*, 2020). La **Figure 3** illustre le principe de la méthode qui a été testée pour différents types de bouchons sur un seul participant. Bien que réalisée sur un échantillon limité, des conclusions importantes peuvent être tirées. Premièrement, cette méthode permet de quantifier le déplacement tridimensionnel des parois du conduit auditif et notamment de déterminer la direction et l'amplitude du déplacement avec une précision acceptable. Deuxièmement, le déplacement du conduit auditif varie significativement en fonction du type de bouchon utilisé, de sa forme, de son matériau et de son mode d'insertion. La forme et les caractéristiques anatomiques du conduit auditif influencent également le déplacement. L'étude a montré des variations notables entre l'oreille gauche et l'oreille droite du participant, soulignant l'importance de la variabilité interindividuelle. La méthode permet d'identifier les zones du conduit auditif les plus sujettes aux déformations et les directions de déplacement prédominantes.
Ces informations sont précieuses pour comprendre les mécanismes d'inconfort liés à l'utilisation de dispositifs intra-auriculaires.

[19] Voir aussi Benacchio *et al.*, 2023; Carillo, 2021; Carillo *et al.*, 2019a, 2019b, 2020c; Cyr-Desroches, 2021; Doutres *et al.*, 2024; Luan *et al.*, 2022; Poissenot-Arrigoni *et al.*, 2019; Saint-Gaudens, Nélisse, Doutres, *et al.*, 2019; Saint-Gaudens, Nélisse, Sgard et Doutres, 2023a, 2023b; Saint-Gaudens, Nélisse, Sgard, *et al.*, 2019; Sgard *et al.*, 2018, 2025; Xu, 2022; Xu *et al.*, 2020, 2021a, 2023; Xu *et al.*, 2019; Zimpfer *et al.*, 2023.

[20] Les IRMs sont très bruyants. Pendant la durée de l'acquisition, le patient est exposé à un risque qui doit être mitigé par la mise en place d'une protection auditive, ce qui pose a priori un problème pour déterminer la forme du conduit auditif ouvert sans protection. La mesure du bruit émis par les IRMs constitue également un problème technique puisque les microphones qui sont en métal ne peuvent être introduits dans leur champ magnétique.

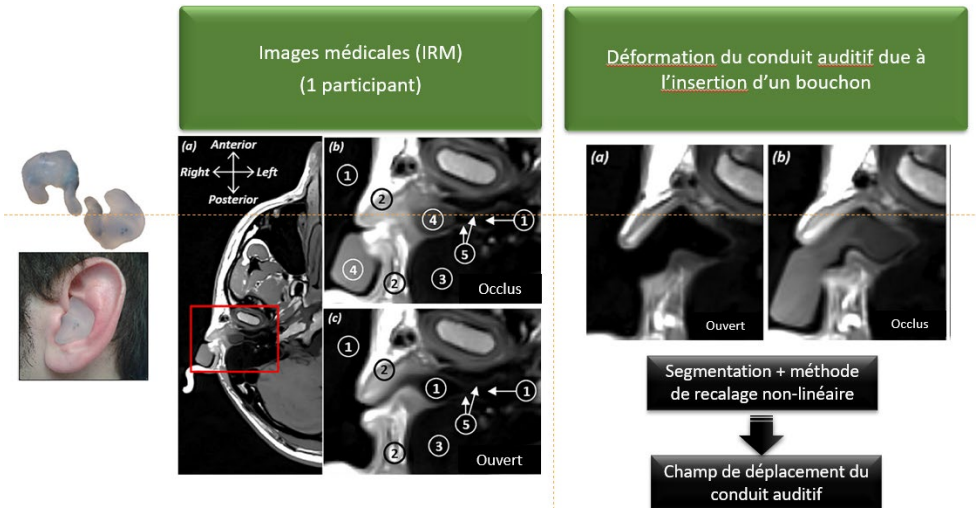


Figure 3 : Illustration de la méthode utilisée pour obtenir la géométrie déformée du conduit auditif

1.4.2 Caractéristiques physiques mécaniques

Cette section présente les testeurs de confort des cinq caractéristiques mécaniques suivantes : la force radiale, la PMS, la force d'extraction et le coefficient de frottement, et le temps d'expansion. Pour chacune de ces caractéristiques, un ou plusieurs testeurs expérimentaux ont été développés. Pour la PMS, on a également élaboré des testeurs virtuels. La **Figure 4** résume les différents testeurs qui ont été développés.

Force radiale

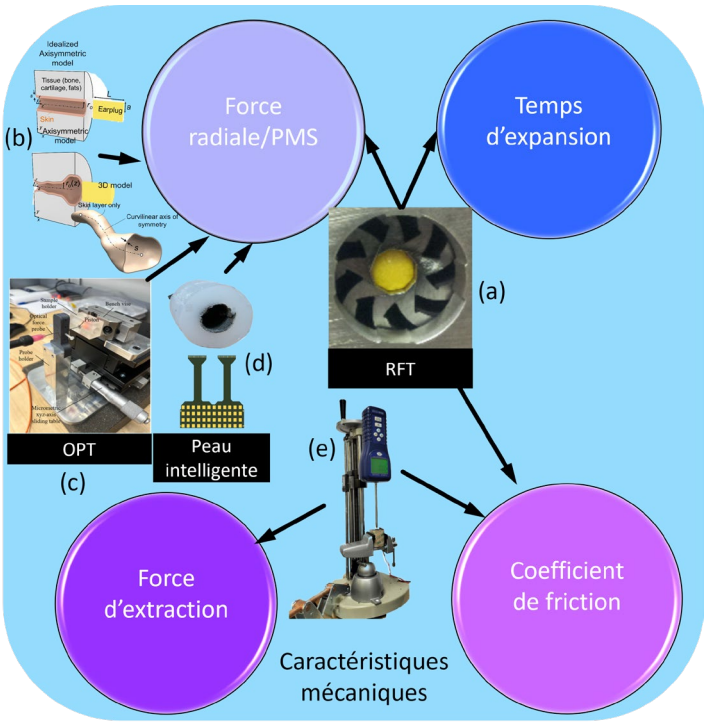


Figure 4 : Testeurs de confort expérimentaux et virtuels pour déterminer les caractéristiques physiques mécaniques du système couplé bouchon-oreille

La force radiale est un premier indicateur global de la pression qu'un bouchon exerce sur les parois du conduit auditif. Elle est mesurée à l'aide d'un testeur expérimental (voir **Figure 4** (a) et **Figure 5**), appelé dans la suite testeur « RFT », consistant en une machine commerciale[21]. Bien qu'il ait été initialement conçu pour mesurer la force radiale exercée par les stents expansibles ou des dispositifs similaires, cet équipement est bien adapté aux objets cylindriques chargés radialement de manière uniforme, comme les bouchons d'oreilles. Cette machine comporte un iris cylindrique chauffé à 36°C pour correspondre à la température du conduit auditif (voir **Figure 5**), dont la section droite peut varier grâce à un mécanisme de compression à faible frottement constitués de 9 dents métalliques. Cet iris joue le rôle de conduit auditif artificiel aux parois rigides dont on contrôle le diamètre selon un profil de déplacement temporel spécifié. Le testeur « RFT » convertit le mouvement linéaire en mouvement radial de la paroi du conduit auditif. La force radiale est calculée à partir de la force linéaire mesurée et du déplacement du bras en utilisant les principes de conservation de l'énergie. Le testeur « RFT » permet une compression radiale uniforme en contrôlant le diamètre de compression tout en mesurant

[21] Aussi appelée machine d'essai de force radiale TTR2 ou station J-Crimp, développée par la société Blockwise (©Blockwise, Tempe, Arizona, États-Unis).

la force radiale globale répartie sur la surface cylindrique du bouchon d'oreille (Dalaq *et al.*, 2023; Melo *et al.*, 2024; Poissenot-Arrigoni *et al.*, 2023a). La force radiale retenue pour caractériser le système bouchon-oreille correspond à la valeur du signal temporel de force radiale obtenue après un temps suffisamment long permettant d'atteindre l'équilibre thermique et mécanique du système (typiquement une dizaine de minutes).

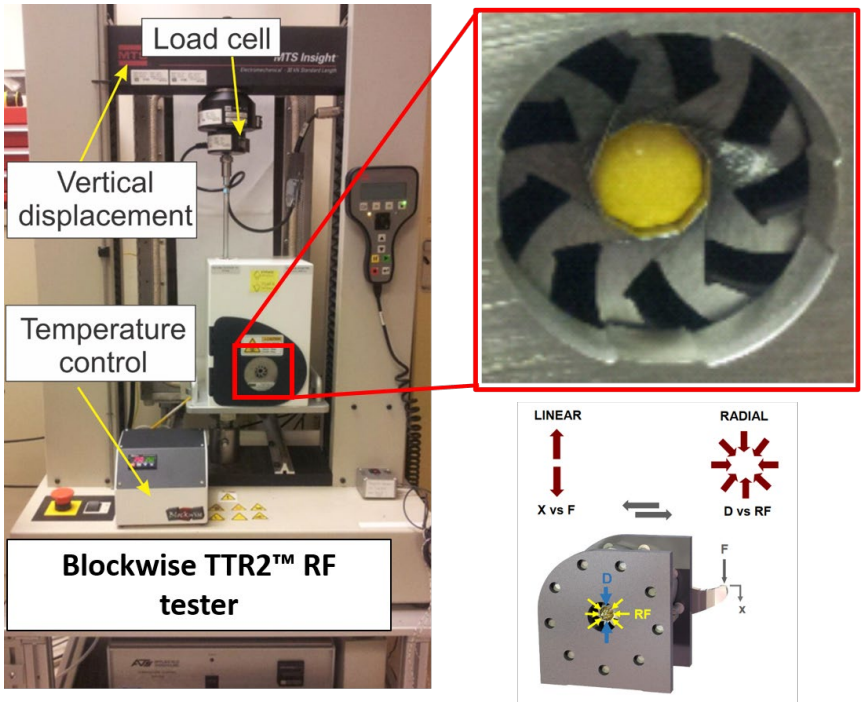


Figure 5 : Testeur expérimental « RFT » utilisé pour mesurer la force radiale des bouchons d'oreilles

Ce testeur a été utilisé à plusieurs fins :

- Déterminer les forces radiales pour plusieurs bouchons d'oreilles « jetables et réutilisables » testés sur le terrain, insérés à une profondeur d'insertion donnée à l'intérieur du conduit auditif artificiel du testeur et comprimés à des diamètres spécifiques caractéristiques de la section du premier coude (FB) du conduit auditif d'après l'étude anthropométrique réalisée à partir des données morphologiques des participants de l'étude de terrain (Poissenot-Arrigoni, Law, Berbiche, Sgard, *et al.*, 2022) (voir section 1.3.2). Ces forces associées au bouchon ont servi de variables d'entrée aux modèles statistiques décrits dans la section 1.5 pour analyser le confort physique (Poissenot-Arrigoni *et al.*, 2023a). Le classement de la force radiale, de la plus élevée à la plus faible, est indiqué dans le Tableau 2 (voir section **Pression mécanique statique (PMS)**. On constate que le taux de compression exerce une influence sur le classement.

- Étudier la force radiale (et la PMS[22]) en fonction du diamètre de compression initial de bouchons d'oreilles en mousse cylindrique (voir section **Pression mécanique statique (PMS)**)
- Valider les mesures de PMS obtenues avec le testeur « OPT » qui est un autre dispositif pour mesurer la PMS localement plutôt que globalement (voir section **Pression mécanique statique (PMS)**)
- Calibrer les propriétés hyperélastiques des bouchons en mousse à comprimer cylindriques pour les testeurs virtuels destinés à prédire la PMS (voir section **Pression mécanique statique (PMS)**)

Pression mécanique statique (PMS)

Dans la section **Force radiale**, la force radiale exercée par un bouchon d'oreille sur les parois d'un conduit artificiel rigide a été déterminée expérimentalement. Si la surface de contact entre le bouchon et les parois de l'iris du testeur « RFT » est connue approximativement, comme dans le cas des bouchons en mousse à comprimer cylindriques, on peut également évaluer une PMS moyenne associée en divisant la force radiale par cette surface. La force radiale ou la PMS moyenne sont cependant des indicateurs globaux. La PMS exercée par un bouchon d'oreille dans un conduit auditif dépend a priori de la position considérée. On peut facilement imaginer que du fait du caractère tortueux du conduit, il y aura des zones de ce dernier qui subissent davantage de pression. Établir la distribution spatiale de ces pressions afin d'éventuellement coupler cette dernière avec la sensibilité spatiale du conduit est une information pertinente plus riche qu'une valeur globale moyenne, qui peut être utilisée comme donnée d'entrée du modèle de confort. Cependant, la détermination d'une PMS locale sur la surface de contact « peau/bouchon » constitue un défi et l'équipe de recherche a mené des études exploratoires pour le déterminer. Cette section présente des testeurs virtuels (Dalaq *et al.*, 2023) et expérimentaux (Melo *et al.*, 2024) de la PMS.

Testeurs virtuels de la PMS (**Figure 4** (b))

Plusieurs modèles analytiques et numériques pour prédire la PMS induite par un bouchon d'oreille en mousse à comprimer cylindrique sur les parois internes du conduit auditif ont été développés (Dalaq *et al.*, 2023). La **Figure 6** résume ces testeurs, de complexités variées.

Les modèles proposés considèrent que le bouchon d'oreille, supposé être en mousse PVC, et la peau du conduit auditif se comporte de façon hyperélastique et sont caractérisés par une loi de comportement Neo-Hookéenne pour la peau et de Storaker pour le bouchon. On fait l'hypothèse que les autres tissus, comme l'os et le cartilage, se

[22] La PMS peut être obtenue en divisant la force radiale par la surface de contact si cette dernière peut être estimée, ce qui est le cas pour les bouchons en mousse à comprimer.

comportent de façon élastique. Les propriétés hyperélastiques de la peau et du bouchon en mousse PVC ont été calibrées en utilisant une approche inverse à travers des simulations et des expériences d'indentation de la peau de l'avant-bras et de tests de compression radiale des bouchons d'oreilles effectués avec le testeur « RFT » de la section **Force radiale**.

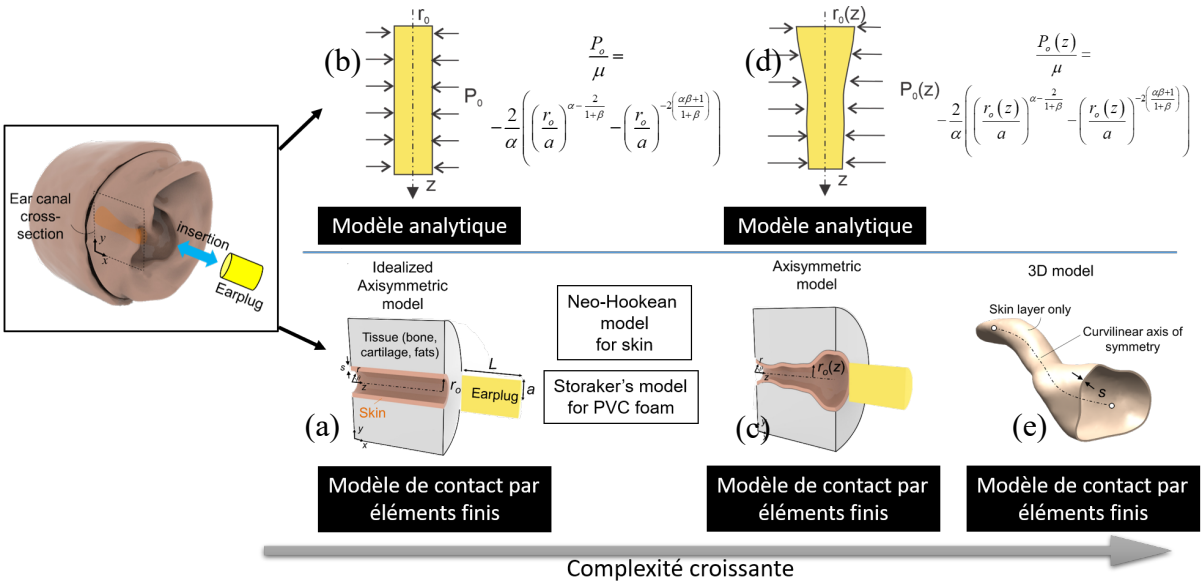


Figure 6 : Testeurs virtuels pour déterminer la PMS (P0) exercée par un bouchon en mousse à comprimer cylindrique sur les parois d'un conduit auditif. *a* : rayon nominal du bouchon, r_0 rayon final du bouchon, α, β, μ : paramètres hyperélastiques du bouchon

Le modèle le plus simple est basé sur un conduit auditif axisymétrique 2D simplifié avec une géométrie de section transversale circulaire constante (voir **Figure 6** (a)). Les tissus et la peau sont pris en compte et un modèle de contact par éléments finis (EF) peut être utilisé pour simuler l'insertion du bouchon d'oreille dans le conduit auditif et calculer les contraintes résultantes. Dans le cas où le bouchon d'oreille est beaucoup plus mou que la peau, on peut utiliser un deuxième modèle (voir **Figure 6** (b)), analytique, plus simple pour déterminer la PMS moyenne P_0 qui ne dépend que du diamètre final et nominal ainsi que des propriétés hyperélastiques des bouchons d'oreilles.

Deux autres modèles axisymétriques 2D légèrement plus complexes prennent en compte les variations des sections transversales du conduit auditif sur toute sa longueur.
Les géométries de ces conduits auditifs ont été reconstruites à partir d'images IRM d'un participant humain. Là encore, lorsque les tissus environnants sont pris en compte, un troisième modèle de contact par EF est utilisé (**Figure 6** (c)), tandis que lorsque les tissus peuvent être considérés comme rigides, nous utilisons le modèle analytique (**Figure 6** (d)) mais avec une dépendance en *z* qui correspond à l'axe du conduit auditif.

Le dernier modèle intègre une forme de conduit auditif réaliste en 3D, obtenue à partir d'images IRM d'un participant humain, et une couche de peau. Le problème de l'interaction mécanique entre le bouchon et ce conduit est résolu à l'aide d'une approche par EF (**Figure 6** (e)).

L'ensemble de ces modèles a été validé avec succès par rapport à des mesures expérimentales variées incluant l'utilisation du testeur « OPT » présenté dans la section Testeur expérimental de la PMS. Ces modèles virtuels établis pour les bouchons en mousse à comprimer en PVC permettent de prédire à la fois la PMS globale mais également la PMS locale et sont complémentaires aux testeurs de confort expérimentaux « RFT » (voir section **Force radiale**) et « OPT » (voir section Testeur expérimental de la PMS). Les modèles analytiques peuvent être utilisés pour comparer différents bouchons d'oreilles et évaluer l'effet de la modification du matériau et des paramètres géométriques de base. Cependant, pour obtenir des prédictions plus précises de la PMS, il est nécessaire d'utiliser un modèle par EF plus réaliste. En effet, les comparaisons du calcul par éléments finis (FEM) qui permet des estimations ponctuelles et du calcul analytique, qui fournit une valeur moyenne, montrent des différences en certains points du conduit auditif. De plus, le modèle 3D plus réaliste du conduit auditif, a l'avantage de tenir compte de la courbure de ce dernier et de la peau. Ainsi, il permet, a priori, d'obtenir des valeurs de PMS plus proches de celles observées sur sujets humains. Pour le bouchon en mousse à comprimer en PVC, des valeurs de PMS entre 5 et 18,2 kPa en fonction de la rigidité de la peau et des tissus environnants du conduit auditif ont été trouvées.

Testeur expérimental de la PMS (**Figure 4** (c-d))

Comme mentionné précédemment, la PMS globale exercée par un bouchon dans un conduit auditif cylindrique peut être évaluée à partir de la force radiale, grâce au dispositif RFT de la section **Force radiale**, si on fait l'hypothèse que la surface de contact est connue. Pour les bouchons cylindriques en mousse en PVC, on peut faire l'hypothèse que la surface de contact lorsque le bouchon est pleinement inséré, est celle du bouchon dans son état nominal. Pour les autres types de bouchon, la connaissance de cette surface représente un défi. Pour les bouchons cylindriques en mousse en PVC, il a été observé que la PMS moyenne estimée avec le testeur RFT dépend du diamètre auquel le bouchon est initialement comprimé. Une compression plus importante conduit à une PMS plus faible, ce qui est attribué à l'effet Mullins, un phénomène de ramollissement sous contrainte observé dans les matériaux en mousse (Melo *et al.*, 2024).

Afin de s'affranchir de ce défi et dans l'optique de collecter des informations locales plus riches qu'une valeur globale, un dispositif expérimental innovant, appelé testeur OPT, basé sur un capteur optique a été conçu pour mesurer localement en des points spécifiques, la PMS exercée par les bouchons d'oreilles dans un conduit auditif aux parois rigides (Melo *et al.*, 2024). Le dispositif consiste (voir **Figure 4** (c) et **Figure 7**) en

- Une réplique du conduit auditif, fabriquée en impression 3D à partir d'une résine photopolymère. Deux types de conduits auditifs artificiels ont été utilisés:
    - Forme cylindrique (**Figure 7** (b)): Un conduit simple de diamètre uniforme, utilisé pour valider l'OPT par comparaison avec les résultats du testeur de force radiale discuté dans la section **Force radiale**.
    - Forme réaliste (**Figure 7** (c)): Un modèle plus réaliste reproduisant la forme d'un conduit auditif humain, conçu à partir d'images IRM haute résolution (Carillo, Sgard, *et al.*, 2021; Xu *et al.*, 2021b).
- Un piston: un cylindre rigide inséré dans le conduit artificiel, qui transmet la force radiale exercée par le bouchon d'oreille à la sonde optique. La surface du piston en contact avec le bouchon est conçue pour s'adapter à la forme du conduit artificiel.
- Une sonde optique (**Figure 7**(d)): un capteur de force à fibre optique (© FISO) mesure la force transmise par le piston sur lequel le bouchon d'oreille appuie. La PMS est obtenue en divisant la force par la surface du piston. La mesure est enregistrée pendant une durée suffisante pour que le bouchon d'oreille atteigne un état d'équilibre. La sonde est fixée à un support et entre en contact avec la partie extérieure du piston.
- Une plateforme coulissante (micromanipulateur): Un support mobile sur trois axes (x, y, z) permet de positionner précisément le conduit artificiel par rapport à la sonde optique.
- Un étau, utilisé pour fixer solidement le conduit à la plateforme coulissante.

Le testeur OPT a été validé de trois façons. Premièrement la PMS mesurée avec l'OPT avec conduit cylindrique a été comparée à celle obtenue avec le testeur RFT pour un bouchon en mousse à comprimer. Avant l'insertion dans le conduit artificiel, le bouchon a été comprimé radialement à l'aide d'un dispositif de compression (Squeeze Buddy™, voir **Figure 7** (e)), inséré manuellement dans le conduit artificiel, puis laissé se dilater. Les résultats ont montré une bonne concordance entre les deux systèmes, en particulier pour les diamètres de conduit auditif artificiel de 7 mm et 8 mm. Deuxièmement, les valeurs obtenues avec le testeur OPT ont également été comparées aux prédictions du modèle analytique de la section Testeurs virtuels de la PMS, basé sur les propriétés mécaniques du bouchon d'oreille comprimé radialement de façon uniforme. Les résultats ont montré un accord satisfaisant, renforçant la validité des mesures de l'OPT. Troisièmement, la mesure de la PMS avec le testeur OPT, et conduit réaliste humain, a été comparée aux prédictions du modèle numérique par EF de la **Figure 6** (e), dans lequel des conditions aux limites fixes ont été appliquées sur la frontière externe de la peau. Une excellente concordance a été observée pour l'un des points de mesure, tandis qu'une différence notable a été constatée pour l'autre point. Cette dernière divergence a été attribuée à la surface de contact irrégulière du piston avec le bouchon d'oreille dans le conduit auditif artificiel réaliste qui transmet ainsi une force moyenne normale plus faible que celle qui serait mesurée au point de calcul, ainsi qu'aux limitations du modèle EF (p.

ex. friction entre bouchon et peau ignorée, variabilité intrinsèque des propriétés du bouchon non considérée, déviation d'un comportement hyperélastique pour des compressions élevées).

Tableau 2 : Classement de la force radiale et de la PMS

	Testeur « RFT »				**Testeur « OPT »**	
	Force radiale, diamètre final de 7 mm		**Force radiale, diamètre final de 9 mm**		**Pression mécanique statique locale PMS (kPa)**	
Rang	Modèle	Force (N)	Modèle	Force (N)	Modèle	PMS (kPa)
1	Prémoulé 3M™ Ultrafit	52	Mousse à comprimer Honeywell™ Max	6.5	Mousse prémoulée à tige Howeywell™ Trust-fit	70.9
2	Mousse prémoulée à tige 3M™ EAR Push-ins SoftTouch	29	Mousse prémoulée à tige Howeywell™ Trust-fit	5.8	Mousse prémoulée à tige 3M™ EAR Push-ins SoftTouch	33.4
3	Mousse prémoulée à tige Howeywell™ Trust-fit	20.8	Mousse à comprimer 3M™ EAR classic	4.7	Mousse prémoulée à tige 3M™ EAR Push-ins	31.8
4	Mousse prémoulée à tige 3M™ EAR Push-ins	10.9	Mousse prémoulée à tige 3M™ EAR Push-ins SoftTouch	4.5	Mousse à comprimer Honeywell™ Max	21.5
5	Mousse à comprimer Honeywell™ Max	9.9	Mousse à comprimer 3M™-1100	4.45	Mousse à comprimer 3M™ EAR classic	11.4
6	Mousse à comprimer 3M™ EAR classic	7	Prémoulé 3M™ Ultrafit	4	Mousse à comprimer 3M™-1100	11
7	Mousse à comprimer 3M™-1100	6.9	Mousse prémoulée à tige 3M™ EAR Push-ins	3.2		

Le testeur OPT a été utilisé pour mesurer la PMS de six types de bouchons d'oreilles en mousse (voir Tableau 1), couramment utilisés, insérés dans un conduit auditif cylindrique de 8 mm de diamètre. Les résultats ont montré que la PMS varie considérablement en fonction du type de bouchon d'oreille, confirmant l'importance de cette mesure pour le confort. Le classement de la PMS, de la plus élevée à la plus faible, est indiqué dans le Tableau 2. Notons que ce classement est globalement en accord avec celui obtenu avec la force radiale correspondant à un diamètre final de 7 mm. Pour un diamètre final de 9 mm, le classement est différent, mais dans l'ensemble, les bouchons en mousse à comprimer induisent des forces radiales et de PMS plus faibles que les bouchons en mousse prémoulée à tige.

