



## L'école d'audioprothèse de Nancy sous le toit de la Faculté de Pharmacie de l'Université de Lorraine

**La faculté de pharmacie de l'Université de Lorraine héberge l'une des sept écoles françaises destinées à la formation menant au Diplôme d'Etat d'Audioprothésiste. L'équipe pédagogique pluridisciplinaire qui inclut des enseignants chercheurs, des praticiens et audioprothésistes crée la richesse de la formation nancéienne. La direction de cette formation résulte d'une collaboration établie entre le service d'ORL et chirurgie cervico-faciale (CCF) du CHRU de Nancy et la Faculté de Pharmacie.**

Plus précisément, le professeur Joël Ducourneau chercheur en acoustique à l'Institut National de Recherche et Sécurité (INRS) et rattaché au sein du Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée (LEMTA, UMR 7563) codirige cette école aux côtés du professeur Cécile Parietti-Winkler. Celle-ci effectue son activité hospitalière de PU-PH au CHRU de Nancy où elle est le praticien référent pour les pathologies de l'audition et de l'équilibre au sein du Service d'ORL et CCF. Elle est chercheur rattachée à l'équipe d'accueil EA3450 « Développement, Adaptation et Handicap » (DevAH).

Chargée de Mission Pédagogie dans le Service Universitaire d'Innovation en Ingénierie Pédagogique de l'Université de Lorraine (SU2IP), elle partage son activité d'enseignement entre le centre de formation en audioprothèse et la Faculté de Médecine : elle y est formatrice à l'Ecole de Chirurgie et y dirige le Département Universitaire d'Orthophonie au sein duquel elle est responsable du Master d'Orthophonie.

C'est le physicien André Bernanose physicien et Doyen de la Faculté de Pharmacie de 1961 à 1969 qui crée en 1968 l'école d'audioprothèse dans les locaux de la Faculté de Pharmacie de Nancy aujourd'hui dirigée par le Doyen Francine Paulus. Cela fait bientôt 50 ans que l'école accueille des étudiants en audioprothèse de tout horizon sur plan national. De 1968 à nos jours, plus de 500 audioprothésistes ont été formés.



Actuelle faculté de pharmacie de Nancy



Nouvelle faculté de pharmacie de Nancy

### Une équipe pédagogique pluridisciplinaire

La pluridisciplinarité de l'équipe enseignante au sein de cette école répond aux multiples matières dispensées dans cette formation pour l'intérêt des étudiants.

Le professeur Pascale Friant-Michel, chercheur au sein de l'équipe chimie et biochimie théorique au Laboratoire Structure et Réactivité des Systèmes Moléculaires Complexes (UMR 7565) est en charge des enseignements

**Joël DUCOURNEAU**

Professeur des Universités, Faculté de pharmacie, LEMTA

**Cécile PARIETTI-WINKLER**

Professeur des Universités, Faculté de médecine, Praticien Hospitalier, CHRU Nancy, Service ORL, EA3450 DevAH





Chaines de mesures

fondamentaux comme les mathématiques, l'électricité et l'audioprothèse. Le docteur Adil Faiz, maître de conférences et chercheur en acoustique au sein de l'INRS, également rattaché au LEMTA, s'occupe de l'électronique et des travaux pratiques de physique. Le professeur Joël Ducourneau est en charge des enseignements dans le domaine de l'acoustique et du traitement du signal.

L'enseignement en audiologie et otologie, coordonné par le professeur Cécile Parietti-Winkler, implique de nombreux membres du service d'ORL et CCF, notamment le docteur Bettina Montaut-Verient spécialiste de la surdité infantile.

Du côté de l'enseignement en audioprothèse, de nombreux professionnels de terrain dispensent des cours, chacun dans sa spécialité : Romain Decolin et Pierre-Louis Jardel pour l'ensemble des travaux pratiques en audioprothèse, Arnaud Girault pour les travaux dirigés d'adaptation prothétique. D'autres intervenants extérieurs participent vivement à l'enseignement dans des disciplines spécifiques comme la prise en charge des patients acouphéniques, l'électronique appliquée à l'audioprothèse, les réglages des prothèses implantables, la prise en charge audioprothétique des enfants malentendants, la compression utilisée en audioprothèse, ... Notons aussi que l'ensemble des fabricants d'aides auditives présents sur le marché intervient pour la présentation des logiciels et les dernières nouveautés d'appareillage.

