



## Avis de Soutenance

Monsieur Cyril BLONDÉ

Présentera ses travaux en soutenance

Soutenance prévue le **jeudi 23 février 2023** à 14h00

Lieu : Institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis 5 rue du Général Cassagnou 68300 Saint-Louis France  
Salle : Schardin

Titre des travaux : Description et caractérisation des phénomènes impliqués dans la limitation des protections auditives lors d'impulsions de fort niveau.

Ecole doctorale : SPIM - Sciences Physiques pour l'Ingénieur et Microtechniques

Section CNU : 60

Unité de recherche : Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne

Directeur de thèse : Sébastien ROTH

Codirecteur de thèse : Véronique ZIMPFER  HDR  NON HDR

Soutenance :  Publique  A huis clos

Membres du jury :

<u>Nom</u>	<u>Qualité</u>	<u>Etablissement</u>	<u>Rôle</u>
M. Sébastien ROTH	Full professor	Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne (ICB), Département Conception, Optimisation et Modélisation en Mécanique (COMM)	Directeur de thèse
M. Franck SGARD	Directeur de recherche	Institut de Recherche Robert-Sauvé en Santé et en Sécurité du Travail	Rapporteur
Mme Sabine MEUNIER	Chargée de recherche	Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique (LMA)	Rapporteuse
M. Guillaume ANDEOL	Docteur	Institut de Recherche Biomédicale des Armées	Examineur
M. Vincent LAUDE	Directeur de recherche	Université de Franche-Comté, , Institut FEMTO-ST, Département MN2S, équipe Phononique & Microscopies.	Examineur
Mme Véronique ZIMPFER	Maîtresse de recherche	Institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis	Co-directrice de thèse
M. Thomas JOUBAUD	Chargé de recherche	Institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis	Co-encadrant de thèse
M. Olivier DOUTRES	Professeur	ETS Montréal	Examineur

**Mots-clés :** protections auditives, conduction tissulaire, modélisation numérique, transmission des ondes, tête artificielle, bruit impulsionnel de fort niveau

## Résumé de la thèse (en français) :

Il est d'usage de porter des protections auditives pour se prémunir des lésions irréversibles de l'oreille interne causées par les bruits continus ou impulsionnels de fort niveau. L'efficacité des protections est cependant limitée avec une atténuation parfois insuffisante dans des contextes militaires. La question de la détermination et la caractérisation des phénomènes impliqués directement ou indirectement dans les performances des protecteurs devient centrale. La capacité de l'oreille à capter les ondes acoustiques aériennes et les convertir en ondes mécaniques est le point de départ de cette thèse. Les ondes réceptionnées par l'oreille externe se propagent à travers les tissus, contrariant l'idée que la conduction primaire par les voies aériennes serait seule responsable des limites de performances des protecteurs. Ainsi, d'autres supports suscitent un intérêt scientifique pour leur capacité à propager les ondes acoustiques, notamment les os, la peau, le cartilage et les fluides physiologiques. La conduction du son au travers de ces tissus et fluides est cependant difficile à appréhender expérimentalement et encore non reproduite par les têtes artificielles utilisées pour évaluer les protecteurs. C'est pourquoi, dans un premier temps, la capacité de diverses zones de l'oreille externe à induire une perception auditive a été évaluée expérimentalement à l'aide d'audiométries. Une attention particulière a notamment été portée à caractériser l'influence de la protection sur cette perception, plus significative lors d'une stimulation aux abords du protecteur. En parallèle, des modèles numériques utilisant la méthode des éléments finis en régime temporel ont permis d'étudier les caractéristiques de la propagation des ondes dans les tissus de l'oreille externe et les interactions indirectes entre ces ondes et le protecteur. Il en découle une propagation des ondes par la peau puis une sollicitation de la protection qui altère alors la pression dans le conduit. Le temps de propagation (par estimation du retard de transmission jusqu'à l'air du conduit occlus) a été évalué et une comparaison expérimentale a permis de vérifier le modèle. Néanmoins, la conduction tissulaire ne peut expliquer à elle seule les limites observées lors de bruits impulsionnels de forts niveaux. D'autres phénomènes, telle la transmission de l'onde directement au travers du matériau de la protection y contribuent également. Ces interactions directes entre l'onde impulsionnelle et la protection ont été très peu voire non étudiées jusqu'à présent. Ceci s'explique en partie par la complexité de l'évaluation expérimentale. Ainsi, dans ce contexte, un nouveau protocole expérimental original permettant de mesurer le déplacement de la protection lors d'une explosion a été développé. Puis, les effets de transmission au travers de la protection ont été étudiés sous plusieurs conditions en utilisant une tête artificielle. Ceci a permis notamment d'évaluer les conséquences sur la pression et d'établir une relation linéaire entre pertes d'efficacité des protecteurs et déplacements de la protection dans le conduit auditif. Une corrélation essais/calculs a été menée à l'issue de cette campagne de tests, avec un focus sur l'influence de la position initiale de la protection sur l'altération de la pression sous le protecteur. Ces phénomènes de conduction tissulaire et transmission au travers de la protection peuvent se combiner pour une même protection mais également entre chaque protection dans le cas du port simultané d'un casque et de bouchons. Dans cette situation, une mesure expérimentale a permis de mettre en avant qu'une transmission au travers du casque induit une conduction tissulaire pouvant solliciter le bouchon dans le conduit. Ce couplage, difficile à appréhender, nécessite des études complémentaires afin d'améliorer d'une part sa prise en compte par les têtes artificielles, mais d'autre part, et surtout, la performance des protections auditives.