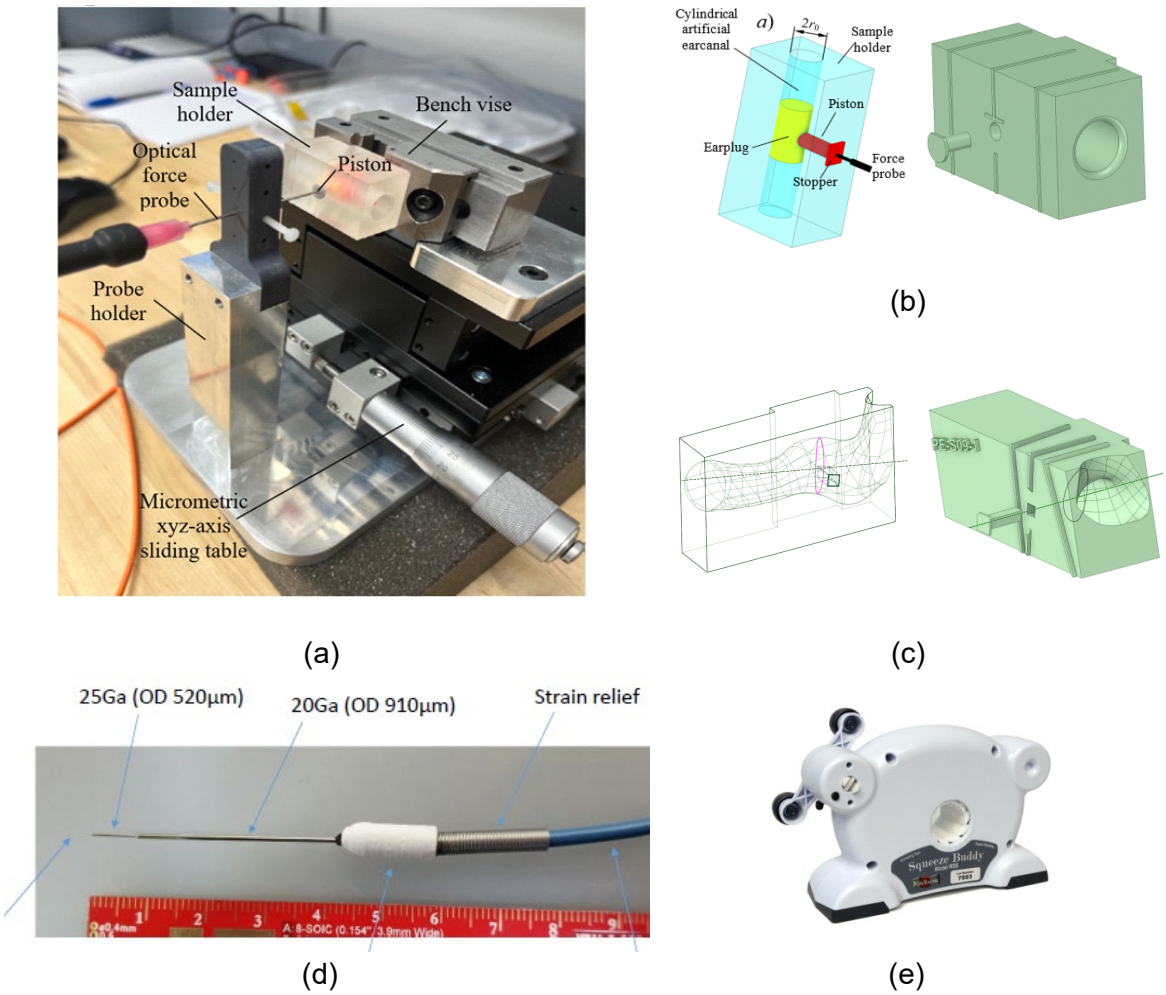


Figure 7 : Testeur de confort expérimental OPT pour mesurer la PMS locale dans un conduit auditif aux parois rigides de forme cylindrique ou complexe. (a) description du testeur (b) conduit auditif artificiel cylindrique (c) conduit auditif artificiel réaliste (d) sonde optique FISOTM (e) dispositif de compression manuel (Squeeze Buddy™)

Au final, l'étude de (Melo *et al.*, 2024) a montré la validité du testeur OPT comme outil de mesure locale de la PMS, la capacité de l'OPT à mesurer la PMS dans des géométries de conduits auditifs réalistes aux parois rigides[23], et la variation significative de la PMS entre différents types de bouchons d'oreilles.

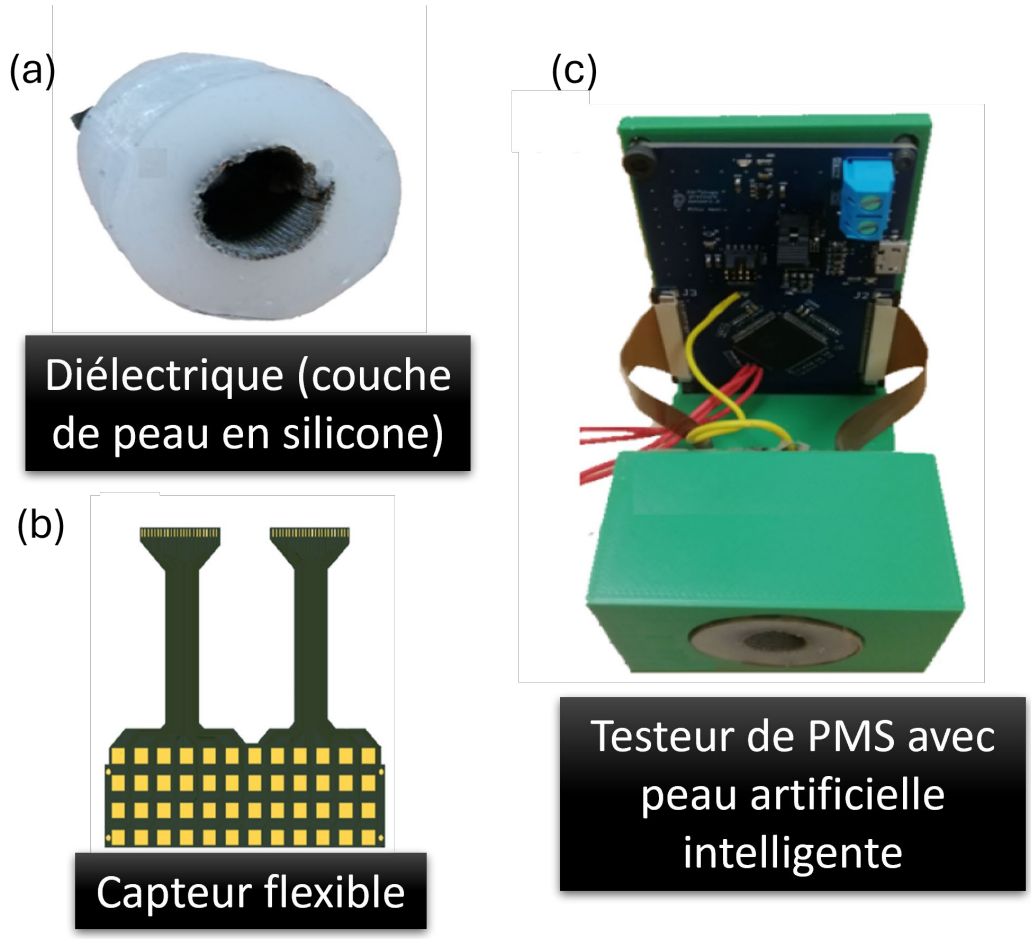


Figure 8 : Testeur de confort expérimental pour mesurer la distribution spatiale de PMS dans un conduit auditif de forme cylindrique avec peau artificielle instrumentée (a) couche de peau artificielle (b) capteur flexible enroulé autour de la peau artificielle (c) description du testeur

Les testeurs de PMS précédents sont constitués de conduits auditifs aux parois rigides sans couche simulant la peau. Pour remédier à cette limitation, un premier prototype de peau artificielle intelligente intégré dans un canal auditif cylindrique à section constante a

[23] Le testeur OPT ne comporte pas de couche de peau actuellement alors que la présence de cette dernière peut affecter la PMS. Pour remédier à ce problème, un prototype de peau artificielle intelligente composé d'un capteur capacitif comprenant une couche de silicone diélectrique qui représente la peau, une couche de tissu conducteur qui simule la masse électrique et un capteur flexible constituant l'autre électrode placée sur la couche externe de la peau, a été développé dans le cadre d'une maîtrise (Heni, 2024) et montre des résultats prometteurs.

été développé (voir **Figure 4** (d) et **Figure 8**). Ce système repose sur un capteur capacitif composé de trois éléments : une couche de silicone diélectrique représentant la peau, une couche de tissu conducteur simulant la masse électrique, et un capteur flexible agissant comme l'autre électrode, placé sur la surface externe de la peau. Le système est calibré à l'aide d'un mini-ballon et gonflé à une pression connue, permettant d'appliquer une pression statique uniforme sur chaque cellule de capteur, aussi appelée taxel. Les premiers essais indiquent clairement des différences de distribution spatiale de PMS dans le conduit auditif entre les bouchons en mousse prémoulée à tige 3M™ EAR Push-ins et Howeywell™ Trust-fit. On constate que le modèle Howeywell™ Trust-Fit exerce une pression maximale au centre du conduit, tandis que le modèle 3M™ EAR Push-Ins applique une pression maximale à l'entrée du conduit auditif.

Force d'extraction et coefficient de frottement statique

La force d'extraction ou force de cisaillement nécessaire pour extraire le bouchon d'oreille du conduit auditif ainsi que le coefficient de frottement entre le bouchon d'oreille et le conduit auditif sont deux autres caractéristiques mécaniques potentiellement associées à l'inconfort et notamment à l'irritation et à la gêne physique induites par les bouchons d'oreilles.

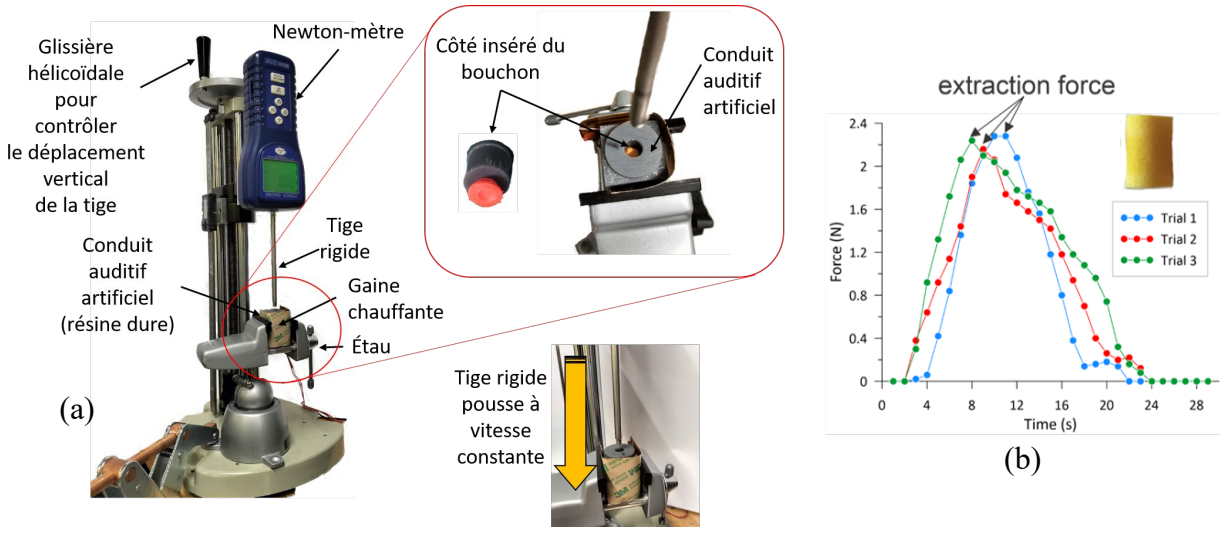


Figure 9 : Testeur de confort expérimental pour mesurer la force d'extraction. (a) description du testeur (b) exemple de mesure de force d'extraction pour un bouchon en mousse cylindrique

Le testeur de force d'extraction (voir **Figure 4** (e)) est inspiré de la littérature. Il est constitué d'un conduit auditif artificiel cylindrique rigide d'un diamètre de 9 mm[24], qui peut

[24] La valeur de 7 basée sur l'étude anthropométrique de Poissenot-Arrigoni, Law, Berbiche, Sgard, *et al.*, 2022) a été choisie du fait qu'on a montré qu'elle était corrélée à l'inconfort physique (voir section 1.4.2).

être chauffé à une température spécifiée (voir **Figure 9** (a)). Une tige rigide attachée au Newton-mètre pousse la face du bouchon d'oreille insérée hors du conduit à une vitesse contrôlée manuellement, plutôt que de la tirer. Les bouchons d'oreilles en mousse sont précomprimés avant insertion dans le conduit auditif à l'aide du dispositif de compression (Squeeze Buddy™, voir **Figure 7** (e)) (Poissenot-Arrigoni *et al.*, 2023a).

La **Figure 9** (b) montre un exemple de force de cisaillement mesurée avec le Newton-mètre en fonction du temps pour 3 bouchons d'oreilles cylindriques en mousse. La force maximale obtenue lors du glissement du bouchon d'oreille est considérée comme la force d'extraction.

Le coefficient de frottement statique est défini comme le rapport entre les forces tangentielle et normale résultant de l'interaction entre le bouchon d'oreille et la peau. Pour obtenir une estimation de ce coefficient, on utilise le testeur de force d'extraction illustré sur la **Figure 9** (a) qui fournit la force tangentielle nécessaire pour initier le glissement du bouchon et le testeur RFT de force radiale qui mesure la force normale pour le même diamètre de compression (9 mm). Cette configuration considère que le conduit auditif a des parois rigides (sans réplique de peau) et qu'il est sec (sans réplique de cérumen).

Tableau 3 : Classement de la force d'extraction et du coefficient de frottement peau/bouchon

	Force d'extraction		**Coefficient de frottement**	
Rang	Modèle	Force (N)	Modèle	Coefficient de frottement (1)
1	Mousse prémoulée à tige Howeywell™ Trust-fit	6	Mousse prémoulée à tige Howeywell™ Trust-fit	1.03
2	Mousse à comprimer Honeywell™ Max	3.6	Mousse prémoulée à tige 3M™ EAR Push-ins	0.62
3	Mousse prémoulée à tige 3M™ EAR Push-ins	3.5	Mousse à comprimer 3M™-1100	0.61
4	Mousse à comprimer 3M™-1100	2.7	Mousse à comprimer Honeywell™ Max	0.55
5	Mousse prémoulée à tige 3M™ EAR Push-ins SoftTouch	2.3	Mousse prémoulée à tige 3M™ EAR Push-ins SoftTouch	0.52

6	Mousse à comprimer 3M™ EAR classic	2.3	Prémoulé 3M™ Ultrafit	0.52
7	Prémoulé 3M™ Ultrafit	2.1	Mousse à comprimer 3M™ EAR classic	0.48

Les deux testeurs décrits précédemment permettent de classer les bouchons en fonction de la force d'extraction et du coefficient de frottement. Ces deux caractéristiques ont été mesurées pour l'ensemble des bouchons du Tableau 1 sauf les bouchons sur mesure et utilisées comme données d'entrées aux analyses statistiques de la section 1.5 (Poissenot-Arrigoni *et al.*, 2023a). Le classement de la force d'extraction et du coefficient de frottement peau/bouchon, de la valeur plus élevée à la plus faible, est indiqué dans le Tableau 3.

Temps d'expansion des bouchons

La détermination du temps d'expansion (Poissenot-Arrigoni *et al.*, 2026) est effectuée à l'aide du testeur RFT (voir **Figure 5**). Ce temps n'a besoin d'être mesuré que pour les bouchons en mousse à comprimer. Pour les autres familles, il est nul. La procédure d'essai est comme suit. Le bouchon en mousse à comprimer est placé dans l'iris grand ouvert de la machine pour faciliter l'insertion sans compression. Le bouchon est ensuite rapidement comprimé à 40 % de son diamètre initial, maintenu à ce diamètre pendant 20 secondes (simulant le déroulement pendant l'insertion), puis rapidement étendu à 60 % de son diamètre initial, en le maintenant pendant environ 10 minutes. Tout au long de cette phase finale, les bouchons se dilatent dans le conduit auditif rigide, atteignant leur force maximale. Le temps nécessaire pour atteindre 75 % de la force maximale après la libération de l'iris est considéré comme le temps d'expansion du bouchon (voir **Figure 10**). Le temps d'expansion a été mesuré pour les différents bouchons en mousse et utilisé dans les analyses statistiques de la section 1.5. Le classement suivant, du plus élevé au plus faible est obtenu : Mousse à comprimer Honeywell™ Max (6.14 s), Mousse à comprimer 3M™-1100 (4.28 s), Mousse à comprimer 3M™ EAR classic (4.06 s).

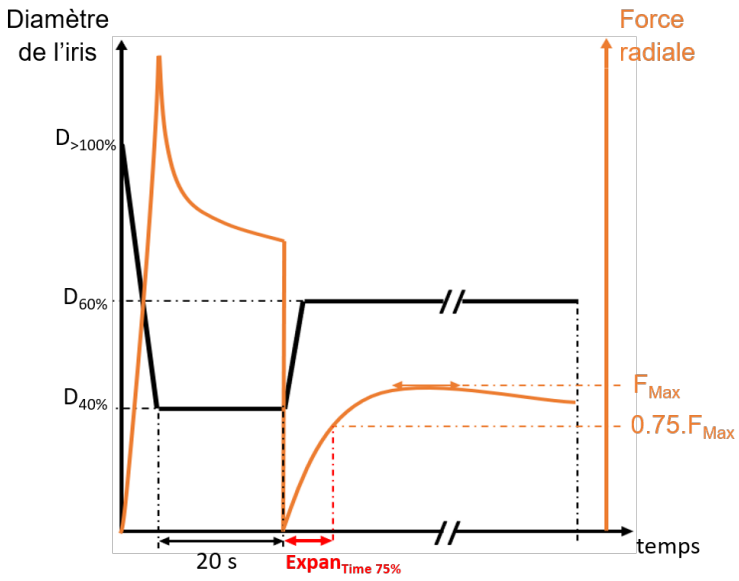


Figure 10 : Principe de mesure du temps d'expansion d'un bouchon en mousse

1.4.3 Atténuation acoustique et effet d'occlusion

Cette section discute de la détermination de l'atténuation acoustique et de l'EO.

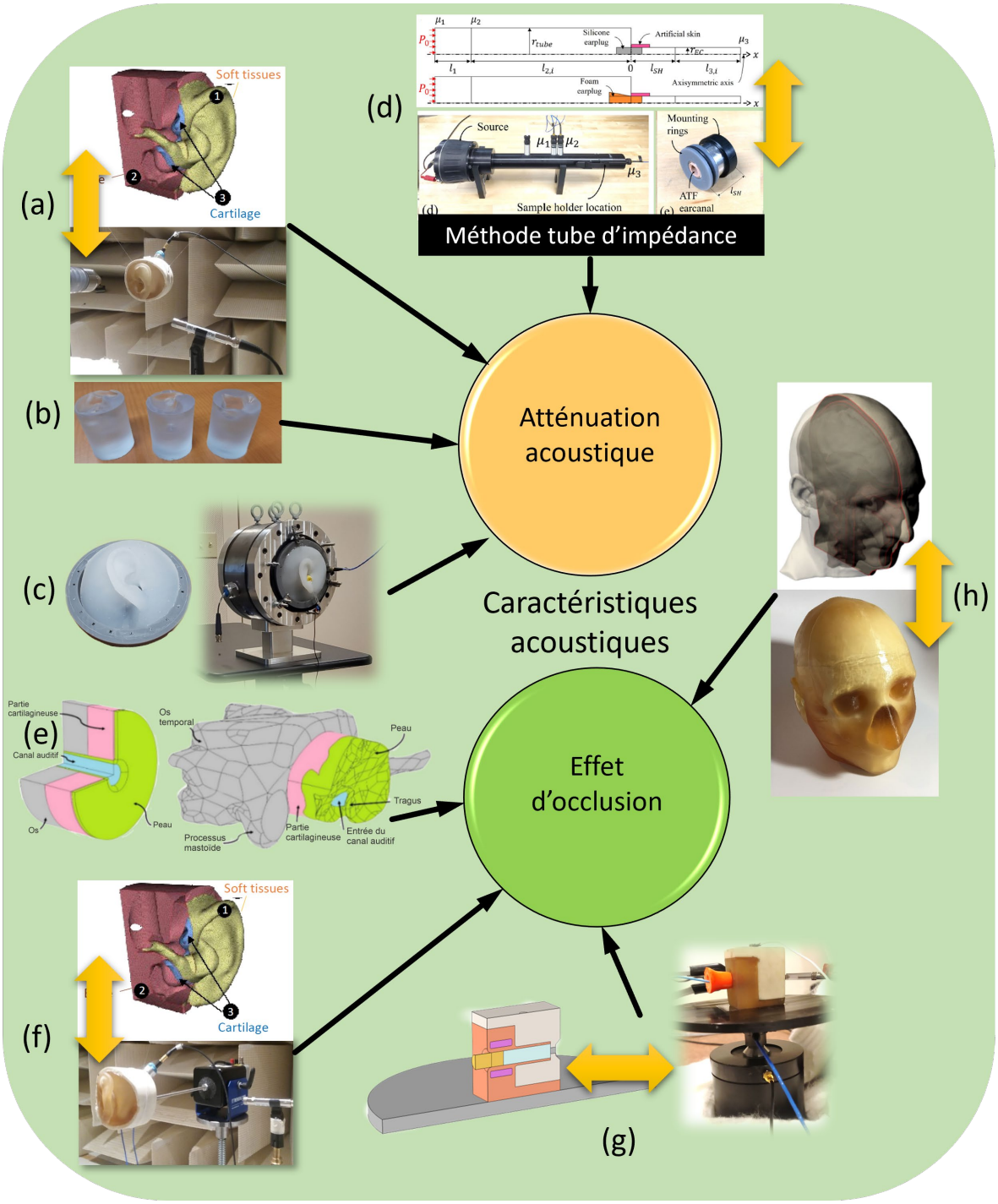


Figure 11 : Testeurs de confort expérimentaux et virtuels pour déterminer les caractéristiques physiques acoustiques du système couplé bouchon-oreille. La flèche jaune indique qu'à la fois le testeur virtuel et le testeur expérimental associé sont disponibles.

Pour l'atténuation, la méthode de mesure sur sujets humains avec le système 3M™ EARfit est classique (Meinke *et al.*, 2022) et ne sera pas détaillée. Pour l'EO objectif, les méthodes de mesure sur sujets humains basées sur une excitation par ossivibrateur (Hansen, 1998) sont également bien connues et ne seront pas présentées. Seule la méthode originale proposée par l'équipe de recherche, et basée sur une excitation par la voix ainsi que la mesure simultanée du niveau sonore à l'extérieur et à l'intérieur du canal auditif occlus par le protecteur pour estimer l'EO, est brièvement décrite. Puis pour chacune des caractéristiques « atténuation acoustique » et « EO », on présente les testeurs expérimentaux et virtuels qui ont été développés et qui sont résumés sur la **Figure 11**.

On peut classer ces outils en deux catégories, qui se distinguent par le niveau de simplification géométrique qu'ils considèrent (Carillo, Sgard, *et al.*, 2021): (i) les oreilles tronquées qui reproduisent une zone de tissus de complexité variée entourant le canal auditif, de forme simplifié ou réaliste, incluant ou non le pavillon (voir **Figure 11** (a-g)) et (ii) la tête entière (voir **Figure 11** (h)). Les testeurs expérimentaux ont été fabriqués en utilisant des matériaux synthétiques reproduisant le comportement mécanique des structures biologiques. La fabrication a été réalisée soit par l'équipe elle-même, en utilisant une technique d'impression 3D **Figure 11** (b-c), (d) soit par une compagnie tierce (True Phantom, ON, Canada) (**Figure 11** (a), (f-h).

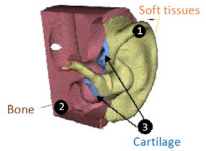
Les oreilles externes tronquées sont des systèmes généralement de petite dimension et donc adaptés pour être utilisés comme bancs de mesure de table. Les modèles numériques associés sont également assez rapides et permettent l'analyse d'un grand nombre de variables. L'effet de la troncation peut affecter les indicateurs étudiés par rapport à une situation où on considère l'ensemble de la tête. Ainsi, dans le cas d'une stimulation solidienne, il faut s'assurer de choisir des conditions aux limites et d'excitation qui permettent de reproduire au mieux les vibrations du canal auditif afin de capturer la physique correctement[25]. Dans le cas d'une excitation acoustique, il est important de contrôler les fuites et les chemins de transmission secondaire qui peuvent être induits par la troncation. La tête entière est plus réaliste et permet de s'affranchir des problèmes de conditions aux limites associés aux oreilles tronquées et permet de mieux capturer les phénomènes de conduction tissulaire. Par contre, le modèle numérique associé est beaucoup plus gourmand en ressources de calcul et pose des défis pour sa calibration et sa validation. Il est important de mentionner que certains testeurs (**Figure 11** (e) et (g)) ont permis d'aider à la conception de bouchons d'oreilles passifs ayant un EO réduit tout en gardant une atténuation satisfaisante (Carillo *et al.*, 2022b; Carillo, Sgard, Dazel, *et al.*, 2023; Carillo *et al.*, 2025)[26].

[25] Les champs vibratoires des parois du canal auditif et les niveaux sonores dans le canal auditif occlus ou ouvert sont sensibles aux conditions aux limites et d'excitation. L'EO objectif, qui est la différence de ces niveaux sonores, l'est par contre beaucoup moins (Brummund *et al.*, 2015).

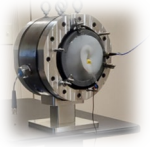
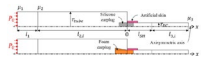
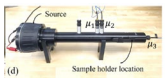
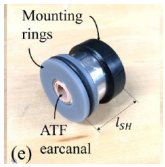
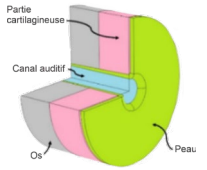
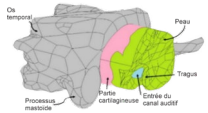
[26] Voir aussi Carillo, Saint-Gaudens, *et al.*, 2024; Carillo, Sgard et Doutres, 2023.

Le Tableau 4 résume les informations relatives aux différents testeurs.

Tableau 4 : Résumé des informations relatives aux testeurs

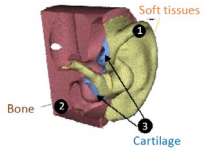
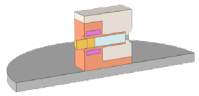
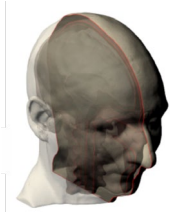
Testeur virtuel	Testeur expérimental	Figure	Type	Source pour la reconstruction	Caractéristiques	Structures reconstruites et type de matériau utilisé dans le cas d'un testeur expérimental
		**Figure 11** (a)	Oreille tronquée de forme cylindrique pour évaluer l'atténuation acoustique des bouchons [27]	Images IRM acquises sur un sujet masculin de 28 ans (Benacchio *et al.*, 2018; Benacchio, Doutres, *et al.*, 2020)	– canal auditif réaliste entouré de tissus – avec pavillon – avec et sans tympan artificiel – non chauffé à la température du corps humain – microphone intégré, à la position de la membrane tympanique – excitation acoustique	– Tissus mous (base de polyuréthane) – Cartilage (base de polyuréthane) – Os (composite à base d'époxy)
		Figure 11 (b)	Oreille tronquée de forme cylindrique pour mesurer l'atténuation acoustique des bouchons	Empreintes de plus ou moins grande taille de canaux auditifs de participants vivants (Poissenot-Arrigoni, Law, Berbiche, Sgard, *et al.*, 2022)	– 3 conduits auditifs réalistes dont la géométrie respective est représentative de 3 sous-groupes différents d'un groupe de participants et qui se démarquent par l'atténuation mesurée lors du port de différents types de bouchons du commerce – sans pavillon – sans tympan artificiel – chauffé à la température du corps humain – pas de microphone intégré – excitation acoustique	Pas de tissus : conduits auditifs en résine flexible. La dureté des oreilles artificielles imprimées en 3D était de Shore 40A. Ceci est un peu plus souple que le cartilage humain et plus dur que la peau.