De nombreux psychologues rattachés aux services hospitaliers ou centres de réadaptation interviennent également pour la prise en charge psychologique de l'enfant et de la personne âgée.



Salle de TP U10

Des enseignants chercheurs spécialisés en phonétique linguistique participent à l'enseignement pour l'analyse temps – fréquence des signaux de parole.

Les sciences humaines et sociales comme l'épidémiologie, l'éthique, la déontologie sont aussi dispensées notamment la législation et la gestion comptabilité assurée par le professeur Jean-Michel Simon.

Cette pluridisciplinarité et les interconnexions entre les intervenants professionnels et les acteurs universitaires et hospitalo-universitaires qui mettent en commun leurs thématiques et leurs missions de recherches est l'une des raisons du succès du centre de formation lorrain. Cette osmose permet aussi de proposer et de suivre des travaux de mémoires de fin d'études originaux et à la pointe de la recherche.

## Une pédagogie innovante

Dans un souci constant d'innovation pédagogique, un nouveau dispositif de formation en pédagogie active, de type « serious game », a été déployé pour la première fois à Nancy en janvier 2018. Ce dispositif de formation a réuni 85 étudiants issus non seulement du centre de formation en audioprothèses, mais également du centre de formation en orthophonie, permettant ainsi, de plus, une mutualisation de l'enseignement. Ce « serious game », inspiré d'un célèbre jeu de plateau, est dédié à l'audiologie (cf ci-après) et permet l'interfaçage des futurs professionnels de santé de disciplines différentes mais intervenant tous dans le domaine de l'audiologie, promouvant ainsi l'échange et la communication de ces disciplines cliniques connexes. Favorisant les savoirs et le savoir-être, il s'intègre parfaitement dans une approche par compétences intégrées de l'enseignement en audiologie.

## Du matériel à disposition

Le domaine de l'audioprothèse évolue constamment au rythme de la technique. Pour développer un enseignement de qualité, l'école dispose de plusieurs plateformes de travaux pratiques comme celles dédiées à la compréhension des phénomènes physiques mis en jeu dans l'appareil auditif pour l'amplification et le filtrage.



Les étudiants y apprennent à manipuler les appareils d'analyse et de mesure que l'on peut retrouver dans les ateliers d'entretien ou de réparation dans un cabinet d'audioprothèse. En audioprothèse, la prise d'empreintes, la réalisation d'embouts auriculaires, les procédures d'adaptation des aides auditives sont enseignées au travers d'un atelier de fabrication d'embouts, d'une salle équipée pour le grattage et le fraisage, de deux salles insonorisées équipées d'outils dédiées à la stéréoaudiométrie et à l'audiométrie vocale dans le silence et le bruit, de 6 chaînes de mesure, d'un vidéotoscope, d'une cabine audiométrique équipée, de plusieurs audiomètres...

Une salle contenant 12 ordinateurs équipés d'interfaces de programmation et des derniers logiciels des fabricants est utilisée dans le cadre de travaux dirigés d'adaptation prothétique. Les fabricants mettent à disposition pour cet enseignement spécifique des aides auditives de dernière génération.

Il y a bientôt trois ans, l'école nancéienne a fait l'acquisition d'une tête artificielle (K.E.M.A.R.) qui a permis de développer une plateforme de simulation et de mettre en évidence plusieurs phénomènes comme :

- l'effet d'ombre de la tête sur la perception des sons entre oreille droite et gauche,
- pour un type de surdité simulée (surdité légère à sévère), la différence entre le son perçu par le malentendant non appareill e et appareill e respectivement. Les aides auditives sont au préalable réglées par les étudiants en fonction du type de surdité simulée choisi,
- l'efficacité des réducteurs de bruit et des systèmes microphoniques directifs pour l'amélioration du rapport signal/bruit du signal vocal en milieu bruyant,
- l'effet adaptatif de la directivité microphonique en fonction de l'incidence du bruit émis et du signal utile vocal,
- l'effet nuisible du port trop fréquent des écouteurs/oreillettes des baladeurs numériques à fort niveau sonore,