## Abstract (in English):

Hearing protection devices (HPDs) are conventionally used to protect against high-level continuous or impulse noises that could cause irreversible damage to the hearing system. However, the effectiveness of the HPDs is limited, with an attenuation sometimes insufficient in military contexts. The question of determining and characterizing the phenomena directly or indirectly involved in the performance of HPDs becomes crucial. The ability of the ear to capture airborne acoustic waves and convert them into mechanical vibrations is the starting point of this thesis. The waves received by the external ear propagate through the tissues, contradicting the idea that primary conduction through the air pathways would be solely responsible for the performance limits of HPDs. Thus, other media are of scientific interest for their ability to propagate sound waves, including bone, skin, cartilage, and physiological fluids. However, sound conduction through these tissues and fluids is difficult to apprehend experimentally and still not reproduced by the artificial heads used to evaluate the HPDs. This is why, as a first step, the capacity of various zones of the external ear to induce hearing perception was experimentally evaluated using audiometry. Particular attention was given to the protection's influence on this perception, which is more significant when stimulation is near the HPD. In parallel, numerical models using the finite element method in transient regime allowed to study the characteristics of the wave propagation in the tissues of the external ear and the indirect interactions between these waves and the protector. It points to wave propagation

through the skin and the protection stress, which then alters the pressure in the ear canal. The propagation time (by estimating the transmission delay to the air of the occluded canal) was evaluated, and an experimental comparison verified the model. Nevertheless, tissue conduction alone cannot explain the limitations observed during high-level impulse noise. Other phenomena, such as the transmission of the wave directly through the protection material, also contribute. These direct interactions between the impulse wave and the HPD have been little or no studied until now. This is partly due to the complexity of the experimental evaluation. Thus, in this context, a new experimental protocol that measures the protection displacement during an explosion has been developed. Then, the transmission effects through the protection were studied under several conditions using an artificial head. This made it possible to evaluate the consequences on the pressure and to establish a linear relationship between the HPD effectiveness loss and the HPD displacements in the ear canal. A test/calculation correlation was carried out at the end of this test campaign, focusing on the influence of the HPD initial position and the pressure alteration under the HPD. Tissue conduction and transmission through the HPD can be combined for the same protection and between each protection in the case of the simultaneous wearing of an earmuff and earplugs. An experimental measurement has shown that transmission through the earmuff induces tissue conduction that can stress the plug in the ear canal. This coupling, difficult to apprehend, requires further studies to improve, on the one hand, its consideration by the artificial heads and, on the other hand, the performance of HPDs.