[27] Voir aussi Benacchio, Doutres et Sgard, 2019; Benacchio, Doutres, *et al.*, 2020; Benacchio *et al.*, 2022, 2023; Benacchio, Poissenot-Arrigoni, *et al.*, 2019; Benacchio, Sgard, *et al.*, 2020; Luan *et al.*, 2021; Luan, Sgard, Nélisse, *et al.*, 2019; Poissenot-Arrigoni *et al.*, 2019.

		**Figure 11** (c)	Oreille tronquée de forme cylindrique pour mesurer l'atténuation acoustique des bouchons [28]	Images IRM et CBCT acquises sur un sujet masculin de 40 ans (Xu *et al.*, 2021b)	– canal auditif réaliste entouré de tissus – avec pavillon – sans tympan artificiel – non chauffé à la température du corps humain – pas de microphone intégré – oreille insérée dans une tête artificielle en métal pour garantir que le son ne passe pas par les frontières du domaine tronqué – excitation acoustique	– Tissus mous (Silicone) – Os (Résine dure) – pas de cartilage
	 	**Figure 11** (d)	Oreille tronquée de forme cylindrique très simplifiée pour évaluer l'atténuation acoustique des bouchons (Carillo *et al.*, 2024; Luan, Sgard, Benacchio, *et al.*, 2019)[29]	Simulateur d'oreille d'ATF du commerce (ex IEC-60318-4), mais adaptable à des canaux auditifs de forme réaliste	– canal auditif cylindrique entouré d'une couche de peau, inséré dans un tube à ondes stationnaires, traditionnellement utilisé pour caractériser les propriétés acoustiques des matériaux absorbants – sans tympan artificiel, mais intégration de l'effet associé en post-traitement – non chauffé à la température du corps humain – microphones intégrés – excitation acoustique	– Peau (silicone) – Tympan=condition d'impédance acoustique
 		**Figure 11** (e)	Oreille tronquée 2D axisymétrique et 3D réaliste pour calculer l'EO des bouchons (Carillo *et al.*, 2020b, Carillo, Doutres, *et al.*, 2020b, 2021a, 2021b, 2021c; Carillo, Sgard, *et*	Images de cryosection d'un cadavre masculin (Brummund *et al.*, 2014; Brummund *et al.*, 2015)	– canal auditif cylindrique à section variable et canal auditif réaliste, entourés de tissus – sans pavillon – avec tympan artificiel – excitation mécanique	– Peau – tissus équivalent à la partie « tissus mous + cartilage » de l'oreille et appelé « Cartilage » – Os – Tympan=condition d'impédance acoustique

[28] Voir Ezzaf *et al.*, 2023.

[29] Voir aussi Luan, Sgard, Nélisse *et al.*, 2019.

			al., 2021)[30]. Le modèle 2D axisymétrique de forme cylindrique a été adapté du modèle 3D en utilisant des données géométriques moyennes extraites de la littérature.			
		**Figure 11** (f)	Oreille tronquée de forme cylindrique pour évaluer l'EO des bouchons (Carillo, Sgard, *et al.*, 2021)[31]	Images IRM acquises sur un sujet masculin de 28 ans (Benacchio *et al.*, 2018; Benacchio, Doutres, *et al.*, 2020)	– canal auditif réaliste entouré de tissus – avec pavillon – sans tympan artificiel – non chauffé à la température du corps humain – microphone intégré, à la position de la membrane tympanique – excitation mécanique par pot vibrant de la partie osseuse	– Tissus mous (base de polyuréthane) – Cartilage (base de polyuréthane) – Os (composite à base d'époxy)
		**Figure 11** (g)	Oreille tronquée simplifiée de forme parallélépipédique pour évaluer l'EO des bouchons (Doutres *et al.*, 2025)[32] Adaptation de la géométrie des testeurs (a) et (f), à laquelle on a apporté des simplifications géométriques.	Images IRM acquises sur un sujet masculin de 28 ans (Benacchio *et al.*, 2018; Benacchio, Doutres, *et al.*, 2020)	– canal auditif cylindrique à section variable entouré de tissus – sans tympan artificiel – non chauffé à la température du corps humain – microphone intégré, à la position de la membrane tympanique – excitation mécanique par pot vibrant sur les tissus mous	– Tissus mous (base de polyuréthane) – Cartilage (base de polyuréthane) – Os (composite à base d'époxy)
		**Figure 11** (h)	Tête complète pour évaluer l'atténuation acoustique et l'EO des bouchons (Carillo, Sgard *et*	Images IRM et CBCT acquises sur un sujet masculin de 40 ans (Xu *et al.*, 2021b)	– tête entière avec canaux auditifs réalistes – oreille moyenne et interne non considérées – avec ou sans tympan artificiel – non chauffé à la température du corps humain – pas de microphone intégré	– Tissus mous (base de polyuréthane) – Cartilage (base de polyuréthane) – Cerveau (base de polyuréthane) – Os (composite à base d'époxy)

[30] Voir aussi Carillo, 2021; Carillo *et al.*, 2019a, 2019b, 2020a, 2020c.

[31] Voir aussi Benacchio, Doutres et Sgard, 2019; Benacchio, Poissenot-Arrigoni, *et al.*, 2019; Poissenot-Arrigoni *et al.*, 2019.

[32] Voir aussi Cyr-Desroches, 2021; Doutres *et al.*, 2024; Luan *et al.*, 2022.

			al., 2021; Kersten *et al.*, 2024a; Xu *et al.*, 2021b)[33]		– excitation mécanique par ossivibrateur et excitation acoustique	– Fluide cérébrospinal (eau distillée) – Si tympan présent dans modèle: condition d'impédance acoustique

[33] Voir aussi Kersten *et al.*, 2024b; Sgard *et al.*, 2018; Sgard, Poissenot-Arrigoni, Melo *et al.*, 2024; Sgard *et al.*, 2023; Xu, 2022; Xu *et al.*, 2020, 2021a, 2023, Xu *et al.*, 2019.

Même si les testeurs d'atténuation acoustique illustrés dans la **Figure 11** (b-c) et (h) n'ont pas encore fait l'objet de publications à comité de lecture, en raison de difficultés techniques, toujours non résolues, pour valider les testeurs virtuels par rapport à leurs équivalents expérimentaux, ou pour obtenir des comparaisons satisfaisantes entre résultats des testeurs expérimentaux et mesures effectuées sur des participants. Néanmoins, il nous a paru important de mentionner ces testeurs car ils ont été développés dans le cadre du projet, offrent un potentiel important et ont évolué significativement au fil du temps.

Les sections **Atténuation acoustique** et **Effet d'occlusion** présentent plus en détail les contributions du projet concernant ces deux caractéristiques acoustiques.

Atténuation acoustique

Modélisation du tympan artificiel

Pour reproduire l'effet acoustique de l'oreille moyenne et interne dans le canal auditif dans les testeurs d'atténuation sonore et d'effet d'occlusion, il est nécessaire d'ajouter un tympan artificiel à l'extrémité médiale du canal auditif. À l'instar des ATFs du commerce, utilisées pour la protection auditive, ce tympan artificiel peut prendre la forme d'un simulateur d'oreille aussi appelé coupleur. Les coupleurs commerciaux sont typiquement constitués d'un cylindre principal couplé à des résonateurs acoustiques, avec un microphone à son extrémité qui correspond à la position de la membrane tympanique. Ce coupleur se fixe au bout du canal auditif artificiel. La présence de résonateurs permet d'ajuster l'impédance acoustique dans un plan de référence situé en amont de la membrane tympanique pour que cette dernière corresponde à celle d'un participant « moyen ». Les coupleurs existants sont conçus pour s'adapter aux ATF du commerce qui comportent des canaux auditifs cylindriques droits, mais ne peuvent être utilisés tels quels pour des testeurs plus réalistes comprenant une géométrie tortueuse de canaux auditifs. Leur conception doit alors être revue. Par ailleurs, l'effet de la variabilité de l'impédance tympanique sur l'atténuation acoustique et l'effet d'occlusion n'a pas été discuté dans la littérature. Dans une perspective de conception de testeurs de confort acoustiques, il est alors légitime de se poser la question de la pertinence d'utiliser un seul testeur reproduisant une impédance tympanique « moyenne » plutôt que plusieurs testeurs intégrant des impédances tympaniques multiples reproduisant la variabilité observée chez l'humain. Dans cette optique de conception d'un tympan artificiel basé sur le principe des coupleurs existants, l'équipe a fait appel à la modélisation. Ainsi, un nouveau modèle a été proposé, pour simuler l'impédance d'un simulateur d'oreille dédié à la protection auditive (IEC 60318-4) à partir des paramètres géométriques de ce dernier (Luan, Sgard, Benacchio, *et al.*, 2019). Ce modèle, basé sur une matrice de transfert, a été validé par des simulations par éléments finis et des mesures expérimentales. Il améliore la précision des simulations, notamment au-dessus de 3 kHz, par rapport aux modèles paramétriques classiques. Il a ensuite été appliqué à la simulation de l'atténuation d'un bouchon d'oreille

dans un dispositif de test acoustique, démontrant sa supériorité pour des fréquences supérieures à 6 kHz. L'étude a aussi quantifié l'impact des incertitudes géométriques du simulateur sur les résultats. Ce modèle de matrices de transfert a été utilisé pour la vérification du testeur virtuel de la **Figure 11** (d). Il offre également la perspective de concevoir de nouveaux tympans artificiels physiques capables de reproduire la variabilité de l'impédance tympanique observée chez les humains, en ajustant les paramètres géométriques des résonateurs[34], et d'évaluer, grâce à des études paramétriques, l'influence de la variabilité de l'impédance tympanique sur l'atténuation sonore et l'effet d'occlusion.

Détermination du nombre de conduits auditifs artificiels pour représenter la variabilité d'atténuation observée chez un groupe de participants

La plupart des ATF dédiées à la mesure de l'atténuation sonore sont équipées de conduits auditifs cylindriques droits de taille unique, considérés comme représentatifs de la morphologie moyenne des êtres humains, et ne peuvent donc pas évaluer comment les protecteurs auditifs s'adaptent à différentes morphologies de canaux auditifs. Dans la référence (Poissenot-Arrigoni, Law, Berbiche, Sgard, *et al.*, 2022), une méthodologie visant à regrouper les canaux auditifs en fonction de leur morphologie dans le but de concevoir des oreilles artificielles dédiées à la mesure de l'atténuation sonore a été développée et appliquée à un échantillon de canaux auditifs de personnes au travail canadiennes (c.-à-d., participants de l'étude de terrain présentée à la section 1.2.1). Des indicateurs morphologiques ont été mesurés ou calculés sur les empreintes des canaux auditifs, et l'atténuation de six protecteurs auditifs différents a été mesurée sur ces mêmes conduits auditifs. Un algorithme basé sur l'intelligence artificielle et une analyse statistique ont été utilisés pour évaluer les groupes de conduits auditifs les plus pertinents pour aider à concevoir des oreilles artificielles réalistes dédiées à la mesure de l'atténuation des protecteurs auditifs. Les données morphologiques de l'échantillon de population considéré dans cette étude se sont avérées cohérentes avec la littérature, et des corrélations significatives entre certains indicateurs morphologiques et l'atténuation des protecteurs auditifs ont été trouvées. Pour cet échantillon de population, la meilleure proposition de regroupement a été obtenue en utilisant les trois indicateurs morphologiques suivants comme entrées pour l'algorithme « k-mean » : (i) la circonférence de la section transversale au premier coude (ii) le rapport isopérimétrique de la section transversale au premier coude, et (iii) la distance entre l'entrée et le deuxième coude. Cette proposition de regroupement se compose de trois groupes différents de conduits auditifs (**Figure 11** (b)). Il a été constaté que le groupe qui comprend les conduits auditifs les plus petits en circonférence et les plus circulaires est également le groupe où les atténuations acoustiques mesurées sont les plus élevées, tandis que pour le groupe qui contient les conduits auditifs les plus grands et les plus ovoïdes l'atténuation acoustique mesurée plus faible. Cette observation est cohérente

[34] Voir aussi Benacchio, Doutres, *et al.*, 2020; Benacchio *et al.* 2023.

avec la corrélation morphologie/atténuation observée à la fois dans la littérature et confirmée par cette étude.

Testeur basé sur une oreille tronquée réaliste (**Figure 11** (a-c))

Le premier testeur de la **Figure 11** (a) comprend une version expérimentale et son homologue virtuel. Il présente un canal auditif réaliste ainsi que des tissus environnants reconstruits à partir d'images médicales d'un participant (Benacchio, Doutres, *et al.*, 2020)[35]. Son évaluation repose sur la comparaison des prédictions fournies par le testeur virtuel avec celles obtenues à l'aide du testeur expérimental associé, aussi bien en oreille ouverte qu'en oreille occluse par un bouchon cylindrique en acier. Ce dernier présente l'avantage d'être indéformable et de posséder des propriétés bien caractérisées. Bien que le modèle numérique reproduise globalement les tendances observées expérimentalement, notamment en termes de niveaux de pression en oreille ouverte et occluse ainsi que d'atténuation, certaines différences persistent dans certaines bandes de fréquence. Une optimisation des propriétés des matériaux dans le modèle par éléments finis pourrait améliorer cette correspondance. Par ailleurs, le bouchon en acier pose des défis liés aux conditions de contact avec les tissus environnants. L'utilisation d'un bouchon plus conventionnel, tel qu'un bouchon qui est moulé en silicone, pourrait faciliter l'évaluation du testeur. Enfin, la perte par insertion simulée suit une évolution comparable aux courbes d'atténuation mesurées sur des sujets humains : une augmentation de l'atténuation jusqu'à la fréquence de résonance du conduit ouvert, suivie d'une diminution. Cependant, le testeur virtuel n'a pas été comparé au participant ayant servi de référence pour sa conception[36].

Pour contourner certains des problèmes liés à l'oreille artificielle tronquée précédente (défauts de fabrication et perte par insertion de l'oreille artificielle insuffisante), une version simplifiée illustrée à la **Figure 11** (c), dépourvue de cartilage, a été envisagée. Elle a été conçue à partir d'un participant différent et fabriquée au laboratoire ICAR à l'aide de l'impression 3D et d'une technique de moulage des tissus mous. Cette oreille artificielle est intégrée dans un boîtier métallique cylindrique, simulant une tête artificielle, afin de limiter les transmissions parasites par les parois latérales et arrière de l'oreille.

[35] Voir aussi Benacchio, Poissenot-Arrigoni, *et al.*, 2019; Poissenot-Arrigoni *et al.*, 2019; Sgard, Kersten, *et al.*, 2024.

[36] Le testeur expérimental a également été évalué par comparaison avec le participant de référence qui a servi de modèle à l'oreille artificielle, ainsi qu'avec une ATF commerciale (Benacchio, Poissenot-Arrigoni, *et al.*, 2019), mais ce travail n'a pas fait l'objet d'une évaluation par les pairs. Des mesures d'atténuation pour 2 types de bouchons d'oreilles ont été réalisées à l'aide du système 3M™ EARfit à 3 profondeurs d'insertion. Les résultats montrent que l'oreille artificielle offre une meilleure reproduction de l'atténuation pour les bouchons d'oreilles en mousse à comprimer par rapport à l'ATF commerciale. Cependant, la mesure précise de l'atténuation des bouchons d'oreilles en mousse prémoulée à tige reste difficile tant pour l'ATF que pour l'oreille artificielle. Ces écarts peuvent être attribués à (i) des défauts matériels, tels que la dégradation des tissus mous synthétiques dans le canal auditif en raison de parois trop minces et de conditions de surface irrégulières, qui peuvent induire des fuites acoustiques (ii) une perte par insertion de l'oreille artificielle insuffisante (iii) le fait que les matériaux synthétiques à température ambiante imitent les tissus biologiques à température corporelle, ce qui entraîne des écarts potentiels (iv) l'absence de système de chauffage et de simulateur de tympan.

Les matériaux synthétiques ont été sélectionnés pour leurs propriétés mécaniques, proches de celles des tissus biologiques. Les résultats préliminaires montrent que l'atténuation des bouchons mesurée avec l'oreille artificielle est plus faible aux basses fréquences que celle observée sur le participant humain correspondant, quelle que soit la profondeur d'insertion. Aux fréquences plus élevées, les résultats sont plus proches, mais peuvent être supérieurs ou inférieurs selon la profondeur d'insertion. Ces écarts sont attribués à l'absence de système de chauffage, au fait que les matériaux artificiels à température ambiante imitent les tissus biologiques à température corporelle, ainsi qu'à l'absence de simulateur de tympan et de cartilage. Ce dispositif expérimental n'a pas encore fait l'objet d'une publication scientifique évaluée par les pairs.

Les testeurs des **Figure 11** (a) et (c) reproduisent l'oreille artificielle d'un individu spécifique. En revanche, le testeur expérimental de la **Figure 11** (b) a été conçu pour intégrer plusieurs oreilles artificielles présentant des géométries d'oreille artificielle réalistes, mais une structure anatomique simplifiée, adaptée à la mesure de l'atténuation sonore et représentative d'un échantillon de travailleurs. Comme mentionné précédemment, une analyse anthropométrique d'un échantillon de conduits auditifs a permis d'identifier trois groupes caractérisés par des morphologies distinctes (Poissenot-Arrigoni, Law, Berbiche, Sgard, *et al.*, 2022). Pour chaque groupe, le conduit auditif le plus proche du barycentre a été sélectionné comme modèle représentatif. Trois oreilles artificielles ont ainsi été fabriquées à l'aide de l'impression 3D, en utilisant une résine élastique de Shore 00=90 à température ambiante. Chauffées à 37°C, ces oreilles ont été évaluées avec plusieurs bouchons d'oreilles à l'aide du système « 3M™ EARfit Dual-Ear Validation System », en les comparant aux mesures effectuées sur des participants lors de sessions de formation sur le terrain. Pour chaque bouchon d'oreille, huit mesures ont été réalisées, avec des insertions, variant entre une profondeur standard et une insertion plus profonde. Les résultats montrent que le classement des niveaux d'atténuation sonore obtenu avec les oreilles artificielles est globalement cohérent avec celui observé chez les participants. Toutefois, si ces testeurs permettent de représenter de manière satisfaisante la variabilité de l'atténuation mesurée pour les bouchons d'oreilles prémoulés, ils présentent des limites pour les bouchons en mousse à comprimer et ceux en mousse prémoulée à tige, où des écarts d'amplitude significatifs sont observés. Ces différences peuvent être attribuées à plusieurs facteurs : une trop grande rigidité des tissus artificiels, l'absence de cartilage, de pavillon et de tympan artificiel, ainsi que la présence possible de transmissions parasites par les frontières latérales et arrière des oreilles tronquées.

Testeurs basés sur une oreille tronquée simplifiée et l'utilisation d'un tube d'impédance (**Figure 11** (d))

Bien que les ATF commerciales soient utiles pour évaluer l'atténuation sonore des bouchons d'oreilles, leur utilisation présente des inconvénients, notamment :

- **Coût et lourdeur:** Les ATF nécessitent des installations expérimentales coûteuses et encombrantes, comme des chambres réverbérantes ou anéchoïques.

- **Variabilité morphologique:** Les ATF utilisent généralement un conduit auditif de taille unique, ce qui ne tient pas compte des variations de la morphologie du conduit auditif entre les individus et peut entraîner des différences importantes dans l'atténuation personnelle
- **Compréhension limitée :** les mesures de l'ATF offrent une compréhension limitée de l'influence des propriétés acoustiques intrinsèques des bouchons d'oreilles sur l'atténuation.

Pour répondre à ces défis, une nouvelle méthode pour estimer l'atténuation des bouchons d'oreilles a été développée (Carillo, Doutres, *et al.*, 2024). La technique permet de déterminer les propriétés acoustiques d'un bouchon (transmission et réflexion) inséré dans une oreille tronquée simplifiée, constituée d'un conduit auditif artificiel cylindrique avec une couche peau, le tout placé dans un tube d'impédance. Ces propriétés acoustiques sont obtenues à partir de mesures acoustiques en amont et en aval de l'oreille tronquée, ainsi qu'à l'aide de deux charges acoustiques distinctes. Un testeur expérimental associé à cette méthode a ainsi été conçu. Les propriétés acoustiques du bouchon sont ensuite intégrées, en post-traitement, dans un modèle analytique unidimensionnel afin de calculer la perte par insertion du bouchon. Cette dernière est décomposée en deux termes : la perte par transmission, qui dépend uniquement des propriétés du bouchon et de ses conditions aux limites (profondeur d'insertion, peau du canal auditif), et un terme de correction qui dépend des coefficients réflexions de la face médiale du bouchon, de l'entrée du canal auditif et de la terminaison médiale du canal auditif.

Parallèlement, deux testeurs virtuels ont été développés sur la base de modèles numériques EF du testeur expérimental et d'une ATF, en supposant connues les propriétés mécaniques du bouchon et de la peau. Le premier a permis de simuler la mesure pour estimer les propriétés acoustiques du bouchon, lesquelles ont ensuite été intégrées dans le modèle analytique unidimensionnel afin de calculer la perte par insertion. Le second a permis de simuler la perte par insertion sur l'ATF et d'évaluer numériquement l'influence de la nature du champ excitateur sur l'atténuation sonore (onde plane en incidence normale versus champ diffus). Le modèle analytique unidimensionnel utilisé pour calculer la perte par insertion à partir des propriétés acoustiques du bouchon est vérifié à partir des résultats fournis par le premier testeur virtuel, qui joue le rôle de référence. Les résultats obtenus avec les deux testeurs concordent et indiquent que l'atténuation d'un bouchon obtenue dans le tube est représentative de celle mesurée dans un champ acoustique plus réaliste. Par ailleurs, des comparaisons expérimentales, portant sur six types de bouchons, entre les résultats obtenus avec la technique de mesure proposée et ceux issus d'une ATF commerciale montrent que la méthode est validée. L'étude a également analysé l'effet du champ acoustique sur l'atténuation sonore, en comparant les résultats obtenus avec une onde plane pour le testeur expérimental et avec un champ diffus pour l'ATF. Les détails

techniques pour optimiser la mesure ont également été discutés. La principale limitation de la méthode concerne sa gamme de fréquences de travail limitée à environ 6,5 kHz.

Cette méthode offre plusieurs avantages par rapport aux ATF:

- **Simplicité :** La technique utilise un tube d'impédance disponible dans le commerce, éliminant ainsi le besoin d'une ATF et d'une chambre acoustique.
- **Prise en compte de la variabilité du conduit auditif :** La méthode permet d'intégrer facilement différentes géométries du conduit auditif en utilisant différents supports d'échantillons.
- **Meilleure compréhension des phénomènes physiques intervenant dans l'atténuation sonore** : La méthode décompose la perte par insertion du bouchon en un terme de perte par transmission du bouchon et un facteur qui dépend des caractéristiques des conduits auditifs ouverts et occlus. Cette décomposition permet de mieux comprendre le fonctionnement de l'atténuation sonore et ainsi d'agir de façon plus efficace pour la contrôler.
- **Intégration de l'impédance du tympan :** La méthode permet d'inclure directement la variabilité de l'impédance du tympan lors du post-traitement. En effet, une fois les propriétés acoustiques du bouchon (transmission et réflexion) déterminées, il est possible de calculer a posteriori l'atténuation du bouchon qui existerait pour n'importe quelle impédance acoustique tympanique située à l'extrémité du canal auditif.

Effet d'occlusion

Utilisation d'une méthode simple et robuste pour mesurer l'EO sur sujets humains

Il n'existe actuellement aucune méthode normalisée pour mesurer l'EO objectif chez les participants. Après avoir comparé les différentes approches disponibles, une méthode basée sur la mesure des niveaux de pression acoustique à l'extérieur et à l'intérieur du conduit auditif occlus par le protecteur, également appelée méthode de réduction du bruit, a été jugée adaptée et prometteuse (Nélisse *et al.*, 2021; Saint-Gaudens *et al.*, 2022)[37]. Cette méthode, combinée à l'utilisation de la propre voix du participant, permet une évaluation simple et robuste de l'EO objectif, aussi bien sur le terrain qu'en laboratoire. En effet, la voix du participant constitue une source de stimulation facile à utiliser pour induire l'EO. Par ailleurs, lorsque la voix du participant est associée à la méthode de réduction du bruit, le choix du contenu vocal et du niveau d'effort vocal reste à la discrétion de l'expérimentateur, sans compromettre la fiabilité des résultats.
Cette méthode de mesure a été exploitée par Carillo pour déterminer l'EO objectif sur un groupe de participants (Carillo *et al.*, 2025).

Testeurs basés sur des oreilles tronquées (**Figure 11** (e-g))

[37] Voir aussi Saint-Gaudens, 2025; Saint-Gaudens, Nélisse, Doutres, *et al.*, 2019; Saint-Gaudens, Nélisse, Sgard et Doutres, 2023a, 2023b; Saint-Gaudens, Nélisse, Sgard, *et al.*, 2019.

Les testeurs virtuels d'oreilles tronquées de la **Figure 11** (e) ont été utilisés pour mieux comprendre les phénomènes physiques fondamentaux sous-jacents à l'EO. Pour ces testeurs, l'ensemble des conditions aux limites mécaniques et excitations appliquées a été ajusté pour reproduire un modèle de vibration plausible de la paroi du conduit auditif (Carillo *et al.*, 2020b) ou obtenir des résultats de simulation concordant avec des données expérimentales de la littérature sur l'EO mesuré sur des groupes de sujets humains (Carillo, Doutres, *et al.*, 2021a; Carillo, Sgard, *et al.*, 2021). Ces testeurs virtuels ont permis de montrer que l'EO était principalement induit par le fait que l'occlusion du conduit auditif rend la cavité d'air formée entre le dispositif d'occlusion et le tympan plus difficile à comprimer par la paroi vibrante du conduit. La cavité d'air occluse s'oppose alors davantage à cette vibration, ce qui augmente la pression acoustique générée dans le conduit occlus. Ces modèles ont également permis de revisiter et d'éclaircir l'interprétation couramment adoptée dans la littérature de l'effet d'occlusion, notamment l'influence du filtre passe-haut du canal auditif ouvert et la manière dont cet effet est modifié par son occlusion, une interprétation qui, bien que répandue, souffre de plusieurs ambiguïtés (Carillo *et al.*, 2021b). Les premiers modèles numériques 3D d'oreilles cadavériques tronquées ont permis de mettre en évidence l'influence de la distribution vibratoire de la paroi du conduit sur l'EO (Carillo *et al.*, 2020b). La façon dont la paroi du conduit auditif vibre influence donc l'EO et cette vibration peut être vue comme sa source. La distribution spatiale de la vibration normale du conduit auditif ouvert a été caractérisée, dans les basses fréquences, par la position de son barycentre le long de l'axe curviligne du conduit (Carillo, Doutres, *et al.*, 2021c). Les modèles EF 2D axisymétriques ont ensuite permis d'étudier les mécanismes de contribution des bouchons d'oreilles à l'EO (Carillo, Doutres, *et al.*, 2021a; Carillo, Sgard, *et al.*, 2021). Deux mécanismes été mis en évidence : (i) un effet de Poisson induit par la composante normale de la vibration pariétale du conduit auditif et (ii) un mouvement longitudinal provoqué par la composante tangentielle de cette vibration.