Cette plateforme qui s'inscrit dans le plan stratégique "thème simulation" du Collegium "Santé" de l'Université de Lorraine est soutenue par l'ANR IDEFI-REMIS et le projet régionale et européen FEDER « Hôpital Virtuel de Lorraine ». Cette plateforme est souvent utilisée par les étudiants dans le cadre de leur travail de mémoire de fin d'étude. Elle permet de compléter par le biais d'études objectives le travail clinique entrepris auprès de patients appareill es dans les cabinets d'audioprothésistes lors des stages professionnels. Elle est aussi utilisée dans le cadre de travaux pratiques pour la mesure de la directivité microphonique des appareils auditifs, la mesure et l'écoute de l'efficacité des traitements utilis es pour la réduction du bruit.



Photos Kemar

Cette plateforme fait l'objet actuellement d'une étude portant la fiabilité et la reproductibilité des rapports signal/bruit (SNR pour Signal Noise Rating) en sortie de l'appareil auditif en fonction des différents traitements implant es dans les appareils comme les réducteurs de bruit ou les systèmes microphoniques directifs. C'est Mme Balbine Maillou, post-doctorante, spécialisée dans l'acoustique et le traitement du signal qui se charge de ce travail de recherche.

### Quelques statistiques

La provenance sur le plan national des étudiants est large mais la diversité ne s'arrête pas là car les étudiants viennent d'horizons scolaires et professionnels différents. Chaque année, seuls trois ou quatre étudiants sortent du lycée avec leur diplôme du baccalauréat. Des étudiants déjà dipl om es en optique entrent en première année d'audioprothèse. Enfin, une part minimale d'étudiants est en complète reconversion. En conséquence, on observe une diversité d'âge allant de 18 à 45 ans. L' cole accueille bien entendu des étudiants sortant d'une classe préparatoire privée.

Au total 249 étudiants se sont inscrits à l'examen d'entrée en 2015, 176 en 2016 et 148 en 2017 sur la plate-forme d'inscription en ligne mise à disposition sur le site de la faculté de pharmacie. Cette plateforme est ouverte du 1er au 31 mai chaque année. Le nombre d'étudiants qui se présentent vraiment à l'examen écrit est toutefois moins important, compris entre 100 et 120 étudiants. Au final, une cinquantaine de candidats parviendront à l'étape de l'examen oral et seuls 24 étudiants seront admis en première année, redoublants compris. Chaque année, la Direction Générale de l'Offre de Soins lance son enquête annuelle sur la détermination des quotas paramédicaux. Le num erus clausus à l' cole de Nancy était, pour l'année universitaire 2017-2018, de 24. Au-delà des cours théoriques qui y sont dispens es, le centre de formation lorrain se distingue par un nombre important de travaux pratiques, un des facteurs majeurs garantissant, selon l'équipe pédagogique, la qualité de la formation mais limitant forcément la capacité d'accueil. Ces travaux pratiques qui s'ajoutent aux nombreux stages sont nécessaires pour acquirir une bonne pratique de la réhabilitation auditive.

Concernant le devenir des étudiants, les choix sont les mêmes que pour les autres étudiants français : seul le master de Montpellier s'inscrit dans la continuité de la formation d'audioprothèse. Chaque année, l'association des étudiants de ce Master est invitée à venir présenter la formation aux étudiants nancéiens. Un à deux étudiants par an optent pour cette voie, la majeure partie de la promotion entrant directement sur le marché du travail. Certains poursuivront leur formation grâce à des diplômes universitaires. Dans la grande majorité, les étudiants savent déjà où ils travailleront une fois dipl om es. Au terme de la formation, l'insertion professionnelle est de 100%.

A la rentrée 2018, la faculté de pharmacie de Nancy rejoindra le pôle Biologie Santé sur le campus de la faculté de Médecine,   Vandoeuvre les Nancy près de la forêt de Haye sur le plateau de Brabois. Un nouvel édifice pour une nouvelle faculté et ainsi, des locaux tout neufs pour la formation en audioprothèse.