Le testeur virtuel présenté dans la **Figure 11** (f) a été partiellement validé par rapport à son équivalent expérimental (Benacchio, Doutres, *et al.*, 2020; Carillo, Sgard, *et al.*, 2021) dans le cas d'un bouchon spécial en acier. La simulation de l'OE objectif reproduit approximativement la pente des données mesurées. Cependant, des écarts significatifs subsistent dans certaines bandes de fréquence. Ces divergences sont attribuées à des différences dans les propriétés des matériaux, les conditions aux limites, les conditions de couplage ou encore les charges appliquées, entre la configuration expérimentale et la simulation. Pour d'autres types de bouchons, la validation du testeur virtuel n'a pas abouti. En outre, les évaluations du testeur expérimental par rapport à des groupes de participants n'ont pas donné de résultats satisfaisants. Enfin, le testeur expérimental n'a pas été confronté directement au sujet humain à partir duquel il a été conçu.

En raison des difficultés rencontrées avec le testeur présenté dans la **Figure 11** (f), un nouveau testeur, illustré dans la **Figure 11** (g), a été conçu à partir de celui-ci afin de simplifier le processus de validation (Doutres *et al.*, 2025). Ce nouveau dispositif allie une

conception géométrique simple, mais réaliste à une sélection minutieuse des matériaux et une fabrication précise, dans le but de reproduire fidèlement les caractéristiques clés nécessaires à l'étude de l'effet d'occlusion. Il intègre également une excitation et des conditions aux limites plus facilement simulables dans le modèle. Sa forme parallélépipédique facilite par ailleurs les manipulations expérimentales. Un testeur virtuel a été développé en premier lieu, suivi par la fabrication de son équivalent expérimental. Après une calibration rigoureuse, le testeur virtuel a été validé avec succès par rapport au testeur expérimental, notamment en comparant les fonctions de transfert de l'oreille ouverte et de l'oreille occluse par un bouchon en silicone. Le testeur expérimental a également été évalué avec succès par rapport à des mesures réalisées sur un groupe de participants. Ce dispositif s'est révélé capable de reproduire les principaux effets observés dans les mesures d'EO de plusieurs types de bouchons sur des participants, notamment (i) un EO significatif à basses fréquences, diminuant avec l'augmentation de la fréquence (ii) une réduction de l'EO avec des profondeurs d'insertion plus importantes des bouchons d'oreilles, et (iii) des différences d'EO entre plusieurs types de bouchons, particulièrement marquées pour des insertions profondes par rapport à des insertions peu profondes. Une étude numérique a également mis en évidence que l'absence de cartilage amplifie considérablement l'EO à basse fréquence. Par ailleurs, la position du cartilage influence l'EO, en particulier lorsque la partie supérieure de l'oreille artificielle est fixée. Ce testeur a notamment été utilisé pour valider un concept novateur de bouchon d'oreille à effet d'occlusion réduit, basé sur l'utilisation de métamatériaux (Carillo *et al.*, 2022b; Carillo, Sgard, Dazel, *et al.*, 2023), qui a ensuite été testé vis-à-vis de la perception et du ressenti sur sujets humains (Carillo *et al.*, 2025).

Testeurs basés sur la tête entière (**Figure 11** (h))

Un testeur virtuel a été développé à partir d'images par résonance magnétique (IRM) et de scanners tomodensitométriques (TDM) de la tête entière d'un participant. Ce testeur permet de prédire le champ de pression sonore dans les conduits auditifs, qu'ils soient ouverts ou occlus par des bouchons d'oreilles. Les images médicales ont été segmentées à l'aide d'un logiciel de traitement d'images pour reconstruire les différentes structures anatomiques de la tête indiquées dans la dernière colonne du Tableau 2. Un équivalent expérimental du testeur virtuel a également été fabriqué. Dans ce dernier, l'oreille moyenne et interne ne sont pas prises en compte. Grâce à cette démarche, une calibration et une validation rigoureuses des modèles EF utilisés pour simuler la physique sont possibles, car les simulations peuvent être comparées aux mesures effectuées sur le participant correspondant et sur le testeur expérimental associé (Carillo, Sgard, *et al.*, 2021).

Deux testeurs virtuels ont été conçus :

1. Le premier, associé au participant, intègre des propriétés des tissus basées sur la littérature scientifique et prend en compte l'effet acoustique de l'oreille moyenne et interne via une condition d'impédance acoustique au niveau du tympan.

2. Le second, associé au testeur expérimental, prend en compte les propriétés des matériaux utilisés pour le fabriquer et ne tient pas compte de l'effet acoustique de l'oreille moyenne et interne.

Le premier testeur virtuel a été validé en comparant les résultats simulés à des données expérimentales issues de la littérature sur des groupes de participants ainsi qu'à des mesures effectuées sur le participant ayant servi à son élaboration. Il permet de reproduire des effets connus tels que (i) a diminution de l'EO avec la profondeur d'insertion du bouchon et (ii) l'influence du type de bouchon sur l'EO, particulièrement notable pour des insertions profondes.

Le second testeur virtuel, quant à lui, a été validé en comparant les résultats simulés avec les données expérimentales obtenues à partir du testeur expérimental associé. Bien que les deux testeurs n'aient pas été calibrés, les comparaisons ont montré des résultats globalement satisfaisants, avec des écarts inférieurs à 5 dB. Cependant, les résultats obtenus avec le testeur expérimental présentent des divergences par rapport aux mesures effectuées sur le participant. Ces différences sont probablement dues à l'inadéquation des matériaux synthétiques utilisés pour reproduire les tissus biologiques.

Lors du développement des testeurs virtuels, plusieurs avancées significatives ont été réalisées en matière de modélisation (Kersten *et al.*, 2024a; Xu *et al.*, 2021b):

- **Prise en compte de l'air extérieur en oreille ouverte :** l'utilisation d'une couche parfaitement adaptée améliore la concordance des résultats simulés avec les données expérimentales, comparativement à une condition d'impédance de rayonnement classique

- **Effet des conditions limites à la base de la tête :** ces conditions influencent principalement l'effet d'occlusion (EO) à très basse fréquence (< 0,25 kHz).

- **Représentation de l'effet du fluide externe et de la membrane tympanique** : lorsqu'une condition d'impédance est utilisée pour modéliser l'influence du fluide externe et de la membrane tympanique sur le champ acoustique dans le conduit auditif, la formulation classique doit être adaptée pour tenir compte du mouvement global de l'entrée du canal auditif et de la membrane tympanique. Cette prise en compte induit une pression acoustique plus faible au niveau de la membrane tympanique, en particulier aux basses fréquences, et ce, aussi bien en oreille ouverte qu'en oreille occluse. Cet effet est plus marqué lorsque le conduit auditif est obstrué, ce qui entraîne une réduction de l'EO par rapport à une modélisation où seule la vibration des parois du conduit est prise en compte. Ces résultats

mettent en lumière l'importance d'intégrer les différents mécanismes contribuant à la pression sonore au niveau de la membrane tympanique, ces mécanismes pouvant expliquer certaines divergences entre données expérimentales et simulations.

Le premier testeur a été utilisé pour examiner l'effet des incertitudes liées à plusieurs facteurs sur l'EO (Xu *et al.*, 2021b)[38]:

- **Position de la stimulation sur la tête** : l'EO est peu sensible à la position globale de la stimulation (mastoïde ipsilatérale, mastoïde controlatérale, front). Toutefois, des variations subtiles dans la position de stimulation sur la mastoïde ipsilatérale peuvent contribuer à la variabilité de l'EO.

- **Position du point de mesure dans le conduit auditif** : l'EO est peu influencé par la position exacte du point de mesure dans le conduit auditif, en particulier pour des profondeurs d'insertion courantes des bouchons. Les différences entre des évaluations effectuées à la surface médiale du bouchon et au niveau du tympan sont minimes, notamment pour les insertions moyennes ou profondes. D'un point de vue expérimental, ces résultats suggèrent que l'EO, qui est souvent mesuré à la surface médiale du bouchon d'oreille pour des raisons de sécurité et de confort, constitue une bonne approximation des mesures effectuées au tympan.

- **Propriétés mécaniques des tissus** : la rigidité des tissus mous et du cartilage est un facteur majeur influençant l'EO. Cet effet dépend de la bande de fréquences étudiée, l'EO étant davantage affecté par les propriétés mécaniques des tissus mous que par celles du cartilage. Aux basses fréquences, l'EO est sensible au module de Young de l'os du crâne. Le coefficient de Poisson des tissus mous a également une influence significative sur l'EO.

Par rapport aux modèles tronqués de l'oreille externe, les testeurs virtuels basés sur la tête entière renforcent le réalisme des simulations par éléments finis (EF). Ils permettent d'intégrer le phénomène de conduction osseuse à travers toute la tête tout en évitant les problèmes de conditions aux limites associés aux modèles tronqués.

Par rapport aux autres oreilles artificielles conçues pour évaluer l'EO des PICB (Doutres *et al.*, 2025), le testeur expérimental basé sur la tête entière offre la possibilité d'étudier l'EO pour diverses positions de stimulation ainsi que pour d'autres dispositifs de protection auditive, tels que les casques antibruit. Cependant, le prototype expérimental nécessite des améliorations pour mieux correspondre aux mesures réalisées sur des participants

[38] Voir aussi Sgard *et al.*, 2023; Xu, 2022.

1.5 Tâche 3 : Étude des caractéristiques de la triade influençant les différentes dimensions du confort

Cette tâche visait à identifier les principales caractéristiques de la triade influençant les attributs des différentes dimensions du confort afin d'établir, à terme, des indices de confort objectivés. Ces indices reposent uniquement sur des caractéristiques physiques et psychosociales mesurables, liées à l'environnement, à la personne et au bouchon. Bien que cette étude ait permis d'identifier ces caractéristiques, elle n'a pas permis de valider le caractère prédictif des indices, car la construction des modèles statistiques associés a nécessité l'utilisation de l'ensemble des données disponibles.

Les bouchons d'oreilles moulés ont été exclus de cette tâche. Leur inclusion aurait nécessité que les fabricants fournissent des échantillons compatibles avec les formes de conduits auditifs simplifiées utilisées dans nos testeurs, ce qui n'a pas été possible en raison de contraintes de temps et de ressources. Par conséquent, les tests de confort ont été réalisés uniquement avec des bouchons d'oreilles jetables ou réutilisables, qui représentent les types les plus couramment utilisés au Québec. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour comprendre et explorer de manière exhaustive cette famille unique de bouchons d'oreilles moulés sur mesure à l'avenir.

Cette section s'appuie principalement sur quatre publications. La première étude (Poissenot-Arrigoni *et al.*, 2023a) exploite les données de terrain recueillies dans la tâche 1 du projet et vise à identifier des caractéristiques physiques et psychosociales de la triade qui ont une influence significative sur les principaux attributs du confort physique. La seconde étude (Poissenot-Arrigoni *et al.*, 2026) prolonge cette approche en l'appliquant aux dimensions fonctionnelle et acoustique du confort. La troisième étude (Valentin *et al.*, 2024) examine les caractéristiques mécaniques influençant le confort physique et la douleur perçue par un groupe de participants en laboratoire. Enfin, la quatrième étude (Carillo *et al.*, 2025), également menée en laboratoire sur un groupe de participants, se concentre spécifiquement sur la dimension acoustique du confort à travers l'EO.

1.5.1 Analyses statistiques

Afin d'identifier les caractéristiques de la triade qui ont un impact significatif sur les attributs du confort, une série d'analyses statistiques a été réalisée pour chaque attribut ou sous-dimension du confort sélectionnés. La modélisation linéaire à effets mixtes a pu être utilisée puisque chaque participant a testé différents bouchons à diverses reprises, ce qui a permis de tenir compte des variations individuelles et des mesures manquantes.

Lorsque le nombre de variables indépendantes considérées est grand (comme décrit dans la section 1.3), une analyse préliminaire a été réalisée indépendamment pour chaque composante de la triade. Cette approche a permis de limiter les variables

considérées et a conduit à des résultats statistiques plus solides. De plus, elle a permis d'évaluer l'effet des caractéristiques de chaque composante de la triade sur le confort. Les variables de chacune des composantes de la triade ayant influencé les attributs ou sous-dimensions du confort ont été identifiées et regroupées pour une analyse globale, qui a donc pris en compte les variables des trois composantes de la triade ayant montré une influence dans les analyses préliminaires. La composante de la triade « personne », comportant 27 caractéristiques, a été analysée plus en détail en la divisant en deux sous-composantes : morphologique et non-morphologique.

1.5.2 Caractéristiques de la triade influençant le confort physique

La première étude (Poissenot-Arrigoni *et al.*, 2023a) visait à identifier les caractéristiques physiques et psychosociales des trois composantes de la triade qui ont une influence significative sur les principaux attributs du confort physique induit par les bouchons d'oreilles jetables et réutilisables. Les principaux attributs du confort physique considérés ici étaient des items généraux et explicatifs tels que la « douleur », la « gêne physique », la « sensation que l'embout pousse dans les oreilles » et la « sensation d'irritation ». Des mesures objectives et des questionnaires ont été utilisés pour évaluer les caractéristiques de la triade (personne/environnement/bouchon) dans le cadre de l'étude de terrain décrite dans la section 1.2.1.

Les résultats obtenus grâce à des modèles linéaires à effets mixtes ont révélé que diverses caractéristiques physiques de la triade ont un impact significatif sur ces quatre principaux attributs du confort physique. Les variables caractérisant le bouchon d'oreille[39] qui influencent tout ou une partie de ces attributs sont la force radiale, la force d'extraction, le coefficient de frottement obtenus pour un diamètre de 9mm et la présence ou l'absence d'une tige sur le bouchon. Notamment, les bouchons d'oreilles avec une force radiale importante et un coefficient de frottement élevé étaient associés à un plus grand inconfort physique alors que ceux ayant une force d'extraction plus élevée étaient perçus comme moins douloureux. Deux bouchons en mousse à comprimer avec des forces radiales de 4,45 N et 4,70 N ont été jugés plus confortables que des bouchons avec tige (bouchons en mousse prémoulée à tige et bouchons prémoulés) et un bouchon en mousse à comprimer caractérisé par une force radiale de 6,50 N. Par ailleurs, les bouchons d'oreilles à tige ont été perçus comme plus inconfortables que les bouchons d'oreilles en mousse à comprimer.

De plus, l'étude a révélé d'autres caractéristiques importantes affectant le confort physique des bouchons d'oreilles. Les participants avec un conduit auditif dont la section d'entrée avait un ratio isopérimétrique important et était davantage circulaire qu'elliptique ont éprouvé plus de gêne physique et de douleur avec leurs bouchons d'oreilles.

[39] Considérés comme des caractéristiques de la composante bouchon de la triade dans les publications et comme caractéristiques de la phase d'interaction (caractéristiques du système couplé oreille/bouchon) dans ce rapport, voir section 1.4.

Cela suggère qu'une entrée plus circulaire du canal auditif peut favoriser une insertion profonde du bouchon d'oreille, entraînant une sensibilité et une gêne accrues. De plus, les participants habitués à porter des bouchons de la même famille que ceux testés pendant la semaine de test ont signalé un inconfort physique réduit. Fait intéressant, à l'exception de l'aspect de l'habitude, les autres caractéristiques psychosociales de la triade ont eu un impact minimal sur le confort physique. Cela simplifie la tâche des fabricants, leur permettant de s'appuyer sur des variables mesurables de manière objective pour concevoir des bouchons confortables pour cette dimension physique.

La troisième étude (Valentin *et al.*, 2024) a mis en évidence plusieurs caractéristiques mécaniques influençant le confort physique et la douleur perçue. Elle a montré que (i) les bouchons à tige génèrent davantage d'inconfort et de douleur que les bouchons en mousse à comprimer (ii) une force radiale élevée est associée à une augmentation de l'inconfort et de la douleur (iii) un coefficient de friction plus élevé accentue également l'inconfort et la douleur, et (iv) à l'inverse, une force d'extraction plus importante tend à réduire l'inconfort et la douleur. Ces résultats rejoignent ceux obtenus dans l'étude de terrain (Poissenot-Arrigoni *et al.*, 2023a), renforçant ainsi la cohérence des observations entre les contextes de laboratoire et de terrain.

1.5.3 Caractéristiques de la triade influençant les dimensions fonctionnelle et acoustique du confort

Cette seconde étude avait pour objectif d'identifier les caractéristiques physiques et psychosociales des composantes de la triade qui ont une influence significative sur les dimensions fonctionnelle et acoustique du confort des bouchons d'oreilles (Poissenot-Arrigoni *et al.*, 2026). Plus précisément, quatre sous-dimensions conceptuelles[40] associées à la dimension confort fonctionnel ont été analysées (« insertion », « retrait », « protection contre le bruit » et « impact sur le travail ») ainsi que deux sous-dimensions acoustiques conceptuelles associées à la perception des « Bruits externes » (c.-à-d. intelligibilité des sons utiles) et des « Bruits internes » (c.-à-d. effet d'occlusion).
La méthodologie d'évaluation des caractéristiques de la triade est similaire à celle décrite par (Poissenot-Arrigoni *et al.*, 2023a).

Une analyse descriptive des variables indépendantes et dépendantes révèle que les participants ont une grande expérience des protections auditives et perçoivent généralement les bouchons d'oreilles testés comme raisonnablement confortables dans toutes les sous-dimensions d'intérêt. Suivant l'approche de (Poissenot-Arrigoni *et al.*, 2023a), des modèles linéaires à effets mixtes ont permis d'identifier les caractéristiques de la triade qui influencent le plus significativement les différents facteurs.

Les résultats indiquent que le facteur « personne » de la triade exerce une influence prédominante sur les dimensions fonctionnelle et acoustique du confort des bouchons

[40] Voir section 1.2.1 concernant la détermination de ces sous-dimensions conceptuelles.

d'oreilles. La majorité des caractéristiques impliquées sont liées à la morphologie du conduit auditif ou à l'expérience antérieure avec les PICB. Concernant l'expérience, les individus ayant une utilisation plus fréquente des bouchons d'oreilles au travail tendent à formuler des évaluations moins favorables. À l'inverse, le fait d'utiliser de manière cohérente un bouchon appartenant à la même famille que celui testé durant la semaine d'étude a un effet positif sur la perception du confort, tant sur le plan fonctionnel qu'acoustique. Par ailleurs, les caractéristiques morphologiques du conduit auditif ont démontré un impact significatif à modéré sur les deux dimensions du confort. Bien que ces effets soient complexes à analyser, leur diversité souligne deux considérations majeures : (1) la forme et la taille du conduit auditif de l'utilisateur sont des facteurs clés pour assurer un ajustement personnalisé et confortable, ce qui appelle à approfondir les recherches sur la compatibilité morphologique entre les bouchons d'oreilles jetables ou réutilisables et les géométries représentatives du conduit auditif ; (2) les oreilles artificielles utilisées pour mesurer les propriétés acoustiques des bouchons, telles que l'atténuation sonore ou l'effet d'occlusion, devraient reproduire la complexité anatomique et la variabilité interindividuelle du conduit auditif humain. Enfin, l'étude révèle que la latéralité manuelle, l'asymétrie bilatérale de la forme du conduit auditif et la présence de pertes auditives ont un impact significatif sur les dimensions acoustique et fonctionnelle du confort. Ces facteurs ne devraient donc pas être négligés lors de la phase de conception des bouchons d'oreilles ni dans les formations relatives à leur ajustement et à leur utilisation.

1.5.4 Objectivation de l'effet d'occlusion

En utilisant des modèles linéaires à effets mixtes, l'étude en laboratoire de (Carillo *et al.*, 2025) présentée dans la section 1.2.2, a constaté que la perception de l'amplification sonore à basse fréquence était principalement déterminée par l'EO objectif (EO_{obj}) dans les bandes de fréquence 125 Hz et 500Hz, tandis que le jugement du naturel de la voix était également significativement influencé par l'EO objectif à 4 kHz et la caractéristique psychosociale de familiarité avec l'expérimentateur. Plus spécifiquement, quand l'EO_{obj} entre 125 Hz et 500Hz augmente, l'EO_{perc} (perception) et l'$EO_{véc}$ (vécu, caractère non naturel de la voix) augmentent alors que quand l'EO objectif à 4000Hz augmente, l'EO_{perc} et l'$EO_{véc}$ diminuent. Les participants connaissant l'expérimentateur ont eu l'impression que leur propre voix semblait moins naturelle ($EO_{véc}$ plus important) par rapport à celle des autres participants. En effet, les participants connaissant l'expérimentateur se montrent plus critiques envers l'EO, attribuant un score $EO_{véc}$ plus élevé que ceux qui ne le connaissent pas. Ce biais est généralement désigné sous le terme « effet du bon participant » (Nichols et Maner, 2008), qui pousse le participant à vouloir confirmer l'hypothèse de recherche de l'expérimentateur qu'il connaît. Ainsi, pour améliorer le confort acoustique, l'EO_{obj} induit par les bouchons d'oreilles doit être réduit considérablement aux basses fréquences et augmenté autour de 4 kHz pour équilibrer adéquatement l'expérience du naturel de la voix. Par ailleurs, la taille de l'embout du bouchon et le sexe du participant peuvent moduler les effets primaires de l'EO_{obj} dans les

bandes de fréquence 125 Hz et 500Hz et de l'EO_{obj} à 4000Hz. Les hommes ont tendance à trouver leur voix moins naturelle que les femmes lorsque l'EO_{obj} dans les bandes de fréquence 125 Hz et 500Hz augmente et lorsque l'EO_{obj} à 4000Hz diminue.
Les participants qui ont utilisé des embouts plus grands ont tendance à percevoir une plus grande amplification des basses fréquences et sont plus susceptibles de trouver leur voix moins naturelle. Cela suggère que les différences anatomiques individuelles influencent la perception de l'amplification des basses fréquences et le jugement du caractère naturel de la voix lors de l'utilisation de bouchons d'oreilles.

2. DISCUSSION GÉNÉRALE ET CONCLUSION

Les résultats synthétisés dans ce rapport fournissent un portrait global des travaux ayant permis de comprendre en profondeur le confort des bouchons d'oreilles, sa conceptualisation, sa mesure, ainsi que les différentes caractéristiques qui y contribuent. Ces résultats ouvrent des perspectives pour le développement d'outils de conception axés sur l'amélioration du confort des bouchons d'oreilles, car ils établissent des relations entre les caractéristiques de la triade mesurables de manière objective et les attributs de confort les plus importants. En tenant compte de ces caractéristiques, les futurs développements en matière de conception de bouchons pourront viser à améliorer le confort global et une utilisation adéquate des bouchons, améliorant ainsi l'efficacité de la protection auditive pour les utilisateurs dans divers environnements professionnels.

Les sections 2.1, 2.2 et 2.3 exposent respectivement les contributions scientifiques, les retombées technologiques et les retombées pour les milieux. La section 2.4 synthétise les limites des travaux, tandis que la section 2.5 propose des pistes de recherche.

2.1 Contributions scientifiques (avancement des connaissances)

Les travaux multidisciplinaires réalisés ont permis d'apporter plusieurs contributions scientifiques majeures, tant sur le plan conceptuel que méthodologique et expérimental. Ces contributions se déclinent selon plusieurs axes.

2.1.1 Définition et conceptualisation du confort

Une définition originale et holistique du confort appliquée aux protecteurs auditifs a été proposée. Sur cette base, un modèle de confort a été élaboré, permettant de mieux conceptualiser la complexité de ce concept. Ce modèle offre un cadre théorique utile pour comprendre les comportements liés au port des PICB, leurs origines et leurs déterminants, et contribue ultimement à améliorer l'efficacité de ces dispositifs dans la prévention de la surdité professionnelle.

2.1.2 Évaluation subjective du confort sur le terrain

Pour mesurer le confort des bouchons d'oreilles de manière systématique, le questionnaire COPROD-NAQ a été développé et validé pour le contexte québécois. Cet outil évalue fidèlement le confort selon quatre dimensions — physique, fonctionnelle, acoustique et psychologique — à travers 51 items répartis en 11 sous-dimensions conceptuelles. Les analyses ont montré que tant le confort psychologique que fonctionnel exercent une influence particulièrement marquée sur le confort global.

Des indices ont été proposés pour chacune des 11 sous-dimensions du confort mesuré sur le terrain (4 pour la dimension psychologique, 4 pour la dimension fonctionnelle, 1 pour la dimension physique et 2 pour la dimension acoustique), traduisant le confort ressenti à partir des attributs spécifiques qui les composent. Un indice synthétique a également été développé pour représenter le confort global, intégrant les 11 sous-dimensions du confort ainsi que les caractéristiques de la triade « environnement / personne / bouchon d'oreille ». Il est à noter que les sous-dimensions du confort psychologique et fonctionnel ont eu un impact plus important sur le confort global que les sous-dimensions de l'inconfort physique et acoustique. Cela souligne l'importance de prendre en compte les attributs de confort liés aux aspects pratiques de l'utilisation des bouchons d'oreille, ainsi que le bien-être et la satisfaction des utilisateurs.

Les résultats ont révélé plusieurs déterminants du confort global (voir la section 2.1.5 pour les facteurs d'influence de chacune des sous-dimensions):

- **Environnement de travail** : Le confort est amélioré par l'absence d'interférence avec d'autres EPI, un horaire de jour en semaine, ainsi que la possibilité de changer de poste ou de service. En revanche, le travail dans un environnement froid diminue le confort des bouchons.

- **Caractéristiques individuelles** : Les droitiers perçoivent les bouchons comme plus confortables, tandis que les personnes âgées de 44 ans ou moins les trouvent plus inconfortables.

- **Modèle de bouchon** : Le modèle de bouchon sur mesure du Laboratoire Laviolette a été perçu comme plus confortable par rapport aux autres modèles testés.

Les comparaisons multivariées par familles des bouchons ont montré que les bouchons sur mesure sont significativement et systématiquement plus confortables que les autres familles pour 6 sous-dimensions du confort : « sentiment de protection contre le bruit », « impact sur le travail », « retrait du bouchon », « insertion du bouchon », « satisfaction » et « immersion ».

2.1.3 Expérimentations en laboratoire

L'étude du confort global en laboratoire a mis en évidence que la famille de bouchon d'oreille exerce une influence significative sur le confort, le confort physique étant le facteur déterminant[41]. Des éléments tels que la forme, la présence d'une tige et les propriétés mécaniques contribuent à moduler l'inconfort ressenti. De manière générale,

[41] Ces résultats reposent sur les préférences exprimées par chaque participant pour différentes dimensions du confort, à travers une question spécifique du protocole expérimental. Cette approche diffère de celle utilisée dans les analyses de données terrain (Negrini *et al.*, 2025) et dans l'autre étude en laboratoire (Carillo *et al.*, 2025), où l'importance relative des attributs du confort a été hiérarchisée à l'aide de méthodes statistiques multivariées, notamment des analyses de régression multiple.

les bouchons en mousse prémoulée à tige ont été appréciés pour leur confort multidimensionnel. Les effets de la famille de bouchons sur le confort diffèrent sensiblement des résultats obtenus lors des mesures en conditions réelles, à l'exception de la dimension physique. Cette divergence pourrait s'expliquer notamment par la taille réduite de la population étudiée en laboratoire et par les caractéristiques des participants, très différentes de celles observées sur le terrain (jeunes, peu expérimentés en matière de protection auditive).

Par ailleurs, l'environnement sonore et la famille de bouchons influencent significativement la phase de perception liée à l'intelligibilité des sons utiles, mais n'affectent pas nécessairement le confort acoustique associé. Ces résultats montrent que la performance des bouchons en matière de détection d'alarmes et de compréhension de la parole et le jugement de confort sont deux concepts distincts : le confort, évalué par questionnaires, ne reflète pas toujours les contraintes et effets de l'environnement sonore. Ainsi, la reproduction fidèle de cet environnement n'est pas indispensable pour les évaluations de confort en laboratoire, mais elle demeure essentielle pour les tests psychoacoustiques visant à mesurer l'intelligibilité. Ces tests subjectifs s'avèrent pertinents et devraient être intégrés aux protocoles d'évaluation en laboratoire pour apprécier la performance des bouchons. Enfin, le confort ne doit pas être négligé, car il conditionne la régularité et la conformité d'utilisation des protecteurs, comme le souligne la littérature.

Finalement, des essais portant sur la dimension acoustique ont montré que l'utilisation de bouchons à base de métamatériaux, spécialement conçus pour réduire l'EO, diminue effectivement la perception et le ressenti de cet inconfort acoustique.

2.1.4 Détermination des caractéristiques physiques de la triade

Du côté des caractéristiques physiques de l'utilisateur, une méthode de caractérisation morphologique a été proposée, basée sur l'analyse d'empreintes et sur 15 indicateurs décrivant la géométrie des conduits auditifs non déformés (longueur, sections transversales, tortuosité, conicité, etc.). Cette approche a permis de classer les conduits auditifs des travailleurs participants à l'étude de terrain en trois grandes catégories morphologiques, associées à des niveaux d'atténuation sonore distincts et de justifier la conception de trois modèles d'oreilles artificielles pour la mesure de l'atténuation. Par ailleurs, l'outil 3M™ Eargage étendu a été évalué pour estimer la taille du conduit auditif près du premier coude et prédire l'adéquation d'un bouchon donné. Les résultats révèlent qu'environ 10 % des individus présentent des conduits auditifs exceptionnellement larges, ce qui augmente le risque de sous-protection en raison d'une atténuation significativement réduite.

En ce qui concerne les caractéristiques physiques des bouchons, une meilleure compréhension du comportement mécanique hyperélastique des bouchons en mousse compressible en PVC a été obtenue grâce à l'utilisation de la loi de comportement de

Storaker, dont les paramètres ont été calibrés à partir de résultats expérimentaux de compression radiale. Cela permet d'envisager une prédiction plus précise de la réponse mécanique des bouchons lors de leur insertion.

2.1.5 Détermination des caractéristiques physiques de la phase d'interaction pour le système oreille-bouchon

Une méthode novatrice combinant imagerie par IRM et recalage d'images a été développée pour évaluer le champ de déplacement statique du conduit auditif induit par l'insertion d'un dispositif intra-auriculaire. Cette approche a permis d'identifier les zones les plus sujettes aux déformations ainsi que les directions de déplacement prédominantes. Les résultats montrent que l'amplitude des déplacements varie généralement entre 1 et 2,5 mm selon le type de bouchon, sa forme, son matériau et son mode d'insertion. La variabilité interindividuelle liée à la morphologie du conduit auditif joue également un rôle déterminant.

Plusieurs développements expérimentaux et numériques ont également été réalisés afin de mieux comprendre les interactions physiques et acoustiques entre les bouchons d'oreilles et le conduit auditif.

Plusieurs testeurs expérimentaux originaux ont été conçus pour mesurer la PMS. Parmi eux, le RFT permet une estimation globale de la PMS dans un canal auditif artificiel cylindrique, tandis que l'OPT offre une cartographie précise en différents points d'un conduit auditif artificiel de forme cylindrique ou réaliste. En complément, des testeurs virtuels, consistant en des modèles analytiques et numériques fondés sur la méthode des éléments finis, ont été développés pour simuler la PMS générée par des bouchons en mousse compressible. Ces approches ont notamment permis de démontrer que plus un bouchon est comprimé avant l'insertion, plus la PMS mesurée après expansion est faible. D'autres testeurs expérimentaux originaux ont également été créés pour mesurer la force d'extraction, le coefficient de frottement peau/bouchon et le temps d'expansion des bouchons en mousse. L'ensemble de ces outils a permis d'alimenter les analyses statistiques pour étudier l'influence des caractéristiques physiques mécaniques des bouchons sur les différentes dimensions du confort.

Des testeurs virtuels et expérimentaux, de complexité variée, ont été développés pour prédire et mesurer l'atténuation acoustique. Ces travaux ont conduit à la conception de modèles numériques et physiques de tympans artificiels, capables de reproduire la variabilité de l'impédance tympanique humaine ainsi que de modèles analytiques et numériques d'oreilles tronquées réalistes, partiellement validés, pour estimer l'atténuation acoustique des bouchons à partir de leurs propriétés mécaniques et de celles des tissus environnants. Par ailleurs, trois canaux auditifs artificiels réalistes, reflétant la variabilité d'atténuation observée chez les participants de l'étude, ont été fabriqués. Enfin, une méthode innovante et versatile a été proposée pour mesurer l'atténuation des bouchons d'oreilles, combinant un tube d'impédance et un modèle analytique unidimensionnel. Ce

dispositif permet d'évaluer l'atténuation à partir de la perte par transmission et du coefficient de réflexion de la partie médiale du système bouchon/conduit artificiel. Validé par comparaison avec une ATF commerciale en champ diffus, ce testeur offre une compréhension approfondie des mécanismes d'atténuation. Plusieurs modèles numériques EF ont également été élaborés, en lien avec cette méthode, pour simuler la prédire la perte par insertion d'un bouchon dans le tube d'impédance ou dans une ATF, en fonction des propriétés mécaniques des bouchons et des tissus environnants.

En ce qui concerne l'EO, une méthode simple et robuste basée sur la mesure de réduction du bruit associée à l'utilisation de la voix du participant a été mise en œuvre chez des sujets humains afin d'évaluer l'EO objectif de manière pratique et fiable. D'importants travaux ont été consacrés au développement de testeurs virtuels et expérimentaux destinés à le prédire et à le mesurer. Plusieurs modèles analytiques et numériques d'oreilles tronquées réalistes ont été élaborés, certains validés sur groupes de participants, tandis que d'autres n'ont pas pu être entièrement validés expérimentalement par rapport aux testeurs expérimentaux associés. La validation des testeurs expérimentaux basés sur les oreilles tronquées réalistes par rapport à des groupes de participants n'a pas été concluante. En revanche des testeurs simplifiés, à la fois virtuels (modèles EF) et expérimentaux (par ex. Figure 11(d)), ont été validés avec succès. L'un de ces testeurs (Figure 11(g)) a notamment permis de confirmer l'efficacité d'un nouveau bouchon passif à base de métamatériau, conçu pour réduire l'EO objectif. Les efforts de modélisation ont conduit à la conception de testeurs virtuels de tête entière, partiellement validés par rapport aux mesures sur des bancs expérimentaux et, dans certains cas, directement sur le participant ayant servi de référence. Ces modèles ont permis de quantifier l'influence de plusieurs facteurs, tels que la position de la stimulation sur la tête, le point de mesure dans le conduit auditif, ou encore les propriétés mécaniques des tissus. Des avancées notables ont également été réalisées pour améliorer la représentativité des modèles, notamment en tenant compte de l'air extérieur en oreille ouverte, des conditions limites à la base de la tête et de l'interaction entre le fluide externe et la membrane tympanique. Dans l'ensemble, ces travaux fournissent une meilleure compréhension des mécanismes physiques à l'origine de l'EO objectif et ouvrent la voie à l'optimisation des dispositifs de protection auditive visant à le réduire.

2.1.6 Facteurs influençant les différentes dimensions du confort

Premièrement, les caractéristiques de la triade « environnement / personne / bouchon » qui ont un impact significatif sur les différents attributs des différentes dimensions du confort ont été identifiées à travers des analyses statistiques.

Il ressort de cela que la dimension physique du confort est principalement déterminée par les caractéristiques physiques du bouchon d'oreille, telles que la force radiale, la force d'extraction, le coefficient de frottement et la présence d'une tige. En revanche, les dimensions fonctionnelle et acoustique du confort sont davantage influencées par les

caractéristiques individuelles de l'utilisateur, notamment son expérience antérieure avec les PICB et la forme de son conduit auditif. Ces résultats suggèrent que la responsabilité de l'amélioration du confort physique incombe principalement aux fabricants, tandis que celle du confort fonctionnel et acoustique repose davantage sur les employeurs et les professionnels de la prévention, qui doivent adapter les choix de dispositifs aux besoins spécifiques des utilisateurs.

Plus spécifiquement, les analyses ont notamment montré que les bouchons induisant une force radiale élevée, une faible force d'extraction et un coefficient de frottement important et ceux qui présentent une tige tendent à générer plus d'inconfort physique. Les tests en laboratoire concordent étroitement avec ces résultats sur le terrain, identifiant les mêmes caractéristiques significatives des bouchons d'oreille et les mêmes effets. Ces résultats suggèrent que les tests en laboratoire avec des utilisateurs novices peuvent être suffisants pour évaluer l'inconfort physique, car les caractéristiques individuelles et celles de l'environnement de travail n'influencent pas de manière significative cette dimension particulière du confort.

Pour les dimensions fonctionnelle et acoustique, les participants ayant une expérience préalable avec les protecteurs auditifs rapportent des évaluations plus critiques, bien que l'usage répété d'un même type de bouchon améliore progressivement la perception du confort. La morphologie du conduit auditif joue également un rôle significatif à modéré, quoique complexe à interpréter, ce qui souligne l'importance de poursuivre les recherches sur la compatibilité entre la géométrie des bouchons et celle des conduits auditifs représentatifs. Ce constat milite aussi pour le développement d'oreilles artificielles reproduisant fidèlement la variabilité anatomique humaine.

Des effets liés aux caractéristiques individuelles (latéralité, pertes auditives) ont également été mis en évidence. Les personnes gauchères trouvent les bouchons moins confortables à insérer et moins efficaces, tandis que les personnes avec une perte auditive perçoivent une insertion plus confortable, mais un impact plus négatif sur leur travail. Ces facteurs ne devraient donc pas être négligés lors de la conception des bouchons d'oreilles et/ou lors des formations relatives à leur mise en place et à leur utilisation sur le terrain.

Deuxièmement, dans le cas d'une étude reposant sur l'utilisation d'un méta-bouchon spécifiquement conçu pour réduire l'EO objectif, une meilleure compréhension des facteurs influençant l'EO perçu et ressenti a été obtenue grâce à une campagne de tests en laboratoire. Celle-ci combinait des mesures basées sur la voix, des questionnaires et des analyses statistiques. Des liens ont été établis entre l'EO perçu et ressenti, l'EO objectif, la taille de l'embout du bouchon ainsi que certaines caractéristiques psychosociales telles que la familiarité avec l'expérimentateur et le sexe du participant. L'EO objectif mesuré dans les bandes de fréquence 125 Hz, 500 Hz et 4 kHz influence

significativement la perception de l'amplification des basses fréquences et le jugement du naturel de la voix.

2.2 Retombées technologiques

Ce projet, de même que les cinq projets « satellites » ayant soutenu l'atteinte de ses objectifs, a généré des retombées technologiques offrant de nouvelles perspectives et avantages concrets pour les acteurs en protection auditive. Elles concernent principalement les outils de mesure et de calcul destinés à les aider à concevoir des PICB plus confortables et mieux adaptés aux besoins des utilisateurs et à leurs environnements de travail. Ces retombées sont listées ci-après.

Une première retombée est le questionnaire COPROD-NAQ. Ce questionnaire constitue un outil valide et fiable pour mesurer le confort des bouchons d'oreilles, en intégrant la nature multidimensionnelle du concept de confort ainsi que l'influence de la triade « environnement/personne/bouchon d'oreille ». Il offre aux manufacturiers la possibilité de mesurer le confort des PICB en laboratoire ou sur le terrain, avec une rigueur accrue et une finesse supérieure à celle des questionnaires traditionnellement utilisés. Cet outil peut être utilisé tant dans la phase de développement, pour améliorer le confort des nouveaux produits, que dans l'analyse des retours clients liés à l'inconfort des produits existants. À terme, le COPROD-NAQ pourrait être soumis à un processus de normalisation, en vue d'une utilisation standardisée par les fabricants de PICB pour l'évaluation du confort. Le questionnaire validé suscite déjà l'intérêt de plusieurs manufacturiers de PICB en Amérique du Nord et en Europe qui en ont fait la demande.

Une seconde retombée consiste en la mise au point d'une méthode de caractérisation morphologique des conduits auditifs non déformés, basée sur l'analyse d'empreintes et sur 15 indicateurs décrivant leur géométrie. Cette méthode permet de classer les conduits auditifs des participants et de concevoir plusieurs oreilles artificielles représentatives du groupe, afin de couvrir la variabilité interindividuelle de l'atténuation acoustique des différents bouchons portés.

Une troisième retombée concerne le développement de la méthode d'estimation du déplacement du conduit auditif induit par l'insertion de bouchons, basée sur l'imagerie par IRM. La méthode permet d'accéder à la géométrie déformée du conduit auditif, qui peut ensuite être exploitée pour mieux comprendre l'interaction entre le bouchon et les tissus du canal auditif, ainsi que pour valider des testeurs virtuels capables de prédire des variables acoustiques et mécaniques. Ces testeurs virtuels offrent la possibilité de concevoir des oreilles artificielles plus réalistes, grâce à une sélection optimisée de matériaux reproduisant fidèlement les propriétés des tissus humains.

Une quatrième retombée est le développement de l'outil de mesure de la taille du conduit auditif 3M™ Eargage (EST). Dans sa version étendue, couvrant les tailles de XS à XXXXL, il constitue une solution efficace pour la présélection des bouchons d'oreilles. Actuellement, le choix des bouchons repose principalement sur leur atténuation (NRR). En l'absence d'un système FAES, l'EST 3M™ Eargage « étendu » permet d'améliorer ce

processus dans une certaine mesure, en offrant une méthode simple et rapide, sans nécessiter de mesure acoustique. Cet outil facilite l'identification des conduits auditifs extra-larges, pour lesquels des bouchons d'oreilles spécifiques ne sont pas adaptés. En permettant une évaluation rapide du diamètre du conduit auditif dans la zone d'insertion du bouchon, il pourrait être intégré aux pratiques industrielles. Les fabricants pourraient ainsi indiquer, en complément des indices d'atténuation acoustique, les tailles d'EST compatibles avec leur produit sur l'emballage.

Une cinquième retombée concerne le développement de plusieurs testeurs de confort, avec un potentiel d'utilisation par les manufacturiers de bouchons pour optimiser les caractéristiques physiques de ces derniers et leur adaptation aux utilisateurs, dans une optique d'amélioration du confort de leurs produits. Ces testeurs visent à améliorer le confort selon ses dimensions mécanique, acoustique et fonctionnelle. Bien qu'il subsiste un important potentiel d'amélioration pour ces testeurs, les plus avancés incluent :

- Des testeurs virtuels, tels que des modèles analytiques et numériques par éléments finis (EF) d'oreilles tronquées, permettant de calculer la pression statique induite par un bouchon en mousse à comprimer dans un canal auditif.
- Des testeurs expérimentaux, comme le système RFT pour mesurer la force radiale et la PMS moyenne, le système OPT utilisant une sonde à fibre optique pour des mesures locales de PMS, une peau artificielle instrumentée pour cartographier spatialement la PMS et un dispositif combinant dynamomètre et conduit auditif cylindrique à section circulaire aux parois rigides pour quantifier la force d'extraction des bouchons.
- Une méthode versatile d'estimation de l'atténuation acoustique utilisant un tube d'impédance et un modèle analytique unidimensionnel, permettant de tenir compte de la variabilité de l'impédance tympanique sans recourir aux ATF du commerce ou à des installations coûteuses comme les chambres réverbérantes ou anéchoïques.
- Un modèle numérique EF pour calculer l'atténuation acoustique de bouchons sur mesure ou en mousse à comprimer dans une oreille tronquée simplifiée, constituée d'un conduit auditif artificiel cylindrique comportant une couche peau.
- Une oreille tronquée parallélépipédique simplifiée et un modèle EF associé, dédiés à la mesure de l'EO_{obj}, sollicitée mécaniquement par un pot vibrant.
- Un modèle EF d'une tête entière, permettant de prédire l'EO_{obj} d'un bouchon sur mesure ou en mousse à comprimer.

Enfin, une dernière retombée réside dans la conception et le brevet d'un concept innovant de bouchon passif intégrant des résonateurs de Helmholtz. Ce dispositif offre une protection auditive tout en réduisant la perception des sons internes à basse fréquence, amplifiée par l'EO. Sa validité a été démontrée à l'aide du testeur expérimental d'EO basé sur l'oreille tronquée parallélépipédique et de mesures sur participants.

2.3 Retombées pour les milieux de travail

Ce projet a également plusieurs retombées pour les milieux de travail.

Premièrement, il a permis de former du personnel hautement qualifié comprenant 4 assistants de recherche, 5 postdoctorants, 3 étudiants au doctorat, 6 étudiants à la maîtrise, ainsi que 6 stagiaires et étudiants de niveau baccalauréat dans le cadre de projets de fin d'études. Ceci bénéficiera entre autres à la qualité des services publics ainsi qu'à la croissance économique et l'innovation.

Une deuxième retombée concerne l'utilisation des outils développés dans les milieux de travail. Ainsi, le questionnaire COPROD-NAQ pourra être utilisé pour améliorer les programmes de prévention de la perte auditive en aidant les préventionnistes à sélectionner des bouchons d'oreilles confortables, adaptés aux caractéristiques des travailleurs et des organisations. Le questionnaire pourra être aussi intégré dans les programmes de formation sur le port et sur l'utilisation des bouchons, tout en faisant des suivis avec l'appui du COPROD-NAQ. Une attention particulière pourra être portée aux travailleurs de 44 ans et moins. De même, l'outil EST 3M™ Eargage pourra améliorer le processus de sélection des bouchons en fonction de la morphologie des conduits auditifs. Par exemple, les individus ayant des conduits auditifs de tailles XXL+XXXL devraient privilégier les bouchons d'oreilles en mousse à comprimer de forme cylindrique, si ces modèles sont disponibles et compatibles avec les tâches à effectuer. Une vigilance particulière est recommandée pour les travailleurs aux conduits auditifs extrêmement larges utilisant des bouchons prémoulés, en mousse prémoulée à tige ou certains modèles de mousse à comprimer. Dans ces cas, l'application de l'échelle de déclassement classique sur l'indice d'atténuation du bruit (NRR) pourrait ne pas refléter fidèlement l'atténuation effective sur le terrain, exposant un pourcentage non négligeable de travailleurs à un risque de sous-protection. Il est également essentiel de tester les deux oreilles de manière indépendante, car la morphologie des conduits auditifs peut présenter des asymétries significatives.

Une troisième retombée porte sur les aspects organisationnels et ergonomiques. Les résultats de l'évaluation du confort et des composantes environnement/personne de la triade pourront être utilisés dans les programmes de prévention de la perte auditive, en ciblant des groupes de travailleurs et des organisations ayant des caractéristiques physiques et psychosociales spécifiques. Les résultats obtenus suggèrent certaines orientations qui pourraient être explorées afin d'améliorer le confort lié au port des protecteurs auditifs. Certaines de ces orientations sont déjà bien connues alors que d'autres sont davantage des pistes qui demeurent toutefois à considérer avec prudence, car elles nécessitent d'être confirmées et appuyées par des preuves scientifiques supplémentaires. Voici une liste de ces pistes:

- **Utiliser des PICB compatibles avec sa morphologie de conduit auditif :** le bouchon sur mesure est celui qui a été associé au niveau de confort le plus élevé (Negrini *et al.*, 2025; Terroir *et al.*, 2022). Tant qu'il n'y a pas de testeurs déployés sur le terrain pour caractériser rapidement la forme du conduit de la personne ni

d'indication de compatibilité sur les emballages, alors cela passe par l'essai de plusieurs PICB. Les préventionnistes sont donc encouragés à faire essayer aux travailleurs différents modèles et tailles, en portant une attention particulière aux plus jeunes, dont les attentes en matière de confort sont plus élevées, ainsi qu'aux gauchers, qui rapportent un inconfort supérieur comparé aux droitiers.

- **Utiliser des PICB compatibles avec d'autres équipements**: choisir des protecteurs auditifs conçus pour ne pas interférer avec d'autres EPI.
- **Adapter les PICB aux conditions thermiques** : le confort semblant être affecté dans des environnements froids, plusieurs hypothèses pourraient être envisagées, comme :
    - recourir à des modèles de PICB conçus pour mieux résister aux basses températures, en privilégiant des matériaux souples et isolants qui conservent leur flexibilité malgré le froid ;
    - veiller à un ajustement adéquat du PICB afin de limiter tout excès de pression, accru par le froid ;
    - favoriser des pauses régulières permettant une meilleure circulation sanguine au niveau des oreilles, voire envisager l'usage complémentaire de dispositifs de protection tels que des cache-oreilles lors de conditions particulièrement froides.
- **Changer l'organisation du travail** : il est possible que les horaires et postes de travail influencent le confort ressenti. Ainsi, privilégier le travail de jour et en semaine, ou offrir aux travailleurs la possibilité de changer de poste ou de département pourrait contribuer à réduire la fatigue associée au port prolongé des protecteurs auditifs.

Une quatrième retombée concerne le rôle respectif des acteurs sociétaux dans la sélection des bouchons les plus adaptés aux travailleurs. L'identification de caractéristiques physiques et psychosociales mesurables, qu'elles soient liées à l'environnement de travail, à l'utilisateur ou au protecteur auditif lui-même, et qui influencent certains attributs du confort associés aux dimensions physique, acoustique et fonctionnelle, indique que la responsabilité d'influer sur le confort des bouchons d'oreilles peut être partagée entre les manufacturiers et les acteurs des milieux de travail, selon la dimension du confort considérée. La dimension physique dépend principalement des caractéristiques physiques propres au bouchon et relève donc des manufacturiers. En revanche, les dimensions fonctionnelle et acoustique sont majoritairement influencées par les caractéristiques individuelles des utilisateurs. Les acteurs des milieux de travail ont ainsi un rôle clé à jouer dans l'évaluation de ces caractéristiques et peuvent s'appuyer sur les caractéristiques influentes identifiées pour sélectionner les bouchons les mieux adaptés à chaque travailleur.

Une cinquième retombée concerne la hiérarchisation des bouchons testés basée sur les scores de confort. Cette hiérarchisation fournit des indications aux intervenants en milieu de travail et travailleurs sur les bouchons les plus adaptés en fonction de la sous-dimension du confort à privilégier. Elle a permis de montrer que :

- Les bouchons d'oreilles sur mesure ont été perçus comme les plus confortables dans l'ensemble des dimensions de confort.

- Les bouchons d'oreilles prémoulés et en mousse prémoulée à tige sont perçus comme les moins confortables.
- Les bouchons en mousse à comprimer sont perçus comme plus confortables que les bouchons prémoulés et en mousse prémoulée à tige en ce qui concerne la protection contre le bruit et la satisfaction psychologique.

À terme, on pourrait envisager d'intégrer des indices de confort dans les normes de certification des bouchons d'oreilles.

Enfin une dernière retombée concerne la formulation d'un conseil pratique pour améliorer le confort. Ainsi, la façon dont un bouchon en mousse est comprimé avant insertion dans le canal auditif joue un rôle important sur la PMS exercée par ce dernier. Plus on comprime le bouchon et moins le bouchon exerce de PMS favorisant un inconfort mécanique moindre. Un utilisateur qui porte des bouchons en mousse à comprimer pourrait, grâce à un geste simple, améliorer le confort physique de son bouchon.

2.4 Limites des travaux

Ces travaux comportent plusieurs limites méthodologiques et contextuelles qui influencent la portée des résultats. Bien que les travaux reposent sur une méthodologie rigoureuse et novatrice, ces limites rappellent que les résultats doivent être interprétés avec prudence et ne peuvent être généralisés sans précaution à d'autres populations, environnements ou PICB. Les paragraphes suivants présentent une synthèse des limites recensées dans le Tableau 5 de l'ANNEXE A.

- Participants : La faible représentation des femmes reflète la réalité des milieux où l'exposition au bruit concerne majoritairement des hommes, mais limite néanmoins la généralisation des résultats. Sur le terrain, la plupart des participants avaient une expérience préalable du port de bouchons, ce qui a pu biaiser positivement leur perception du confort. En laboratoire, la taille réduite et l'homogénéité de l'échantillon (jeunes adultes sans expérience) restreignent également la portée des conclusions.

- Questionnaires : Les questionnaires présentent des difficultés à capter certains aspects (par ex. confort physique) et n'ont pas couvert toutes les dimensions pertinentes (ex. confort thermique). Ces questionnaires n'ont été remplis qu'une seule fois par chaque participant, ce qui a pu limiter la richesse des perceptions recueillies.

- Bouchons étudiés : Les bouchons sur mesure n'ont pas pu faire l'objet d'une analyse aussi approfondie que les autres modèles, et les différences entre certains bouchons testés étaient trop faibles pour révéler des contrastes significatifs dans les analyses. Pour les bouchons jetables ou réutilisables du commerce testés, il a été observé que l'amélioration du confort des bouchons d'oreilles dépend principalement des fabricants pour les aspects physiques, tandis que les dimensions fonctionnelle et acoustique relèvent davantage des milieux de travail, mais cette distinction pourrait être moins nette pour des modèles de bouchons qui seraient conçus spécifiquement pour augmenter le confort fonctionnel et acoustique.

- Caractéristiques de l'environnement : Les environnements de travail étudiés présentent une forte variabilité qui n'a pas pu être pleinement prise en compte. Sur le terrain, l'absence de mesures continues des conditions atmosphériques et des niveaux sonores individuels constitue une limite. En laboratoire, l'utilisation d'environnements sonores virtuels permet un contrôle expérimental strict, mais ne reflète pas toute la complexité des milieux réels.

- Caractéristiques des personnes : L'étude n'a pas mesuré l'activité de travail sur le terrain. Les caractéristiques morphologiques des conduits auditifs n'ont été que partiellement prises en compte, notamment en ce qui concerne la description spatiale de ces derniers, qui omet certains paramètres essentiels à l'adaptation du bouchon à la forme tridimensionnelle du canal, tels que les angles d'azimut et d'élévation. De même, certaines propriétés physiologiques (ex. tissus, tympan) n'ont pas été prises en compte et les regroupements statistiques demeurent perfectibles. Des facteurs comme la formation, les différences interindividuelles non contrôlées et la subjectivité dans l'utilisation d'outils de mesure (ex. Eargage « étendu ») ont pu affecter les résultats. Ces limites réduisent la capacité à expliquer pleinement la variabilité interindividuelle observée.

- Caractéristiques des bouchons : Les dimensions psychosociales des bouchons (esthétique, discrétion, attractivité) n'ont pas été évaluées.