# La caractérisation acoustique des parois délimitant les locaux industriels en vue de la réduction du bruit au travail

**Joël DUCOURNEAU\*** Professeur, faculté de pharmacie, LEMTA

**Adil FAIZ\*** Maître de conférences, faculté de pharmacie, LEMTA

**Kevin RABISSE\*\*** Doctorant à l'INRS, LEMTA

\* Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée, 2, avenue de la Forêt de Haye, 54518 Vandœuvre-lès-Nancy Cedex, France

\*\* Institut National de Recherche et Sécurité, Rue du Morvan, 54500 Vandœuvre-lès-Nancy, France

L'axe de recherche développé dans le domaine de l'acoustique concerne le développement et la mise au point de méthodes de caractérisation acoustique in situ des parois présentes dans les locaux industriels. L'analyse des mécanismes de diffusion acoustique et le développement de dispositifs permettant d'accéder aux coefficients de réflexion ou d'absorption acoustique in situ des parois planes, hétérogènes ou pouvant présenter un relief sont les principaux domaines de recherche. Ce travail s'inscrit dans le Plan de Recherche de l'équipe projet Acoustique des Parois dans les Locaux Industriels (APLI) dont l'activité résulte d'une collaboration scientifique établie entre le laboratoire ACOustique au Travail (ACT) de l'Institut National de Recherche et Sécurité (INRS) et le Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée (LEMTA) de l'Université de Lorraine.

ou à rainures, ...) ou irrégulier complexe (plafonds à réseau de baffles...). Pour ce type de parois, il est difficile de connaître leurs caractéristiques acoustiques qui sont pourtant nécessaires lorsqu'une étude de l'ambiance acoustique doit être effectuée dans le local. Les logiciels d'acoustique prévisionnelle nécessitent la connaissance des caractéristiques acoustiques des parois pour déterminer la répartition des niveaux sonores dans les locaux encombrés. Les logiciels comme Ray+<sup>1</sup> qui utilisent l'INRS et les Centres de Mesures Physiques (CMP) des Caisses d'Assurance Retraite et de la Santé au Travail (CARSAT) nécessitent les coefficients de réflexion acoustique moyens associés à chaque paroi du local afin de prévoir la propagation et les réflexions des rayons sonores dans cet espace. Souvent, les coefficients d'absorption ou de réflexion acoustique des parois sont recalés à partir des mesures de pression acoustique en différents points dans le local. Pour améliorer le traitement acoustique des parois et proposer des solutions correctives adaptées, le développement et la mise au point de méthodes de caractérisation acoustique in situ des parois rencontrées dans les ateliers industriels sont nécessaires.

Les parois souvent rencontrées dans les locaux industriels peuvent être classées en deux catégories :

- les parois planes homogènes ou hétérogènes planes (type 1) : elles sont constituées d'un seul ou de plusieurs matériaux et ne présentent pas de relief,
- les parois homogènes ou hétérogènes épaisses (type 2) : elles sont constituées d'un seul matériau ou de plusieurs matériaux et présentent un relief périodique ou apériodique.

## 1 Introduction

L'origine de ces activités de recherche résulte du souci permanent d'améliorer les conditions d'exposition au bruit des travailleurs dans les locaux industriels. Afin de pouvoir proposer des solutions adaptées en termes de traitement acoustique des ateliers de travail, il est nécessaire de caractériser dans un premier temps, les parois qui délimitent ces locaux. Les parois ne peuvent pas toujours être considérées comme planes et constituées d'un matériau homogène. Elles sont en général constituées de plusieurs matériaux différents (vitrages, murs béton, murs revêtus de matériaux acoustiques...) et peuvent présenter un relief périodique régulier (tôle ondulées