- Caractéristiques physiques du système couplé oreille-bouchon **:** Le suivi continu de la profondeur d'insertion et de l'atténuation acoustique lors des mesures sur les participants n'a pas été réalisé, ce qui a empêché l'obtention d'un indicateur acoustique précieux durant la phase d'interaction, a priori important pour objectiver le confort. La déformation du conduit auditif a principalement été évaluée par IRM, mais avec une résolution limitée et sur un seul participant, ce qui restreint la portée et la généralisation des résultats. Les dispositifs expérimentaux et virtuels utilisés, tels que les oreilles artificielles ou les modèles numériques de tête, reproduisent de manière simplifiée la géométrie et les propriétés des tissus, et ne prennent pas en compte les mouvements physiologiques (parole, mastication, déglutition) ni les propriétés viscoélastiques des tissus et des bouchons. Par ailleurs, certains phénomènes observés lors des mesures, notamment les variations d'atténuation ou d'effet d'occlusion selon le type de bouchon ou la technique d'insertion, restent encore mal compris ce qui complique la validation des testeurs associés. Ces simplifications peuvent affecter la précision de l'évaluation des caractéristiques physiques considérées telles que l'atténuation acoustique, l'effet d'occlusion, la force radiale, la PMS, la force d'extraction et le coefficient de friction peau/bouchon. L'ensemble de ces limitations met en évidence la complexité de reproduire fidèlement les interactions biomécaniques et acoustiques réelles du système oreille-bouchon et leur impact sur le confort et l'efficacité des dispositifs.

- Indices de confort : Les formules d'indices de confort ne sont pas universellement applicables, car leurs coefficients varient a priori selon le contexte de travail et l'échantillon de participants.

- Analyses statistiques : Le grand nombre de variables étudiées, certaines tendances difficiles à interpréter et des hypothèses simplificatrices (notamment l'indépendance des éléments de la triade environnement/utilisateur/bouchon) peuvent affecter la robustesse des analyses. Par ailleurs, la présence d'une variance inexpliquée dans certains modèles statistiques suggère que des facteurs additionnels, non mesurés ou non contrôlés, ont pu influencer les résultats.

- Influence des caractéristiques de la triade sur le confort physique, fonctionnel et acoustique — objectivation : L'étude présente des limites liées au choix des indicateurs de pression mécanique induite par le bouchon sur les parois du canal, au nombre limité de caractéristiques de la triade considérée et de conditions de test, ainsi qu'à la difficulté de comparer les perceptions des participants. De plus, les résultats concernant l'EO pourraient ne pas s'appliquer à des profils vocaux spécifiques comme les chanteurs ou musiciens. Enfin, les indices de confort objectivés associés à certains attributs et issus des analyses statistiques n'ont pas pu être validés, car la totalité des données a été utilisée pour les obtenir. Ils ne peuvent donc être utilisés pour faire de la prédiction.

2.5 Pistes de recherche

En reprenant les limites exposées dans la section 2.4, on peut dégager les pistes de recherche mentionnées ci-après. Les paragraphes suivants sont une synthèse des pistes de recherche dont les détails sont mentionnés dans le Tableau 6 de l'ANNEXE B.

- Échantillon des participants : Afin d'élargir la portée des conclusions, il serait pertinent d'explorer d'autres populations de travailleurs, en intégrant des échantillons permettant d'analyser l'effet de variables telles que le sexe ou l'âge. Il serait également utile de cibler des individus moins familiers avec l'usage des bouchons d'oreilles, afin de mieux comprendre le confort ressenti avant la fin de la période d'acclimatation, étape clé pour favoriser l'adoption durable des dispositifs de protection auditive.

- Questionnaires : Des pistes de recherche prometteuses incluent l'amélioration de la formulation des questions afin de mieux saisir des phénomènes complexes tels que l'EO, ainsi que l'intégration de nouvelles questions portant sur les interactions thermiques pour une compréhension plus globale du confort physique. Des campagnes de mesure ciblées en laboratoire permettraient de mieux caractériser certains attributs spécifiques du confort physique (comme la chaleur ou les démangeaisons), fonctionnel et acoustique (tels que l'intelligibilité de la parole et des alarmes). Ces données contribueraient à enrichir les questionnaires, affiner les

indicateurs objectifs et renforcer l'objectivation du confort, à l'image des travaux menés sur l'EO.

- Bouchons testés : Une exploration plus approfondie du confort associé aux bouchons d'oreilles sur mesure, ainsi qu'à d'autres modèles non testés dans le cadre du projet, permettrait d'enrichir la compréhension des facteurs influençant le confort perçu et d'élargir les recommandations en matière de protection auditive.

- Caractéristiques de l'environnement : Un suivi plus détaillé et précis des caractéristiques psychosociales et physiques de l'environnement, en tenant compte des conditions réelles du terrain, permettrait d'enrichir l'analyse du confort et d'améliorer la représentativité des résultats.

- Caractéristiques des personnes : Il serait pertinent d'inclure des caractéristiques morphologiques supplémentaires du conduit auditif, telles que l'angle d'azimut et l'angle d'élévation, afin de fournir une description plus détaillée de sa forme 3D. Ces caractéristiques géométriques du conduit auditif sont susceptibles d'apporter des informations précieuses sur certaines sous-dimensions du confort, notamment celles liées à l'insertion et au retrait des bouchons d'oreille. Par ailleurs, un suivi plus précis des caractéristiques psychosociales et physiques des personnes, en tenant compte des contraintes du terrain, permettrait d'approfondir l'analyse du confort. Par exemple, une analyse de l'activité de travail des participants permettrait de documenter la variabilité des conditions de travail et de leur influence sur l'utilisation des bouchons d'oreilles.

- Caractéristiques des bouchons : L'intégration des caractéristiques psychosociales des bouchons d'oreilles, telles que l'attractivité, la discrétion ou l'esthétique, dans les outils d'évaluation permettrait d'approfondir l'analyse de leur impact sur le confort perçu.

- Caractéristiques physiques du système couplé oreille-bouchon : Des perspectives de recherche ambitieuses visent à approfondir la compréhension du système couplé oreille-bouchon, en explorant à la fois les mécanismes acoustiques et les interactions mécaniques entre le bouchon et le conduit auditif.

    - La méthode d'estimation du déplacement du conduit auditif par IRM a des applications potentielles dans le domaine de la conception des dispositifs intra-auriculaires tels que les bouchons d'oreilles, les aides auditives et les écouteurs. Par exemple, les informations fournies par la méthode pourraient être utilisées pour personnaliser la forme des dispositifs intra-auriculaires afin de mieux s'adapter à l'anatomie de l'utilisateur. En particulier, la connaissance précise des déformations du conduit auditif lors de l'insertion d'un dispositif pourrait améliorer la fiabilité des techniques d'empreinte auriculaire utilisées pour la fabrication sur mesure. Cette amélioration se traduirait par un ajustement plus précis, un confort accru pour l'utilisateur, ainsi qu'une performance acoustique optimisée. La

méthode d'estimation du déplacement du conduit auditif par IRM permettra de mieux comprendre l'interaction entre le bouchon et les tissus du canal auditif, et de contribuer à l'amélioration des futurs testeurs virtuels et expérimentaux, tant mécaniques qu'acoustiques.

- Une meilleure connaissance de la profondeur d'insertion et de la géométrie du canal auditif déformé, notamment grâce à des IRM à plus haute résolution et à une standardisation des procédures d'insertion, permettrait d'identifier les zones clés à corréler avec l'atténuation acoustique. L'étude du déplacement statique et dynamique du conduit auditif, en lien avec les mouvements physiologiques, pourrait également enrichir l'analyse du confort.
- Le suivi de l'atténuation acoustique sur la durée, via des bouchons instrumentés ou des systèmes commerciaux, pourrait offrir un indicateur pertinent pour l'objectivation du confort acoustique. Par ailleurs, l'optimisation des testeurs expérimentaux — incluant l'amélioration des matériaux, la fabrication, l'intégration de simulateurs d'oreille moyenne/interne, de capteurs acoustiques et d'un système de chauffage, ainsi que la minimisation des contributions parasites des bancs de test — renforcerait la fidélité des mesures. La prise en compte de la variabilité anatomique interindividuelle est également essentielle pour améliorer la représentativité des résultats. Les testeurs virtuels gagneraient en précision grâce à une meilleure caractérisation des matériaux, à l'intégration de lois de comportement hyperélastiques et viscoélastiques, et à l'utilisation de modèles numériques calibrés et validés, en tenant compte de leurs incertitudes, capables de simuler l'ensemble du système auditif. Enfin, l'intégration de la variabilité interindividuelle dans les modèles, l'exploration de solutions pour réduire les temps de calcul, et la simplification potentielle des modèles détaillés pour une application expérimentale ouvrent la voie à une modélisation plus robuste et représentative des mécanismes de transmission sonore, qu'ils soient aériens ou tissulaires, dans l'ensemble du système auditif, qu'il soit ouvert ou occlus.
- Concernant la PMS, des avancées sont possibles grâce à l'optimisation du testeur « OPT » par l'ajout de sondes optiques et d'un système de chauffage, permettant une cartographie plus fine de la PMS. Un prototype de canal auditif équipé d'une peau artificielle et d'un capteur capacitif offre des résultats encourageants, bien que des améliorations soient nécessaires pour mieux représenter la géométrie réelle du conduit et affiner la calibration. Du côté des testeurs virtuels, le développement de modèles par éléments finis (EF) intégrant des lois de comportement adaptées et des données de calibration permettrait de calculer la PMS pour différents types de bouchons.
- Pour la force d'extraction et le coefficient de friction peau/bouchon, plusieurs pistes sont envisagées: l'intégration de conduits auditifs réalistes, l'utilisation de lubrifiants analogues au cérumen, des méthodes de mesure plus représentatives du contact réel et des essais sur participants. Le calcul de la force d'extraction à partir des testeurs virtuels de PMS et des données de friction expérimentales pourrait également être confronté aux données expérimentales.
- Enfin, la mesure de la sensibilité spatiale du canal auditif, via un bouchon-sonde dédié, permettrait de pondérer la PMS en fonction de la perception individuelle.

Cette approche offrirait ainsi une caractéristique physico-perceptuelle plus directement corrélée au confort que les indicateurs classiques et pourrait enrichir les analyses statistiques en tenant compte de la variabilité sensorielle des utilisateurs.

- Indices de confort : Afin d'évaluer la généralisation des indices de confort développés, il serait pertinent de mener de nouvelles études sur des échantillons variés. Cela permettrait de valider leur robustesse et leur applicabilité dans différents contextes d'utilisation.

- Analyses statistiques : Le grand nombre de variables indépendantes invite à développer des méthodes de réduction de dimension ou de sélection de variables afin de préserver la robustesse des analyses statistiques. Les comportements asymétriques observés entre les conduits auditifs et les profils latéraux des participants suggèrent la nécessité d'études ciblées avec des échantillons mieux équilibrés. Par ailleurs, l'hypothèse d'indépendance des éléments de la triade pourrait être revisitée à travers des modèles intégrant les effets d'interaction, permettant une compréhension plus fine des mécanismes influençant le confort. Enfin, l'amélioration du pouvoir explicatif du modèle pour objectiver l'EO passe par l'intégration de caractéristiques physiques et psychosociales supplémentaires, telles que la morphologie détaillée du conduit auditif ou l'expérience antérieure avec les dispositifs de protection auditive.

- Influence des caractéristiques de la triade sur le confort physique, fonctionnel et acoustique — objectivation :

    - Il est essentiel d'approfondir l'analyse de l'influence des caractéristiques de la triade « environnement/personne/bouchon » sur le confort physique, fonctionnel et acoustique. L'utilisation d'indicateurs objectifs plus fins, tels que des PMS locales mesurées dans des conduits auditifs réalistes ou pondérées par la sensibilité individuelle, pourrait améliorer la corrélation avec le confort mécanique. Il serait également pertinent d'intégrer des variables encore peu explorées, comme les conditions climatiques de travail, les effets thermiques sur les matériaux des bouchons, ou les dimensions psychosociales telles que l'esthétique, l'attractivité et la discrétion.
    - Concernant l'objectivation de l'effet d'occlusion, l'amélioration des protocoles de mesure en laboratoire faciliterait la participation et la fiabilité des réponses. Une étude longitudinale permettrait de tester l'hypothèse selon laquelle les méta-bouchons à effet d'occlusion réduit offrent un confort acoustique supérieur à celui des bouchons commerciaux. L'intégration de caractéristiques physiques et psychosociales supplémentaires — telles que la morphologie du conduit auditif, l'expérience antérieure avec les PICB, les antécédents professionnels et la connaissance des risques liés au bruit — contribuerait à réduire la variance inexpliquée dans les modèles statistiques. Enfin, l'élargissement des études à des populations ayant des besoins acoustiques spécifiques, comme les

chanteurs ou les musiciens d'instruments à vent, les personnes au travail qui ont une charge physique modérée à importante, permettrait de vérifier l'adéquation des méta-bouchons à ces usages particuliers.

- Il est nécessaire de valider le caractère prédictif des indices de confort objectivés en collectant, par exemple, des données supplémentaires afin qu'ils deviennent des outils fiables pour prédire le confort. Ces indices permettraient alors d'identifier les caractéristiques à améliorer et d'optimiser la conception des bouchons.

RÉFÉRENCES

American Standard Association (2016). *Methods for measuring the real-ear attenuation of hearing protectors.* Norme ASA/ANSI S12.6-2016 (R2020).

Benacchio, S., Doutres, O., Le Troter, A., Varoquaux, A., Wagnac, E., Callot, V. et Sgard, F. (2018). Estimation of the ear canal displacement field due to in-ear device insertion using a registration method on a human-like artificial ear. *Hearing Research*, *365*, 16-27. https://doi.org/10.1016/j.heares.2018.05.019 #1

Benacchio, S., Doutres, O. et Sgard, F. (14-15 novembre 2019). *Modélisation numérique vibro-acoustique d'une oreille artificielle dédiée à l'étude de protecteurs auditifs individuels* [Communication]. JJCAB 2019 : Journées Jeunes Chercheurs en vibrations, Acoustique et Bruit, Besançon, France. #1

Benacchio, S., Doutres, O., Varoquaux, A., Le Troter, A., Wagnac, E., Callot, V. et Sgard, F. (2019). Use of magnetic resonance image registration to estimate displacement in the human earcanal due to the insertion of in-ear devices. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *146*(4), 2452-2465. https://doi.org/10.1121/1.5126857 #1

Benacchio, S., Doutres, O., Wagnac, E. et Sgard, F. (2020). *Conception d'oreilles artificielles réalistes dédiées à l'étude du confort acoustique et physique des protecteurs auditifs intra-auriculaires* (Rapport n° R-1106). IRSST. https://doi.org/10.70010/XXKW2280 #1

Benacchio, S., Luan, Y., Doutres, O. et Sgard, F. (11-15 avril 2022). *Influence de l'impédance tympanique sur la perte par insertion de protecteurs auditifs intra-auriculaires* [Communication]. 16e Congrès français d'acoustique, Marseille, France.

Benacchio, S., Luan, Y., Doutres, O. et Sgard, F. (9-13 juillet 2023). *Artificial eardrum for acoustical test fixtures dedicated to hearing protection assessment* [Communication] 29th International Congress on Sound and Vibration (ICSV29), Prague, République tchèque.

Benacchio, S., Poissenot-Arrigoni, B., Martin, L., Saint-Gaudens, H., Sgard, F. et Doutres, O. (7-11 juillet 2019). *An artificial ear to assess objective indicators related to the acoustical comfort dimension of earplugs: Comparison with attenuation and occlusion effect measured on subjects* [Communication]. The International Institute of Acoustics and Vibration (ICSV26), Montreal, QC.

Benacchio, S., Sgard, F. et Doutres, O. (20-24 avril 2020). *Numerical modeling of the vibro-acoustic behavior of an artificial ear dedicated to the study of hearing protectors* [Communication] Forum Acusticum 2020, Lyon, France. #1

Branson, D. H. et Sweeney, M. M. (1991). Conceptualization and measurement of clothing comfort: Toward a metatheory. Dans M. L. Damhorst et S. Kaiser (édit.), *Critical linkages in textiles and clothing: Theory, method and practice* (p. 94-105).

Brown-Rothwell, D. J. (1986). *The comfort of earplugs-basis for a descriptive model* (Mémoire de maîtrise, University of Southampton).

Brummund, M., Sgard, F., Petit, Y. et Laville, F. (2014). Three-dimensional finite element modeling of the human external ear: Simulation study of the bone conduction occlusion effect. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *135*(3), 1433-1444. https://doi.org/10.1121/1.4864484

Brummund, M., Sgard, F., Petit, Y., Laville, F. et Nélisse, H. (2015). An axisymmetric finite element model to study the earplug contribution to the bone conduction occlusion effect. *Acta Acustica United with Acustica*, *101*(4), 775-788. https://doi.org/10.3813/AAA.918872

Busque, M.-A., Lebeau, M., Tremblay, M.-A., Boucher, A. et Duguay, P. (2022) *Portrait statistique des lésions professionnelles indemnisées au Québec en 2015-2016* (Rapport nº SA-1150-fr). IRSST. https://doi.org/10.70010/CHDQ3858

Camirand, H., Conus, F., Davison, A., Dupont, K., Gonzalez-Sicilia, D., Joubert, K. et Niyibizi, J. (2023). *Enquête québécoise sur la santé de la population 2020-2021*. ISQ. https://statistique.quebec.ca/fr/fichier/enquete-quebecoise-sante-population-2020-2021.pdf

Carillo, K. (2021). *On the objective occlusion effect induced by in-ear devices under bone-conducted stimulation: A theoretical investigation of the influence of the earcanal wall vibration and its spatial distribution* (Thèse de doctorat, École de Technologie Supérieure). #3

Carillo, K., Doutres, O. et Sgard, F. (6-9 février 2019a). *Fundamental mechanisms of the objective occlusion effect revisited using a finite element model of the outer ear* [Communication]. NHCA, Grapevine, TX. #3

Carillo, K., Doutres, O. et Sgard, F. (7-11 juillet 2019b). *Numerical investigation of the fundamental low frequency mecanisms of the objective occlusion effect* [Communication]. 26th International Congress on Sound and Vibration (ICSV26), Montreal, QC. #3

Carillo, K., Doutres, O. et Sgard, F. (2020a). A finite element model to study the earplug contribution to the objective occlusion effect. *The Journal of the Acoustical Society of America, 148*(4Suppl.), 2781. https://doi.org/10.1121/1.5147740 #3

Carillo, K., Doutres, O. et Sgard, F. (2020b). Theoretical investigation of the low frequency fundamental mechanism of the objective occlusion effect induced by bone-conducted stimulation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *147*(5), 3476-3489. https://doi.org/10.1121/10.0001237 #3

Carillo, K., Doutres, O. et Sgard, F. (2020c). L'effet d'occlusion : quand la perception de notre voix nous dérange. *Substance ÉTS.* #3

Carillo, K., Doutres, O. et Sgard, F. (2021a). Numerical investigation of the earplug contribution to the low frequency occlusion effect induced by bone-conducted stimulation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *150*(3), 2006-2023. https://doi.org/10.1121/10.0006209 #3

Carillo, K., Doutres, O. et Sgard, F. (2021b). On the removal of the open earcanal high-pass filter effect due to its occlusion: A bone-conduction occlusion effect theory. *Acta Acustica*, *5*(36), 1-6. https://doi.org/10.1051/aacus/2021029 #3

Carillo, K., Doutres, O. et Sgard, F. (2021c). Principle of an acoustical method for estimating the centroid position of the earcanal wall normal velocity induced by bone-conducted stimulation: Numerical evaluation. *Applied Acoustics*, *182*, article 108245. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108245 #3

Carillo, K., Doutres, O. et Sgard, F. (2024). An impedance tube technique for estimating the insertion loss of earplugs. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *156*(2), 898-911. https://doi.org/10.1121/10.0028195

Carillo, K., Saint-Gaudens, H. Sgard, F. et Doutres, O. (2024). Meta-earplugs: Innovative concepts for alleviating the occlusion effect. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *155*(3Suppl.), A58. https://doi.org/10.1121/10.0026788 #4

Carillo, K., Sgard, F., Dazel, O. et Doutres, O. (11-15 avril 2022a). *Développement de méta-bouchons d'oreilles basés sur le principe d'absorption parfaite afin de réduire l'effet d'occlusion* [Communication] 16e Congrès français d'acoustique, Marseille, France. #3

Carillo, K., Sgard, F., Dazel, O. et Doutres, O. (2022b). Reduction of the occlusion effect induced by earplugs using quasi perfect broadband absorption. *Scientific Reports*, *12*, article 15336. https://doi.org/10.1038/s41598-022-19641-3 #3

Carillo, K., Sgard, F., Dazel, O. et Doutres, O. (2023). Passive earplug including Helmholtz resonators arranged in series to achieve broadband near zero occlusion effect at low frequencies. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *154*(4), 2099-2111. https://doi.org/10.1121/10.0021185 #3

Carillo, K., Sgard, F., Dazel, O. et Doutres, O. (2025). Enhancing acoustic comfort for earplug users: Objective and subjective evaluation of bone-conducted sound with meta-earplugs incorporating elmholtz resonators. *Applied Acoustics*, *240*, article 110929. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2025.110929 #4

Carillo, K., Sgard, F. et Doutres, O. (2023). 3D printed meta-earplug for minimizing the occlusion effect. *Canadian Acoustics*, *51*(3), 114-115. #4

Carillo, K., Sgard, F., Xu, H., Guilloteau, A., Benacchio, S., Poissenot-Arrigoni, B. et Doutres, O. (2021). On the modeling of the objective occlusion effect induced by earplugs: Recent advances, challenges and perspectives. *NHCA Spectrum*, *38*(2), 15-22. #3

Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail. (2025). *Équipements de protection individuelle : protecteurs auditifs*. CCHST. https://www.cchst.ca/oshanswers/prevention/ppe/ear_prot.html

Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail. (2020). *Statistiques annuelles 2019*. CNESST.

Commissions des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail. (2025). *Risques liés à l'exposition au bruit*. CNESST. https://www.centredoc.cnesst.gouv.qc.ca/pdf/Publication/PS_Bruit.pdf

Coupal, F. X., Negrini, A., Berbiche, D. et Doutres, O. (11-15 avril 2022). *Étude terrain du confort multidimensionnel des protecteurs auditifs de type bouchons d'oreille* [Communication] 16e Congrès français d'acoustique, Marseille, France.

Cyr-Desroches, M.-O. (2021). *Développement d'une oreille artificielle simplifiée et réaliste pour quantifier l'effet d'occlusion objectif* (Mémoire de maîtrise, École de Technologie Supérieure).

Dalaq, A. S., Melo, L., Sgard, F., Doutres, O. et Wagnac, E. (2023). Pressure induced by foam-earplugs on earcanal. *International Journal of Mechanical Sciences*, *241*, article 107970. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.107970

De Baermaker, S. (2020). *Cartographie de la sensibilité cutanée du conduit auditif humain : caractérisations mécaniques préalables au développement d'un bouchon sonde (Phase II).* (Mémoire de maîtrise, École de Technologie Supérieure).

Doutres, O. (2016-2020). *Development of a poroelastic material with graded architecture for optimal hearing protection* (Projet n° RGPIN-2016–06795) [Subvention]. CRSNG.

Doutres, O. (2023-2024). *Meta-earplug for improved acoustical comfort* (Projet n° I2IPJ 586099-2023) [Subvention]. CRSNG.

Doutres, O., Luan, Y., Cyr-Desroches, M.-O., Carillo, K., Richert, R. et Sgard, F. (2024). Designing an acoustical test fixture to evaluate the objective occlusion effect. *The Journal of the Acoustical Society of America, 155*(3Suppl.), A65. https://doi.org/10.1121/10.0026818

Doutres, O., Luan, Y., Cyr-Desroches, M.-O., Carillo, K., Richert, R. et Sgard, F. (2025). On the design of an acoustical test fixture for assessing the objective occlusion effect. *Applied Acoustics*, *228*, article 110295. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2024.110295

Doutres, O., Sgard, F., Benacchio, S., Terroir, J., Perrin, N., Trompette, N., . . . Gauvin, C. (2018). Earplug comfort: From subjective assessment on the field to objective measurement and simulation using augmented artificial heads. *The Journal of the Acoustical Society of America, 143*(3Suppl.), 1910. https://doi.org/10.1121/1.5036223

Doutres, O., Sgard, F., Terroir, J., Perrin, N., Jolly, C., Gauvin, C. et Negrini, A. (2019). A critical review of the literature on comfort of hearing protection devices: Definition of comfort and identification of its main attributes for earplug types. *International Journal of Audiology*, *58*(12), 824-833. https://doi.org/10.1080/14992027.2019.1646930

Doutres, O., Sgard, F., Terroir, J., Perrin, N., Jolly, C., Gauvin, C. et Negrini, A. (2022). A critical review of the literature on comfort of hearing protection devices: Analysis of the comfort measurement variability. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, *28*(1), 447-458. https://doi.org/10.1080/10803548.2020.1772546

Doutres, O., Sgard, F. et Terroir, J. (2017). A review about hearing protection comfort and its evaluation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *141*(5Suppl.), 4025. https://doi.org/10.1121/1.4989269

Doutres, O., Terroir, J., Jolly, C., Gauvin, C., Martin, L. et Negrini, A. (2020). Towards a metatheory explaining hearing protection device use among workers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *148*(4Suppl.), 2778. https://doi.org/10.1121/1.5147734

Doutres, O., Terroir, J., Jolly, C., Gauvin, C., Martin, L. et Negrini, A. (2022). Towards a holistic model explaining hearing protection device use among workers. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *19*(9), article 5578. https://doi.org/10.3390/ijerph19095578

Ezzaf, S. (2024). *Évaluation subjective et objective du confort des bouchons d'oreille en laboratoire* (Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke).

Ezzaf, S., Melo, L., Poissenot-Arrigoni, B., Saint-Gaudens, H., Berry, A., Sgard, F. et Doutres, O. (2023). Development of a realistic artificial ear dedicated to earplugs attenuation measurements. *Canadian Acoustics*, *51*(3), 115.

Giguère, C., Laroche, C., Vaillancourt, V. et Soli, S. D. (2010). Modelling speech intelligibility in the noisy workplace for normal-hearing and hearing-impaired listeners using hearing protectors. *International Journal of Acoustics and Vibration*, *15*(4), 156-167.

Groupe CSA. (2014). *Protecteurs auditifs : performances, sélection, entretien et utilisation*. Norme CSA Z94.2-14.

Hansen, M. O. (1998). *Occlusion effects. Part II: A study of the occlusion effect mechanism and the influence of the earmould properties* (Thèse de doctorat, Technical University of Denmark).

Heni, R. (2024). *Développement d'un conduit auditif artificiel pour la mesure de pression mécanique statique générée par des bouchons à oreille* (Mémoire de maîtrise, École de Technologie Supérieure).

Hill, R. (2022). *Artificial skin and « earplug/earcanal » friction coefficient*. The University of Sheffield.

Hill, R. M., Carré, M. J. et Lewis, R. (28-28 avril 2021). *Determination of the effects of cerumen on earplug comfort* [Communication]. 5th International Conference on BioTribology, en ligne.

Institut national de recherche et de sécurité. (2013). *Pourquoi mettre des bouchons d'oreille au travail ?* [Video]. INRS. https://www.youtube.com/watch?v=yV2Suk50h2I

Kersten, S., Sgard, F. et Vorlander, M. (2024a). Impact of the ear canal motion on the impedance boundary conditions in models of the occlusion effect. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *155*(1), 56-67. https://doi.org/10.1121/10.0024244

Kersten, S., Sgard, F. et Vorlander, M. (18-21 mars 2024b). *Impact of the ear canal motion on the occlusion effect for bone-conducted stimulation* [Communication]. DAGA, Hanovre, Allemagne.

Luan, Y. (2021). *Experimental and numerical study on the contribution of acoustic test fixtures to hearing protector sound attenuation: Sound transmission paths in the case of a double hearing protector and influence of eardrum acoustic impedance* (Thèse de doctorat, École de Technologie Supérieure). #5

Luan, Y., Cyr-Desroches, M.-O., Carillo, K., Doutres, O. et Sgard, F. (2022). *Development and evaluation of an artificial ear for quantifying the objective occlusion effect* [Communication]. 24th International Congress on Acoustics ICA, Gyeongju, Corée du Sud.

Luan, Y., Doutres, O., Nélisse, H. et Sgard, F. (2021). Démystifier la double protection auditive. *Substance ÉTS.* #5

Luan, Y., Sgard, F., Benacchio, S., Nélisse, H. et Doutres, O. (2019). A transfer matrix model of the IEC 60318-4 ear simulator: Application to the simulation of earplug insertion loss. *Acta Acustica United with Acustica*, *105*(9), 1258-1268. https://doi.org/10.3813/AAA.919403 . #5

Luan, Y., Sgard, F., Nélisse, H. et Doutres, O. (7-11 juillet 2019). *A coupled finite element/transfer matrix method to simulate the insertion loss of earplugs in an acoustic test fixture* [Communication]. 26th International Congress on Sound and Vibration (ICSV26), Montreal, QC.#5

Martin, L., Negrini, A., Gaudreau, M. A., Sgard, F. et Doutres, O. (7-11 juillet 2019). *Earplug personal attenuation rating (par) in noise-exposed workers: Evolution over a five weeks follow-up* [Communication]. 26th International Congress on Sound and Vibration (ICSV26), Montreal, QC.

Meinke, D. K., Berger, E. H., Driscoll, D. P., Neitzel, R. L. et Bright, K. (édit.). (2022). *The noise manual* (6e éd.). AIHA.

Melo, L., Dalaq, A. S., Doutres, O., Sgard, F. et Wagnac, E. (2023). Experimental investigation of the static mechanical pressure induced by roll-down foam earplugs. *Canadian Acoustics*, *51*(3), 116.

Melo, L., Dalaq, A. S., Sgard, F., Doutres, O., Legroux, L. et Wagnac, E. (2024). Measurement of the local static mechanical pressure of earplugs. *International Journal of Mechanical Sciences*, *275*, article 109327. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2024.109327

Negrini, A., Coupal, F. X., Martin, L., Gauvin, C., Poissenot-Arrigoni, B., Berbiche, D., . . . Doutres, O. (2021). *Rapport intermédiaire de l'étude terrain sur le confort des bouchons d'oreille*. IRSST. [Document non publié].

Negrini, A., Gauvin, C., Terroir, J., Perrin, N., Berbiche, D., Jolly, C., . . . Doutres, O. (2025). Development and validation of the North American COmfort of hearing PROtection

Device questionnaire (COPROD-NAQ). *Safety Science*, *181*, article 106688. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106688

Nélisse, H., Saint-Gaudens, H., Sgard, F. et Doutres, O. (2021). *Mise au point d'une méthode de mesure objective de l'effet d'occlusion basée sur la voix* (Rapport nº R-1118). IRSST. https://doi.org/10.70010/MIZV5279

Nichols, A. L., & Maner, J. K. (2008). *The Good-Subject Effect: Investigating Participant Demand Characteristics*. The Journal of General Psychology, 135(2), 151–165.

Paris, M. (2018). *Cartographie de la sensibilité cutanée du conduit auditif humain* (Mémoire de maîtrise, École de Technologie Supérieure).

Poissenot-Arrigoni, B. (2023). *Tools and methods dedicated to the design and selection of earplugs that are adapted to the user' earcanal morphology and physically comfortable* (Thèse de doctorat, École de Technologie Supérieure).

Poissenot-Arrigoni, B., Benacchio, S., Doutres, O. et Sgard, F. (2019). *An artificial ear to assess objective indicators related to the acoustical comfort dimension of earplugs: Validation of a vibro acoustic model for insertion loss and occlusion effect assessment* [Communication]. 26th International Congress on Sound and Vibration (ICSV26), Montreal, QC.

Poissenot-Arrigoni, B., Doutres, O., Berbiche, D., Negrini, A. et Sgard, F. (2022). *Earcanal morphology and its relations to some attributes of earplugs comfort* [Communication]. 28th International Congress on Sound and Vibration (ICSV28), Singapour, Malaisie.

Poissenot-Arrigoni, B., Doutres, O., Negrini, A., Berbiche, D. et Sgard, F. (2026). Analysis of the functional and acoustical comfort of earplugs experienced by a group of workers in Canadian companies and identification of the influencing variables. *Safety Science, 196,* article 107098. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2025.107098

Poissenot-Arrigoni, B., Law, C. H., Berbiche, D., Doutres, O. et Sgard, F. (2022). *Classification anthropométrique de conduits auditifs via un algorithme d'intelligence artificielle pour le design d'oreilles artificielles représentatives d'une population cible* [Communication]. Congrès français d'acoustique, Marseille, France.

Poissenot-Arrigoni, B., Law, C. H., Berbiche, D., Sgard, F. et Doutres, O. (2022). Morphologic clustering of earcanals using deep learning algorithm to design artificial ears dedicated to earplugs attenuation measurement. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *152*(6), 3155-3169. https://doi.org/10.1121/10.0015237

Poissenot-Arrigoni, B., Law, C. H., Sgard, F. et Doutres, O. (2020a). Earcanal anthropometry analysis for the design of realistic artificial ears. *The Journal of the Acoustical Society of America, 148*(4Suppl.), 2779. https://doi.org/10.1121/1.5147737

Poissenot-Arrigoni, B., Law, C. H., Sgard, F. et Doutres, O. (2020b). *Preserving workers' hearing health by improving earplug efficiency Popular version of paper 5aNSa4* [Communication] 179th ASA Meeting, Acoustics Virtually Everywhere, en ligne.

https://acoustics.org/5ansa4-preserving-workers-hearing-health-by-improving-earplug-efficiency-bastien-poissenot-arrigoni/

Poissenot-Arrigoni, B., Law, C. H., Sgard, F. et Doutres, O. (2020c). Améliorer les bouchons d'oreilles pour protéger les travailleurs. *Substance ÉTS.*

Poissenot-Arrigoni, B., Martin, L., Negrini, A., Berbiche, D., Doutres, O. et Sgard, F. (2025). Reliability of an extended version of the 3m™ eargage tool to assess earcanal size and assist earplug selection. *International Journal of Audiology*, *64*(4), 392-401. https://doi.org/10.1080/14992027.2024.2352045

Poissenot-Arrigoni, B., Negrini, A., Berbiche, D., Sgard, F. et Doutres, O. (2023a). Analysis of the physical discomfort of earplugs experienced by a population of Canadian workers and identification of the influencing variables. *International Journal of Industrial Ergonomics*, *98*, article 103508. https://doi.org/10.1016/j.ergon.2023.103508

Poissenot-Arrigoni, B., Negrini, A., Berbiche, D., Sgard, F. et Doutres, O. (2023b). Functional discomfort of earplugs and its influencing variables. *Canadian Acoustics*, *51*(3), 112-113.

Règlement sur la santé et la sécurité du travail, RLRQ, c S-2.1, r.13.

Saint-Gaudens, H. (2025). *Understanding the discomfort induced by earplugs when hearing our own voice: An experimental investigation of the occlusion effect in laboratory conditions* (Thèse de doctorat, École de Technologie Supérieure).

Saint-Gaudens, H., Nélisse, H., Doutres, O. et Sgard, F. (2019). *Investigating the effect of excitation type and sound attenuation on the occlusion effect induced by hearing protection devices* [Communication]. 2019 NHCA Annual Conference, Grapevine, TX.#2

Saint-Gaudens, H., Nelisse, H., Sgard, F. et Doutres, O. (2022). Towards a practical methodology for assessment of the objective occlusion effect induced by earplugs. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *151*(6), 4086-4100. https://doi.org/10.1121/10.0011696 #2

Saint-Gaudens, H., Nélisse, H., Sgard, F. et Doutres, O. (2023a). Assessment of the effect of earplug type, insertion depth and background noise level on the perception of the occlusion effect in laboratory condition. *Canadian Acoustics, 51*(3), 118.

Saint-Gaudens, H., Nélisse, H., Sgard, F. et Doutres, O. (2023b). How to measure the effect that makes our voice sound hollow? *Substance ÉTS*.

Saint-Gaudens, H., Nélisse, H., Sgard, F., Laville, F. et Doutres, O. (2019). *Comparison of different excitations to assess the objective occlusion effect measured on human subjects* [Communication]. 26th International Congress on Sound and Vibration (ICSV26), Montreal, QC.

Sgard, F. (2016-2021). Modélisation vibroacoustique d'une tête humaine munie d'un protecteur auditif (Projet n° RGPIN-2016-04926) [Subvention]. CRSNG.

Sgard, F., Benacchio, S., Luan, Y., Xu, H., Carillo, K., Doutres, O., . . . De Guise, J. (2018). Vibroacoustic modeling of an in vivo human head wearing a hearing protection device using the finite element method. Dans *Proceedings of Euronoise 2018* (p. 899-906). EAA. http://www.euronoise2018.eu/docs/papers/155_Euronoise2018.pdf

Sgard, F., Carillo, K., Kersten, S., Richert, R. et Doutres, O. (2025). Virtual and experimental acoustical comfort testers for earplugs. Dans D. de la Prida, J. Ramis et M. Machimbarrena (édit.), *Proceedings of the 11th Convention of the European Acoustics Association, Forum Acusticum / EuroNoise 2025, Málaga, Spain, June 23-26, 2025* (p. 3125-3132). EAA; SEA. https://doi.org/10.61782/fa.2025.0958

Sgard, F., Kersten, S., Carillo, K., Zimpfer, V., Blondé-Weinmann, C., Hamery, P. et Doutres, O. (24-25 septembre 2024). *Augmented ATFs to measure the sound attenuation of hearing protectors for stationary and impulse noise* [Communication]. Battlefield Acoustics, Saint-Louis, France.

Sgard, F., Poissenot-Arrigoni, B., Melo, L., Dalaq, A. S., Wagnac, E. et Doutres, O. (2024). Virtual and experimental physical comfort testers for earplugs. Dans *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings* (p. 551-562). INCE. https://doi.org/10.3397/IN_2024_2483

Sgard, F., Poissenot-Arrigoni, B., Negrini, A., Berbiche, D., Gauvin, C. et Doutres, O. (2024). Characteristics influencing the comfort of earplugs experienced by workers in Canadian companies. *Occupational Medicine, 74*(Suppl. 1). https://doi.org/10.1093/occmed/kqae023.1362

Sgard, F., Xu, H., Carillo, K., Wagnac, E. et De Guise, J. (2023). Enhanced finite-element model and acoustic test fixture to assess the objective occlusion effect induced by earplugs under bone-conducted stimulation. *Proceedings of InterNoise23, Chiba, Japan* (p. 310-321). INCE. https://doi.org/10.3397/IN_2023_0059

Terroir, J. (9-11 avril 2019). *Le confort des bouchons d'oreille* [Communication]. Bruit et vibrations au travail, Nancy, France.

Terroir, J. (11-15 avril 2022). *Confort des bouchons d'oreille : évaluation en laboratoire & analyse comparative terrain/laboratoire* [Communication] 16e Congrès français d'acoustique, Marseille, France.

Terroir, J. (2022). Le confort des bouchons d'oreille en questions. *Travail & Sécurité*, (834), 6.

Terroir, J., Doutres, O. et Sgard, F. (2017). *Towards a "global" definition of the comfort of earplugs* [Communication]. 46th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (Internoise 2017): Taming Noise and Moving Quiet, Hong Kong, Chine.

Terroir, J., Perrin, N. et Wild, P. (2021). Confort des bouchons d'oreille : déploiement d'un questionnaire d'évaluation en entreprise. *Références en Santé au Travail*, (168), 39-53.

Terroir, J., Perrin, N. et Wild, P. (2022). Comfort of earplugs: Results of a field survey based on the COPROD questionnaire. *Ergonomics*, *65*(9), 1173-1193. https://doi.org/10.1080/00140139.2021.1990415

Terroir, J., Perrin, N., Wild, P., Doutres, O., Sgard, F., Gauvin, C. et Negrini, A. (2021). Assessing the comfort of earplugs: Development and validation of the French version of the COPROD questionnaire. *Ergonomics*, *64*(7), 912-925. https://doi.org/10.1080/00140139.2021.1880027

Terroir, J. et Wild, P. (7-11 juillet 2019). *In situ evaluation of earplugs comfort.* [Communication]. 26th International Congress on Sound and Vibration (ICSV26), Montreal, QC.

Valentin, O., Ezzaf, S., Gauthier, P. A., Berbiche, D., Negrini, A., Doutres, O., . . . Berry, A. (2024). Assessing the multidimensional comfort of earplugs in virtual industrial noise environments. *Applied Ergonomics*, *121*, 104343. https://doi.org/10.1016/j.apergo.2024.104343

Valentin, O., Gauthier, P. A., Berry, A., Negrini, A., Sgard, F. et Doutres, O. (2022). *Subjective assessment of hearing protectors' comfort in laboratory environment.* IRSST. [Document non publié]

Valentin, O., Gauthier, P.-A., Proulx, F. et Berry, A. (2020). *Objective evaluation of sound environment reproduction for comfort of hearing protector devices: Acoustic background spectrum synthesis versus multichannel cross-synthesis* [Communication]. Forum Acusticum, Lyon, France.

Valentin, O., Proulx, F., Gauthier, P.-A., Grandjean, P. et Berry, A. (7-11 juillet 2019). *Multichannel cross-synthesis for virtual and frequency balance modification of microphone array recordings* [Communication]. 26th International Congress on Sound and Vibration (ICSV26), Montreal, QC.

Vink, P. et Hallbeck, S. (2012), Editorial: Comfort and discomfort studies demonstrate the need for a new model. *Applied Ergonomics 43*(2), 271-276. https://doi.org/10.1016/j.apergo.2011.06.001

Xu, H. (2022). *A finite element model of a human head and a corresponding acoustic test fixture to assess the objective occlusion effect induced by earplugs under bone-conducted stimulation* (Thèse de doctorat, École de Technologie Supérieure). #5

Xu, H., Sgard, F., Carillo, K., Wagnac, E. et De Guise, J. (2020). A three-dimensional finite-element model of a human head for predicting the objective occlusion effect induced by earplugs. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *148*(4Suppl.), 2780-2780. https://doi.org/10.1121/1.5147739 #5

Xu, H., Sgard, F., Carillo, K., Wagnac, E. et De Guise, J. (2021a). On the sound radiation of head tissues in the earcanal at low frequencies induced by a bone-conducted stimulation. *Canadian Acoustics, 49*(3), 58). #5

Xu, H., Sgard, F., Carillo, K., Wagnac, E. et De Guise, J. (2021b). Simulation of the objective occlusion effect induced by bone-conducted stimulation using a three-dimensional finite-element model of a human head. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *150*(5), 4018-4030. https://doi.org/10.1121/10.0007230 #5

Xu, H., Sgard, F., Carillo, K., Wagnac, E. et De Guise, J. (2023). When earplugs become annoying: The occlusion effect. *Substance ÉTS .* #5

Xu, H., Sgard, F., Wagnac, E. et De Guise, J. (7-11 juillet 2019). *Development of an entire human head finite element model based on in-vivo medical images for investigation of sound transmission* [Communication]. 26th International Congress on Sound and Vibration (ICSV26), Montreal, QC. #5

Zimpfer, V., Blondé-Weinmann, C., Hamery, P., Joubaud, T. et Sgard, F. (2023). Measurements in the open and closed earcanal: Comparison between different artificial head concepts. *Canadian Acoustics, 51*(3), 100-101.

ANNEXE A – LIMITATIONS DES TRAVAUX

Tableau 5 : Limites détaillées des travaux

Catégorie	Limites principales
Échantillon des participants	<u>Sur le terrain</u> • Les femmes étaient peu représentées dans l'échantillon. Cette distribution reflète en partie la réalité du milieu de travail, où l'exposition aux bruits dangereux concerne majoritairement les hommes. Toutefois, cette sous-représentation limite la possibilité de généraliser pleinement les résultats à l'ensemble de la population, notamment aux contextes professionnels ou sociaux où la proportion de femmes exposées pourrait être différente. • La majorité des participants avaient déjà de l'expérience quant à un port régulier des bouchons et ont généralement perçu les bouchons qu'ils ont testés comme relativement confortables. Un échantillon de travailleurs moins habitués aux bouchons d'oreilles pourrait donner lieu à des conclusions différentes. <u>En laboratoire</u> • La petite taille de l'échantillon et les caractéristiques spécifiques des participants (jeunes adultes, sans expérience avec les bouchons d'oreilles) pourraient limiter la généralisation des résultats à d'autres populations de travailleurs plus expérimentés ou ayant des caractéristiques démographiques différentes.
Questionnaires	• L'étude a révélé les difficultés pour bien mesurer certains concepts par exemple le confort physique (attribut de pression mécanique dans l'oreille) et l'EO et il reste encore une marge de progrès pour l'amélioration du questionnaire. • Certaines dimensions du confort n'ont pas été étudiées (ex, confort thermique) • En laboratoire, le questionnaire sur le confort a été répondu qu'une seule fois et pourrait avoir limité la richesse des perceptions.
Bouchons testés	• Les bouchons sur mesure n'ont pas pu faire l'objet d'une analyse aussi poussée que les autres modèles du fait de contraintes logistiques et financières. • Les bouchons n'avaient pas suffisamment de contraste entre eux pour certains indicateurs comme l'EO, ce qui fait qu'il n'y a pas de différence significative dans les analyses de confort perçu. • Les résultats des études sur les facteurs influençant le confort des bouchons d'oreilles suggèrent que l'amélioration de leur dimension physique repose en grande partie sur les fabricants. En revanche, les dimensions fonctionnelle et acoustique dépendent davantage des acteurs des milieux de travail. Cette conclusion s'applique aux

	bouchons d'oreilles étudiés ici, qui étaient des modèles jetables ou réutilisables du commerce, sans dispositifs acoustiques adaptés au niveau de bruit externe ni fonctionnalités spécifiques pour atténuer l'effet d'occlusion. De ce fait, il est possible que les bouchons testés ne se soient pas démarqués en termes de perception de l'inconfort lié aux sons internes et externes. Pour des bouchons conçus spécifiquement pour augmenter le confort fonctionnel et acoustique, la distinction des rôles entre manufacturiers et acteurs des milieux de travail pourrait ne pas être aussi tranchée.

Caractéristiques de l'environnement	<u>Caractéristiques psychosociales</u>
	• Variabilité de l'environnement de travail : Il n'a pas été possible de tenir compte de tous les changements organisationnels et personnels qui peuvent survenir. L'environnement de travail peut varier au fil du temps, ce qui n'a pas été contrôlé dans l'étude.
	<u>Caractéristiques physiques</u>
	• Étude terrain
	  • Pas de surveillance continue des conditions atmosphériques aux postes de travail individuels
	  • Pas de surveillance continue des niveaux de bruit aux postes de travail ou sur les travailleurs (dosimétrie)
	• Environnements sonores virtuels dans l'étude labo : L'étude a utilisé des environnements sonores industriels virtuels reproduits en laboratoire. Bien que cette approche permette un contrôle rigoureux des conditions expérimentales, elle pourrait ne pas refléter pleinement la complexité et la variabilité des environnements sonores réels sur les lieux de travail.

Caractéristiques des personnes	<u>Caractéristiques psychosociales</u>
	• Absence de mesure de l'activité de travail dans l'étude terrain
	<u>Caractéristiques physiques</u>
	• Morphologie des conduits auditifs
	  • Participants de l'étude terrain
	  ○ Un seul processus de regroupement et une procédure de validation ont été utilisés pour regrouper les conduits auditifs. D'autres algorithmes de regroupement et/ou tests statistiques pour valider les regroupements auraient pu être utilisés et auraient pu mener à une autre structure de regroupement des conduits auditifs.
	  ○ La description de la morphologie des conduits auditifs est limitée à 15 indicateurs morphologiques qui décrivent la partie du conduit auditif où les bouchons d'oreilles sont censés être insérés (entre l'entrée et le deuxième coude). En particulier, certains paramètres essentiels à l'adaptation du bouchon à la forme tridimensionnelle du canal, tels que les angles d'azimut

	et d'élévation n'ont pas été considérés alors qu'ils pourraient avoir un effet sur certaines sous-dimensions du confort, notamment celles liées à l'insertion et au retrait des bouchons d'oreille. D'autres propriétés anatomiques qui peuvent également être responsables de la variabilité interindividuelle de l'atténuation du son, comme les propriétés mécaniques des tissus de l'oreille, la position de la jonction cartilagineuse/osseuse ou l'impédance du tympan, n'ont pas été prises en compte. ○ Le type de formation utilisé dans l'étude de terrain originale a mené à une valeur de PAR considérée suffisamment élevée pour supposer que la variabilité interindividuelle mesurée du PAR pouvait principalement être attribuée aux différences morphologiques entre les conduits auditifs. Cependant, on peut supposer que les corrélations entre les indicateurs morphologiques et le PAR auraient pu être plus élevées si la séance de formation avait été conçue spécifiquement pour cette étude (ou si un ajustement par un expérimentateur avait été effectué pour les mesures de PAR) et, par conséquent, aurait ciblé le PAR maximal réalisable pour un bouchon d'oreille donné. • Participants de l'étude labo ○ Les différences individuelles dans la taille et la forme du conduit auditif des participants n'ont pas été contrôlées. • Outil de mesure de taille du conduit auditif 3M™ Eargage « étendu » • Influence potentielle des couvre-doigts en nitrile : Bien que les couvre-doigts en nitrile utilisés pour des raisons d'hygiène lors de l'insertion de l'Eargage « étendu » dans le conduit aient été très fins, l'étude ne peut exclure qu'ils aient influencé les mesures en modifiant la texture des sphères de l'Eargage « étendu ». • Subjectivité de l'évaluation avec l'Eargage « étendu » : Les audiologistes ont noté des cas où il y avait un espace autour de la jauge XL dans de nombreuses oreilles, indiquant l'absence de contact avec la paroi du canal auditif, même lorsque la languette de la jauge adhérait à la conque. Cela suggère une certaine subjectivité dans l'interprétation des résultats.
Caractéristiques des bouchons	<u>Caractéristiques psychosociales</u> • Les caractéristiques psychosociales des bouchons d'oreilles, telles que l'attractivité, la discrétion ou l'esthétique, n'ont pas été évaluées.
Caractéristiques physiques du système couplé oreille-bouchon	• Profondeur d'insertion du bouchon • Pas de suivi en continu de la profondeur d'insertion du bouchon pour avoir une idée si le participant était protégé en tout temps. • Géométrie du canal auditif déformé par l'insertion d'un bouchon • Méthode lourde qui requiert l'accès à une IRM

	• Résolution limitée des images IRM :
	  ○ Bien que l'IRM offre une alternative non invasive aux méthodes traditionnelles, la résolution des images reste un facteur limitant.
	  ○ Il peut être difficile de mesurer avec précision les déplacements dans les zones les plus étroites ou les plus complexes du conduit auditif, notamment au niveau du deuxième coude ou de la jonction cartilage/os.
	• L'insertion des bouchons a été contrôlée visuellement par un oto-rhino-laryngologiste. Or, la façon dont un bouchon est inséré peut influencer significativement le déplacement du conduit auditif. Il serait important de standardiser la procédure d'insertion dans les études futures ou d'étudier l'impact de différents types d'insertion sur le déplacement.
	• Les résultats ont été obtenus avec un seul participant. La variabilité interindividuelle anatomique étant importante, il est crucial d'inclure davantage de participants aux profils anatomiques variés pour augmenter la portée.
	• Les études se sont focalisées sur le déplacement statique du conduit auditif. Or, le conduit auditif est une structure dynamique qui se déforme également lors de mouvements physiologiques comme la parole, la mastication ou la déglutition. Il serait pertinent d'explorer le déplacement dynamique du conduit auditif lors de mouvements physiologiques (parole, mastication) pour mieux appréhender son impact sur le confort des dispositifs.
	• Atténuation acoustique
	• L'étude terrain et en laboratoire n'a pas permis un suivi continu de l'atténuation des bouchons d'oreilles. Ce suivi aurait pu fournir un indicateur acoustique précieux de la phase d'interaction, utile à la fois pour l'objectivation des résultats et pour vérifier si les participants étaient effectivement protégés en tout temps.
	• Testeurs expérimentaux
	  ○ Les oreilles artificielles comportent encore des défauts de fabrication qu'il est nécessaire de corriger afin de minimiser certaines incertitudes de mesures créées par exemple par des fuites acoustiques.
	  ○ Le prototype de tête artificielle réaliste est pour l'instant non instrumenté avec un microphone dans l'oreille.
	  ○ Les oreilles artificielles tronquées réalistes avec tissus environnants ainsi que la tête artificielle réaliste n'ont pas de simulateur d'oreille moyenne adapté à ces géométries et n'intègrent pas de système de chauffage.
	  ○ Certains phénomènes observés lors des mesures d'atténuation avec les oreilles artificielles réalistes, tronquées et tissus environnants ou la tête artificielle complète restent

	encore inexpliqués. Pour certains types de bouchon, les atténuations peuvent s'avérer trop faibles par rapport à celles observées sur des participants. Les raisons possibles invoquées sont les transmissions parasites (dans le cas des oreilles tronquées), les matériaux synthétiques utilisés qui peuvent mal reproduire les vibrations du canal auditif et l'interaction entre peau et bouchon (fuites acoustiques, mauvaise reproduction de la déformation statique du système peau/bouchon), l'absence de simulateur d'oreille moyenne et des simplifications trop importantes sur la constitution des tissus mous (par ex. couche homogène au lieu de plusieurs couches). ○ Dans le cas du testeur utilisant la méthode en tube d'impédance, l'oreille tronquée est dépourvue de pavillon, et le conduit auditif artificiel présente une géométrie cylindrique à section circulaire constante. La plage de fréquences opérationnelle est limitée par la fréquence de coupure du tube, déterminée par ses dimensions latérales. Actuellement, cette fréquence de coupure se situe autour de 6,5 kHz, tandis que les mesures standardisées s'étendent généralement jusqu'à l'octave de 8 kHz. • Testeurs virtuels ○ Les modèles numériques associés aux testeurs expérimentaux basés sur les oreilles artificielles réalistes tronquées avec tissus environnants n'ont été que partiellement validés et nécessitent des améliorations. ○ Parmi les limites des modèles, citons les simplifications anatomiques. D'abord, il y a celles qui omettent certains éléments comme les capteurs ou des joints toriques. Ensuite, le manque de connaissance sur les lois de comportement et les propriétés des matériaux (tissus et bouchons), et de leurs incertitudes constitue une autre limite. De plus, la calibration du modèle qui n'a pas encore été effectuée, la modélisation non satisfaisante de la source sonore, des conditions aux limites et des conditions de couplage entre tissus et bouchons qui ne tiennent pas compte de leur déformation respective, l'absence de prise en compte de l'effet de la température sur les propriétés des matériaux. ○ Les modèles présentent plusieurs limites, notamment des simplifications anatomiques ou l'omission de certains éléments, tels que les capteurs ou les joints toriques. À cela s'ajoutent un manque de connaissance sur les lois de comportement et les propriétés des matériaux (tissus et bouchons), ainsi que leurs incertitudes. De plus, la calibration des modèles n'a pas encore été réalisée. La modélisation de