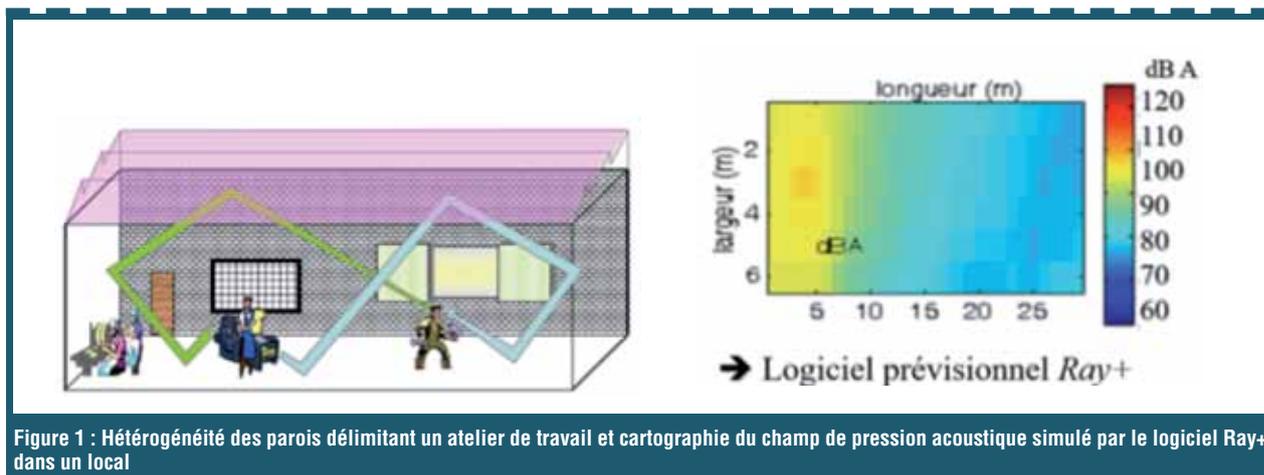


Figure 1 : Hétérogénéité des parois délimitant un atelier de travail et cartographie du champ de pression acoustique simulé par le logiciel Ray+ dans un local



De nombreux travaux théoriques et expérimentaux ont été menés par l'équipe APLI pour caractériser d'un point de vue acoustique les parois planes dites de type 1. Tout d'abord, pour les parois homogènes, la méthode du doublet microphonique permettant de déterminer l'impédance acoustique normale de surface d'un revêtement et ainsi de déduire le coefficient d'absorption acoustique, a été expérimentée et validée dans des conditions de champ libre <sup>2-3</sup>. L'utilisation d'une sonde microphonique comprenant 3 capteurs a permis d'améliorer la technique notamment sur l'étendue du domaine de validité fréquentiel : 150 Hz – 6400 Hz (voir figure 2).

La figure 3 représente le coefficient d'absorption acoustique, mesuré avec le dispositif, d'un échantillon de laine de verre. Ce type de matériau est très utilisé pour insonoriser les locaux industriels et les salles dédiées à l'audiométrie.

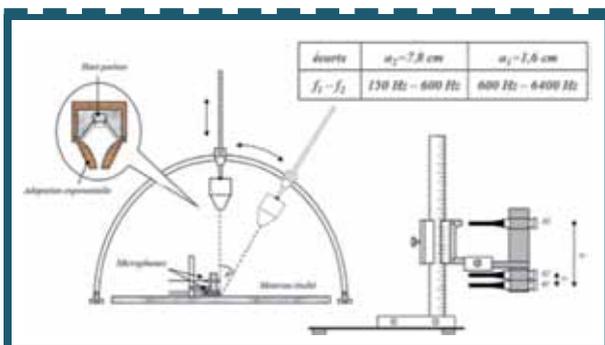


Figure 2 : Configuration du dispositif expérimental

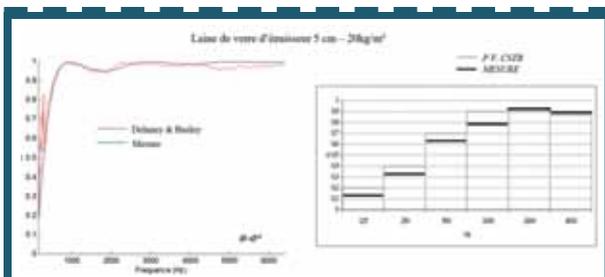


Figure 3 : Coefficient d'absorption acoustique en incidence normale - Laine de verre 20kg/m<sup>3</sup>, d'épaisseur 5 cm

Concernant les parois hétérogènes planes, la possibilité de la remplacer par une paroi homogène équivalente afin de simplifier la modélisation des façades murales d'un local lorsque l'on cherche à réaliser un calcul d'acoustique prévisionnelle, a été étudiée. L'influence de la non-uniformité spatiale de l'absorption acoustique dans un local industriel a été quantifiée. Un modèle d'absorption acoustique moyenne équivalente a été élaboré et validé sur plusieurs parois hétérogènes dans un local industriel expérimental de l'INRS <sup>4</sup>. Les méthodes de caractérisation des parois de type 1 ne seront pas plus détaillées ici, nous avons choisi plutôt de présenter dans cet article les travaux réalisés pour les parois à relief (type 2). Pour ce type de parois, deux études sont actuellement menées par l'équipe projet APLI :

- la première porte sur la détermination du champ acoustique dans un local en présence d'une paroi à relief. Ce travail qui a fait l'objet d'une thèse soutenue le 10 octobre 2017 (Kévin Rabisse) a permis dans un premier temps de répertorier les méthodes de calcul du champ de pression acoustique à l'intérieur d'un local supposé parallélépipède rectangle parfaitement rigide en présence d'une paroi à relief. Kévin Rabisse a ensuite développé un modèle de

propagation dans les ateliers de travail délimités par des parois à relief de type rectangulaire souvent,

- la seconde étude concerne la détermination in situ du coefficient de diffusion acoustique des parois à relief. Pour cela, un système de mesure utilisant une technique basée sur l'estimation de l'énergie réfléchie spéculaire des ondes sur la paroi étudiée a été élaboré et adapté pour éviter les échos parasites venant de la réverbération et des sources bruyantes présentes dans les locaux industriels.

## 2

### Simulation du champ acoustique dans un local industriel en présence d'une paroi à relief

Bos <sup>5</sup>, Khanfir <sup>6</sup> et Ducourneau et al. <sup>7,8</sup> se sont intéressés à la diffusion et la diffraction acoustique engendrées par des parois à relief et dans des conditions semi-anéchoïques. Pour étudier l'influence des parois à reliefs géométriques dans des conditions semi-réverbérantes ou réverbérantes qui sont celles des locaux industriels (espaces clos), il est nécessaire de pouvoir simuler d'une part, la propagation du son dans un milieu confiné et d'autre part, les phénomènes acoustiques se produisant lors de la réflexion d'une onde acoustique sur une paroi non plane. La méthode utilisée ici se base sur la méthode de décomposition rectangulaire adaptative (ARD pour Adaptive Rectangular Decomposition) <sup>9</sup> et sur des éléments de calculs issus de la méthode de différences finies dans le domaine temporel (FDTD pour Finite Difference in Time Domain) <sup>10-11</sup>.

#### 2.1. Principe général du modèle

De nombreuses méthodes de simulation de propagation du son en milieu confiné existent : les méthodes géométriques et les méthodes physiques. L'approche géométrique qui regroupe notamment les méthodes par sources images et par tir de rayons (Ray+) s'avèrent insuffisantes en termes de précision de calculs lorsque des parois à relief géométriques sont introduites dans le local simulé. L'approche physique, contrairement aux méthodes géométriques (qui simulent les ondes acoustiques sous la forme d'entités géométriques), se base sur la résolution de l'équation d'onde (1) s'exprimant ainsi :

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \left( \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

avec  $p$  la pression acoustique,  $c$  la célérité de propagation du son dans l'air,  $t$  le temps et  $x$ ,  $y$  et  $z$  les trois dimensions spatiales. La méthode de décomposition rectangulaire adaptative ARD a été choisie pour résoudre l'équation (1) par principe d'itération temporelle, elle a été également mise au point pour permettre d'auraliser des domaines de volume important (c'est le cas pour des locaux industriels) de manière précise et rapide.