	la source sonore, des conditions aux limites, ainsi que des conditions de couplage entre tissus et bouchons, qui supposent que ces derniers ne se déforment pas, reste à améliorer. Enfin, l'effet de la température sur les propriétés des matériaux n'est pas intégré dans les modèles. ○ Le comportement viscoélastique des tissus et des bouchons n'est pas pris en compte, car encore mal connu dans le domaine de fréquences audibles. ○ Les propriétés mécaniques des tissus humains in vivo ne peuvent pas être déterminées de façon directe et un processus de recalage est nécessaire. ○ Les modèles de la tête artificielle complète représentant le participant ainsi que le testeur expérimental n'ont pas été calibrés ni validés. ○ Les modèles 3D sont très gourmands en temps de calcul lorsqu'on veut prédire l'atténuation en moyennes et hautes fréquences (>1000Hz). • Effet d'occlusion • Testeurs expérimentaux ○ Comme pour l'atténuation acoustique, certains phénomènes observés lors des mesures d'EO avec les oreilles artificielles réalistes tronquées et tissus environnants ou la tête artificielle complète restent encore inexpliqués. Les raisons de ces différences sont identiques à celles évoquées pour la mesure de l'atténuation acoustique auxquelles s'ajoute la façon d'exciter le système mécaniquement qui engendrent des difficultés additionnelles (par ex. contrôle du rayonnement acoustique et positionnement du transducteur). ○ Le testeur basé sur l'oreille tronquée simplifiée excitée par un pot vibrant ✓ Utilise un conduit auditif cylindrique simple avec une section transversale constante ✓ Ne comporte pas de simulateur d'oreille moyenne ni de système de chauffage. ✓ Présente des résonances qui peuvent ne pas être représentatives de la dynamique de la tête à basse fréquence, ce qui peut entraîner une surestimation de l'EO. ✓ Peut entraîner une sous-estimation de l'EO par rapport aux mesures sur les participants, générées par un transducteur osseux moins bruyant du fait que la contribution du chemin aérien domine celle du chemin de conduction osseuse dans la plage de fréquences d'intérêt, à l'exception de 120 Hz et 200 Hz. Par ailleurs, la contribution significative de l'oreille ouverte à l'OE soulève

	des questions quant à la possibilité de comparer les données de la littérature obtenues auprès des participants entre elles, ainsi qu'avec les résultats de la simulation, car le niveau de bruit de fond peut varier d'un environnement de mesure à l'autre. ✓ Peut fournir des résultats qui comporte une variabilité importante du fait de la qualité de la fixation adhésive, réalisée par du ruban adhésif double face ainsi que du comportement modal du banc d'essai, exacerbé lorsque l'oreille est comprimée. • Testeurs virtuels o Les limites de ces testeurs sont similaires à celles évoquées pour l'atténuation acoustique. o Les modèles numériques associés aux testeurs expérimentaux, basés sur les oreilles artificielles réalistes tronquées avec tissus environnants, ainsi que les modèles de la tête artificielle complète représentant le participant et le testeur expérimental, n'ont pas été calibrés et n'ont été que partiellement validés. • Force radiale et PMS • Testeurs expérimentaux o Testeur « RFT » ✓ Le dispositif ne peut être utilisé que pour les bouchons d'oreilles de forme cylindrique. ✓ Le système fournit une force radiale ou une valeur moyenne de PMS pour un diamètre final donné alors qu'un conduit auditif réel a une section transversale variable et est courbé. ✓ Le canal auditif créé par la machine a des parois rigides en métal et ne tient donc pas compte de la présence de tissus mous environnants. o Testeur « OPT » ✓ Le dispositif est sensible aux vibrations externes. ✓ Les canaux auditifs artificiels utilisés sont rigides et ne tiennent pas compte des tissus mous (peau, cartilage). ✓ Le système permet les mesures à température ambiante uniquement. Il ne comporte pas de système de chauffage. ✓ Le système ne comporte présentement qu'une seule sonde optique, ce qui peut être rébarbatif si des mesures en plusieurs points du canal sont souhaitées. o Testeur PMS avec peau artificielle ✓ Le capteur capacitif est limité à une forme cylindrique simplifiée du canal

	✓ L'effet mécanique de la couche de tissu conducteur utilisée dans le capteur sur la PMS n'est pas connu ✓ Le signal recueilli par certaines cellules du capteur est sujet à une pollution par les cellules environnantes (couplage entre taxels). ✓ La procédure de calibration du dispositif n'est pas optimale. • Testeurs virtuels o Les modèles actuels reposent sur des hypothèses simplificatrices liées à : ✓ La constitution anatomique de la peau (monocouche et épaisseur constante). ✓ La loi de comportement et les propriétés des matériaux notamment celles des tissus mous. ✓ La compression initiale du bouchon et l'insertion par déplacement imposé sans interférence avec les parois du conduit auditif. o Les modèles bidimensionnels peuvent surestimer la SMP par rapport aux modèles 3D. o Les modèles 3D sont très gourmands en temps de calcul. o Seuls les bouchons en mousse à comprimer PVC ont été étudiés dans un canal auditif unique (pas de variabilité interindividuelle). • Force d'extraction (testeur expérimental) • Les forces mesurées peuvent être mal estimées par rapport à celles qui le seraient sur des participants car : o Les canaux auditifs artificiels utilisés sont ✓ Rigides et ne tiennent pas compte des tissus mous (peau, cartilage). ✓ Secs et ne comportent pas de lubrifiant analogue au cérumen o Les mécanismes physiques impliqués dans l'extraction du bouchon d'oreille hors du canal auditif en le poussant par l'arrière par rapport à le tirer par l'avant, en particulier pour les bouchons d'oreilles à base de mousse o Les mécanismes physiques en jeu lors de l'extraction d'un bouchon d'oreille en mousse peuvent varier selon que le bouchon est tiré par sa face en contact avec l'air extérieur comme cela serait fait en pratique ou poussé par la face en contact avec l'air du canal auditif comme c'est le cas dans le testeur proposé, en particulier pour les bouchons d'oreilles à base de mousse. Ces derniers peuvent en effet se déformer de façon très différente lors des deux procédures d'extraction. • Coefficient de friction peau/bouchon (testeur expérimental)

	• Puisque le testeur repose sur le testeur RFT et de force d'extraction, il est assujetti aux mêmes limitations.
	• La force radiale présente dans le testeur de force d'extraction est supposée refléter celle obtenue avec le testeur RFT, mais cette hypothèse peut ne pas être vérifiée, car :
	  ○ Les profils de compression des bouchons d'oreilles en mousse utilisés dans les testeurs RFT et de force d'extraction sont différents et par conséquent la force radiale peut être différente dans les deux cas.
	  ○ La tige utilisée dans le testeur de force d'extraction peut potentiellement déformer le bouchon d'oreille avant que le glissement ne se produise, en particulier dans le cas de bouchons d'oreilles en mousse et peut également avoir un impact sur la force radiale.
	• La force radiale et la force d'extraction ne sont pas mesurées simultanément à l'aide de la même configuration si bien qu'on ne peut qu'obtenir le coefficient de friction statique.

Indices de confort	• Caractère généralisable des formules : Les formules de calcul des indices de confort ne sont pas entièrement généralisables. Bien que les éléments des niveaux de confort spécifiques utilisés pour mesurer les dimensions du confort puissent être appliqués dans d'autres études avec différents échantillons et contextes de travail, les coefficients pourraient différer selon le contexte spécifique.
Analyses statistiques	• Le nombre de variables indépendantes potentielles (caractéristiques de la triade) est élevé, ce qui peut affecter la robustesse des analyses statistiques, même avec un nombre relativement important de participants. • Certaines tendances observées sont difficiles à interpréter. Par exemple, des comportements opposés entre les conduits auditifs droit et gauche, ou des différences entre les participants droitiers, gauchers et ambidextres. Ces variations soulèvent la question d'une possible influence liée à la sous-représentation de certaines catégories au sein de l'échantillon pour faire des analyses statistiques robustes. • Hypothèse d'indépendance des éléments de la triade dans les analyses statistiques : Étant donné le grand nombre de caractéristiques de la triade évaluées subjectivement à l'aide de questionnaires et objectivement en laboratoire par rapport aux données des questionnaires, une méthodologie a été mise au point pour trier les caractéristiques de la triade qui influencent de manière significative les différentes dimensions du confort afin de pouvoir mener les analyses statistiques à partir d'un modèle linéaire à effets mixtes. Cette méthodologie a considéré indépendamment chaque

	élément de la triade et a donc négligé les effets d'interaction possibles. • Objectivation de l'EO : Une part substantielle de la variance des modèles linéaires à effets mixtes reste inexpliquée. Le pouvoir explicatif des modèles pourrait potentiellement être amélioré en intégrant des caractéristiques physiques et psychosociales supplémentaires de la personne, telles que les caractéristiques morphologiques détaillées du conduit auditif, l'expérience antérieure avec des dispositifs de protection auditive, les antécédents professionnels et la connaissance des risques liés à l'exposition au bruit.

Influence des caractéristiques de la triade sur le confort physique, fonctionnel et acoustique — objectivation	• Pour le confort physique, la force radiale a été utilisée comme caractéristique relative à la pression exercée par le bouchon sur le conduit pour une insertion donnée du bouchon, plutôt que la PMS moyenne. Mais le classement des bouchons relatif aux forces radiales et aux PMS moyennes étant différent, la question se pose si la PMS ne permettrait pas d'établir des corrélations plus importantes. Dans la même lignée, la force radiale quantifie une valeur globale de la pression exercée par un bouchon, mais la PMS dans un canal auditif varie spatialement. Certaines zones du conduit sont plus comprimées que d'autres et la question d'incorporer l'information de distribution spatiale de la pression comme caractéristique utilisée dans les analyses statistiques du confort se pose.
	• Seul un nombre limité de caractéristiques de la triade « Environnement /utilisateur /bouchon » a été évalué.
	• Pour l'objectivation de l'EO
	  • Seules quatre paires de bouchons ont été considérées dans une condition unique correspondant à la production de la voix dans une salle calme. Cette condition élimine les variations d'effort vocal qui pourraient se produire naturellement dans des situations réelles.
	  • Plusieurs participants ont demandé de tester à nouveau la paire de bouchons d'oreilles qu'ils avaient testée en premier, car il était difficile de se souvenir de leurs perceptions sur toutes les paires, en particulier lorsque les différences entre les bouchons d'oreilles étaient subtiles.
	  • Même s'il a été démontré lors de tests durant quelques minutes que les méta-bouchons d'oreilles induisent une réduction significative de l'amplification des basses fréquences ainsi qu'un meilleur naturel de la voix, il n'est pas certain qu'ils offrent un confort acoustique suffisant pour une utilisation prolongée.
	• Les résultats observés dans cette étude pourraient différer pour les individus qui dépendent fortement de la performance vocale, comme les chanteurs ou les musiciens qui jouent des cuivres, car leurs besoins acoustiques et les défis liés à l'EO peuvent être uniques.

	• Le caractère prédictif des indices de confort objectivés associés à certaines sous-dimensions ou attributs n'a pu être validé en raison de l'utilisation de la totalité des données pour construire ces indices.

ANNEXE B – PISTES DE RECHERCHE

Tableau 6 : Pistes de recherche

Catégorie	Pistes de recherche

Échantillon des participants	• Explorer d'autres populations de travailleurs pour accroître la portée des conclusions
	  • Considérer, dans la mesure du possible, des échantillons qui permettent d'analyser l'effet du sexe ou de l'âge par exemple.
	  • Cibler une population moins habituée à utiliser des bouchons d'oreilles afin de mieux comprendre le confort ressenti par les individus qui n'ont pas encore adopté régulièrement des protections auditives. Cela permettrait d'obtenir des informations sur ceux qui n'ont pas encore terminé la période d'acclimatation, essentielle pour une adhésion totale aux protecteurs auditifs.

Questionnaires	• Améliorer la formulation des questions pour mieux mesurer certains concepts difficiles à appréhender comme l'effet d'occlusion par exemple. • Considérer d'autres dimensions du confort telles que le confort thermique. • Valider une version courte du COPROD-NAQ afin de mesurer toutes les dimensions du confort tout en améliorant ses propretés pratiques, comme la durée de la passation. • Développer un site web pour la collecte et l'analyse des réponses par un système expert afin de rendre plus agile et pratique son utilisation par les parties prenantes en SST et en recherche. • Faire des campagnes de mesure en laboratoire pour cibler des attributs spécifiques du confort physique (ex. chaleur, démangeaison…), fonctionnel et acoustique (ex. intelligibilité de la parole et des alarmes) et ainsi améliorer les questionnaires, les mesures d'indicateurs objectifs et permettre une objectivation plus robuste (comme ce qui a été fait pour l'effet d'occlusion).
Bouchons testés	• Explorer de manière exhaustive et comprendre davantage le confort des bouchons sur mesure et d'autres bouchons non testés dans le projet.
Caractéristiques de l'environnement	• Idéalement, faire un suivi plus détaillé et précis des caractéristiques psychosociales et physiques de cette composante, en tenant compte de la réalité du terrain.
Caractéristiques des personnes	• Prendre en compte certaines caractéristiques liées à l'adaptation du bouchon à la forme tridimensionnelle du canal, telles que les angles d'azimut et d'élévation, dans la description morphologique des

	conduits auditifs afin de mieux appréhender certaines sous-dimensions du confort comme celles liées à l'insertion et au retrait des bouchons d'oreille. • Idéalement, un suivi plus détaillé et précis des caractéristiques psychosociales et physiques de cette composante devrait être réalisé, en tenant compte des contraintes du terrain. Par exemple, pour les caractéristiques psychosociales, une analyse de l'activité de travail des participants permettrait de documenter la variabilité des conditions de travail et leur impact sur l'utilisation des bouchons d'oreilles.
Caractéristiques des bouchons	• Prendre en compte les caractéristiques psychosociales des bouchons d'oreilles, telles que l'attractivité, la discrétion ou l'esthétique dans le questionnaire pour étudier leur impact.

Caractéristiques physiques du système couplé oreille-bouchon	• Conjugué à l'utilisation de bouchons instrumentés permettant de suivre leur atténuation tout au long du quart de travail, une meilleure connaissance de la profondeur d'insertion de chaque bouchon dans chaque oreille permettrait d'identifier les sections transversales les plus pertinentes à corréler avec l'atténuation du son mesurée.
	• Géométrie du canal auditif déformé par l'insertion d'un bouchon :
	  • Améliorer la résolution des images IRM en utilisant des technologies plus récentes afin d'affiner la précision de la reconstruction anatomique.
	  • Prendre en compte la variabilité anatomique interindividuelle en augmentant le nombre de participants, afin de valider la méthode et renforcer la robustesse des conclusions.
	  • Standardiser la procédure d'insertion des bouchons dans les études futures et étudier l'impact de différents types d'insertion sur le déplacement du canal auditif.
	  • Considérer le déplacement statique du conduit auditif comme une caractéristique physique du système couplé oreille/bouchon et étudier son influence sur les différentes dimensions du confort.
	  • Explorer le déplacement dynamique du conduit auditif lors de mouvements physiologiques (parole, mastication) afin d'évaluer son impact sur le confort des bouchons.
	• Atténuation acoustique et EO
	  • Faire un suivi de l'atténuation acoustique tout au long du quart de travail grâce à des bouchons instrumentés ou a des mesures ponctuelles sur des protecteurs du commerce non instrumentés (ex. système VeryPRO de Honeywell™).
	  • Testeurs expérimentaux
	  ○ Optimiser le choix des matériaux synthétiques reproduisant les structures anatomiques de l'oreille et de la tête humaine afin de mieux répliquer l'interaction peau/bouchon et la conduction

	tissulaire. Cette optimisation s'appuiera sur les travaux non publiés de nos collaborateurs de l'Université de Sheffield[42], ayant abouti à la fabrication d'une peau synthétique bi-couches intégrant derme et épiderme, ainsi qu'à un cartilage artificiel qui pourront être utilisés dans les futures générations de testeurs. Elle prendra également en compte les recherches en cours sur la caractérisation du champ vibratoire du conduit auditif et la calibration des modèles numériques par éléments finis. ✓ Améliorer le processus de fabrication des oreilles tronquées et des têtes artificielles pour éviter les défauts (bulles d'air, dégradation prématurée due à l'usure). ✓ Équiper les testeurs d'un simulateur d'oreille moyenne/interne intégrant un microphone, conçu pour s'adapter à la géométrie complexe du conduit auditif, ainsi que d'un système de chauffage permettant d'atteindre la température corporelle. Bien que des travaux préliminaires aient déjà été menés sur la conception et la fabrication de ces tympans artificiels, des recherches supplémentaires restent nécessaires (Benacchio, Doutres, *et al.*, 2020)[43]. Les récents progrès de l'équipe dans l'intégration de l'anatomie complète de l'oreille moyenne et interne dans un testeur virtuel pourraient contribuer significativement à cet objectif. ✓ Dans le cas de l'atténuation acoustique, intégrer les oreilles artificielles tronquées dans une structure (ex. tête artificielle en métal) qui élimine les transmissions parasites. ✓ Compte tenu de l'importance des caractéristiques géométriques du conduit auditif pour le confort, poursuivre les recherches sur l'utilisation de plusieurs oreilles artificielles tronquées, dotées de conduits auditifs réalistes de tailles variées, afin de mieux représenter la diversité anatomique (variabilité interindividuelle) observée chez un échantillon de participants. En particulier, intégrer la présence de tissus autour du canal auditif pour renforcer le réalisme du contact peau/bouchon. ✓ Pour le testeur utilisant la méthode en tube d'impédance, inclure le pavillon de l'oreille, utiliser un conduit auditif artificiel plus réaliste, intégrer un système

[42] Voir Hill, 2022; Hill *et al.*, 2021.

[43] Voir aussi Benacchio *et al.*, 2022, 2023.

	de chauffage et explorer des solutions permettant d'élargir la plage de fréquences opérationnelle de la mesure. ✓ Pour le testeur d'EO basé sur une oreille tronquée simplifiée excitée par un pot vibrant, trouver des solutions pour minimiser l'influence du chemin aérien causé par le rayonnement acoustique de la source d'excitation ainsi que les résonances parasites du banc de test. • Testeurs virtuels ○ Améliorer la connaissance des lois de comportement et des propriétés des matériaux (tissus et bouchons) ainsi que l'évaluation de leurs incertitudes, en s'appuyant sur des techniques de caractérisation et de calibration adaptées. Par exemple, le système peau/bouchon peut être soumis à de grandes déformations statiques lors de l'insertion du bouchon dans le canal auditif. Il est alors nécessaire d'utiliser des lois de comportement hyperélastiques, plus adaptées que les modèles élastiques classiquement employés en acoustique, ainsi que des algorithmes de mécanique du contact pour déterminer l'état de précontrainte initial. Concernant le comportement dynamique du système peau/bouchon, la viscoélasticité des tissus et des bouchons, dont la réponse varie en fonction de la température et de la fréquence, influence la réponse acoustique du système, mais reste encore mal caractérisée. ○ Améliorer les modèles numériques EF en : ✓ Intégrant les avancées sur lois de comportement et les propriétés des matériaux ✓ Intégrant un modèle détaillé anatomique de l'oreille moyenne et interne pouvant servir de référence. L'équipe dispose actuellement d'un tel modèle de tête, permettant de simuler la réponse complète du système auditif. Les premiers résultats obtenus avec ce modèle en comparant des fonctions de transfert de l'oreille moyenne et interne en réponse à une excitation par voie tissulaire à des mesures sur des groupes de participants, sont encourageants[44]. Une fois le modèle calibré et validé, les simulations ouvriront plusieurs perspectives : – (i) une meilleure compréhension des mécanismes de transmission sonore à travers l'ensemble du système auditif, qu'il soit ouvert ou occlus ;

[44] Voir Sgard, Kersten, *et al.*, 2024.

	– (ii) la prédiction de l'EO subjectif, en complément de l'EO objectif ; – (iii) l'évaluation du potentiel de simplification du modèle détaillé de l'oreille moyenne et interne, tant au niveau de la modélisation (par exemple, en le remplaçant par un système électro-acoustique ou mécano-acoustique plus simple) que de la fabrication, afin de l'intégrer dans un testeur expérimental. ✓ Calibrant et validant les testeurs qui ne l'ont pas encore été, en tenant compte des incertitudes des modèles et des mesures expérimentales. ✓ Développant des méthodes numériques pour réduire le temps de calcul nécessaire aux études paramétriques en moyennes et hautes fréquences (par ex. en utilisant des modèles de remplacement moins coûteux [surrogates, en anglais]) ✓ Intégrant la variabilité interindividuelle dans les modèles. Bien que les modèles de tête ou d'oreilles tronquées spécifiques ne représentent ni un individu moyen ni un groupe de sujets humains, l'utilisation de techniques de morphing permet de déformer la géométrie du modèle de tête et ainsi d'explorer l'impact des variations anatomiques sur l'atténuation et l'EO. • PMS • Testeurs expérimentaux ○ Le testeur « OPT » pourrait être optimisé en intégrant plusieurs sondes optiques afin de réaliser une cartographie spatiale de la PMS, ainsi qu'un système de chauffage pour mieux reproduire l'interaction entre le bouchon et le conduit auditif. ○ Afin de dépasser les limites du testeur « OPT » et de simuler un contact plus réaliste entre le bouchon et le canal auditif, des travaux préliminaires non publiés ont abouti au développement d'un prototype de canal auditif intégrant une peau artificielle instrumentée. Cette dernière consiste en une couche de silicone, équipée d'un capteur capacitif permettant d'effectuer une cartographie spatiale de la PMS. Ce prototype doit être amélioré, tant sur le plan de sa géométrie, afin qu'il reflète plus fidèlement l'anatomie réelle du canal auditif, que sur les plans mécanique et électrique de sa conception. Des optimisations sont également nécessaires concernant la procédure de calibration afin d'assurer la fiabilité et la reproductibilité des mesures. • Testeurs virtuels

	○ Améliorer la connaissance des lois de comportement et des propriétés des matériaux (tissus et bouchons) ainsi que l'évaluation de leurs incertitudes, en s'appuyant sur des techniques de caractérisation et de calibration adaptées. ○ Développer des modèles EF de contact qui permettent de calculer la PMS pour des bouchons sur mesure, prémoulés et en mousse prémoulée à tige. • Force d'extraction et coefficient de friction peau/bouchon • Améliorer les testeurs expérimentaux ○ En intégrant une couche de peau et en utilisant plusieurs conduits auditifs réalistes pour mieux reproduire le contact entre le bouchon et le canal auditif, tout en tenant compte de la variabilité induite par la morphologie du canal auditif sur la force d'extraction et le coefficient de friction. ○ En tenant compte d'un lubrifiant analogue au cérumen, en s'appuyant sur les travaux non publiés de nos collaborateurs de l'Université de Sheffield[45], qui ont développé un cérumen artificiel à base de lanoline et démontré que ce lubrifiant peut réduire de manière importante la force d'extraction ainsi que le coefficient de friction peau/bouchon. ○ En tirant le bouchon plutôt qu'en le poussant pour éviter les mécanismes de déformation indésirables ○ En mesurant simultanément la force normale afin de réduire les incertitudes liées aux différences potentielles de profil de compression entre le testeur « RFT » et le testeur de force d'extraction, et de permettre également le calcul du coefficient de friction dynamique. • Effectuer des mesures de force d'extraction directement sur des participants • Testeurs virtuels ○ Envisager le calcul de la force d'extraction à partir des modèles utilisés pour calculer la PMS et des données de coefficient de friction déterminées avec les testeurs expérimentaux. • Sensibilité spatiale du canal auditif : Poursuivre les travaux (non publiés) permettant de mesurer la sensibilité spatiale du canal auditif chez un participant[46] à l'aide d'un bouchon-sonde spécialement conçu pour l'occasion. La connaissance de la cartographie spatiale de sensibilité du canal auditif permettrait de pondérer la PMS induite par un bouchon et fournir une caractéristique physico-perceptuelle de la personne qui, dans les analyses statistiques, pourrait être plus

[45] Voir Hill, 2022; Hill *et al.*, 2021.

[46] Voir (De Baermaker, 2020; Paris, 2018)

	directement corrélée au confort physique que la seule force radiale ou la PMS.
Indices de confort	• Faire d'autres études avec d'autres échantillons pour évaluer le caractère général des indices développés.
Analyses statistiques	• Développer des méthodes de sélection ou de réduction de dimensions (ex. ACP, sélection par régularisation) pour identifier les variables les plus pertinentes tout en conservant la robustesse statistique. • Explorer les différences entre les conduits auditifs droit et gauche, et entre les profils latéraux (droitier, gaucher, ambidextre) à travers des études ciblées avec des échantillons équilibrés. • Concevoir des protocoles d'échantillonnage stratifiés pour assurer une représentation suffisante des différentes catégories de participants (latéralité, expérience, etc.). • Mettre en place des modèles statistiques intégrant les interactions entre les éléments de la triade pour mieux comprendre leur influence combinée sur le confort. • Améliorer l'objectivation de l'EO : intégrer des variables supplémentaires (morphologie fine du conduit auditif, expérience antérieure, antécédents professionnels, etc.) pour améliorer le pouvoir explicatif des modèles.

Influence des caractéristiques de la triade sur le confort physique, fonctionnel et acoustique — objectivation	• Confort physique, fonctionnel et acoustique
	  • Évaluer si d'autres indicateurs que la force radiale comme des PMS locales mesurées dans des conduits auditifs plus réalistes au niveau géométrique et anatomique ou des PMS pondérées par la sensibilité du canal auditif seraient davantage corrélées avec le confort mécanique.
	  • Il serait pertinent dans les analyses statistiques de considérer des caractéristiques de la triade « Environnement /utilisateur /bouchon » non étudiées ou mal connues dans le cadre du projet comme :
	  ○ Les conditions climatiques dans l'environnement de travail
	  ○ Les variations de température et leurs effets potentiels sur les propriétés des matériaux des bouchons d'oreilles et le confort de l'utilisateur
	  ○ Les caractéristiques psychosociales des bouchons d'oreilles telles que l'attractivité, la discrétion ou le design esthétique
	• Objectivation de l'EO
	  • Améliorer le protocole de mesure en laboratoire pour faciliter les réponses aux questions par les participants.
	  • Effectuer une étude sur une durée de quelques semaines pour tester l'hypothèse que les meta-bouchons à effet d'occlusion

	réduit sont effectivement plus confortables acoustiquement que les bouchons du commerce. • Intégrer des caractéristiques physiques et psychosociales supplémentaires de la personne, telles que les caractéristiques morphologiques détaillées du conduit auditif, l'expérience antérieure avec des dispositifs de protection auditive, les antécédents professionnels et la connaissance des risques liés à l'exposition au bruit pour réduire la variance non expliquée des modèles linéaires à effets mixtes utilisés dans les analyses statistiques. • Élargir l'étude à des populations qui ont des besoins spécifiques acoustiques comme les chanteurs ou les musiciens d'instruments à vent qui fournissent des efforts vocaux importants pour vérifier que les méta-bouchons d'oreilles toujours ou s'ils ont besoin d'être adaptés. • Valider le caractère prédictif des indices de confort objectivés en collectant, par exemple, des données supplémentaires.