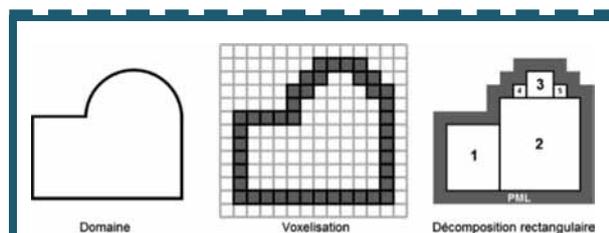


Figure 4 : Maillage et décomposition du domaine <sup>12</sup>

La figure 4 illustre les étapes de préparation du domaine à effectuer en amont de la simulation de propagation. L'étape de voxelisation consiste à discrétiser le domaine d'étude selon un maillage rectiligne uniforme prédéfini. Il est important de noter que ce maillage a pour conséquence de déformer le domaine étudié. Cette déformation (ou crénelage) est plus ou moins significative en fonction de la finesse du maillage. La seconde étape consiste ensuite à décomposer le domaine voxelisé en parallélépipèdes rectangles les plus grands possibles (appelés, par la suite, partitions). Cette étape est essentielle car la méthode ARD repose sur des calculs d'acoustique modale et donc sur des formes aux côtés opposés plans et parallèles. La dernière étape consiste à simuler une couche absorbante parfaitement adaptée (qui sera abrégée par la suite en PML pour perfectly matched layer) tout autour du domaine. Cette couche permettra de prendre en compte la réflexion et surtout l'absorption des ondes au niveau des limites du domaine.

Comme dit précédemment, la méthode ARD se base sur une résolution de l'équation d'onde par calcul itératif. Tout d'abord, il faut partir de l'équation d'onde (1) comprenant un terme source  $f$  utilisé pour prendre en compte les sources sonores dans le domaine comme le montre l'équation (2) :

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - c^2 \Delta p = f \quad (2)$$

L'équation (3) régit le calcul itératif de la méthode ARD dans l'ensemble d'une partition étudiée :

$$\tilde{p}_{i,j,k}^{n+1} = 2\tilde{p}_{i,j,k}^n \cos(\omega_{i,j,k} \Delta t) - \tilde{p}_{i,j,k}^{n-1} + \frac{2\tilde{f}_{i,j,k}^n}{\omega_{i,j,k}^2} (1 - \cos(\omega_{i,j,k} \Delta t)) \quad (3)$$

avec  $\tilde{p}_{i,j,k}$  la transformée en cosinus discrète (ou DCT pour discrete cosine transform) de la pression acoustique  $p(x,y,z,t)$  dans la partition à l'instant  $t$ . Les paramètres  $i, j$  et  $k$  correspondent aux indices des modes dans cette même partition rectangulaire et  $n$  l'indice temporel.  $\Delta t$  représente la résolution temporelle et  $\omega_{i,j,k}$  la pulsation propre du mode  $[i, j, k]$ .

L'équation (3) montre qu'il est possible d'estimer la pression acoustique à l'instant d'indice  $n+1$  à partir de la pression acoustique à l'instant d'indice  $n$  et  $n-1$  respectivement.

Comme le montre la figure 4, la décomposition rectangulaire a pour effet de créer des parois « virtuelles » entre les partitions. Pour transmettre une onde acoustique émise dans la partition 1 à la partition 2, il faut annuler l'onde réfléchiée à l'interface entre les deux parois et émettre l'onde incidente dans l'autre partition. Pour d'abord annuler l'onde réfléchiée dans la partition initiale, on utilise une couche absorbante parfaitement adaptée (PML). La PML est une couche virtuelle servant à absorber les ondes se propageant au-delà des frontières du domaine étudié. Cette couche est dite virtuelle car elle est générée numériquement et qu'elle ne correspond pas à une partie réelle du domaine. Kevin Rabisse de l'équipe APL a directement placé la PML au sein même de la partition étudiée comme le montre la figure 5. Cela permet de s'affranchir d'erreurs induites par la transmission entre deux partitions et de réduire le temps de calcul.

Au niveau des parois du local étudié, la réflexion acoustique est prise en compte à l'aide d'un coefficient de réflexion en pression dépendant de la fréquence.

Ce coefficient est modélisé par un filtre numérique. Les limites du domaine et le relief impliquent la création de « points fantômes » qui n'existent pas dans le domaine étudié, ils doivent être extraits des équations itératives.

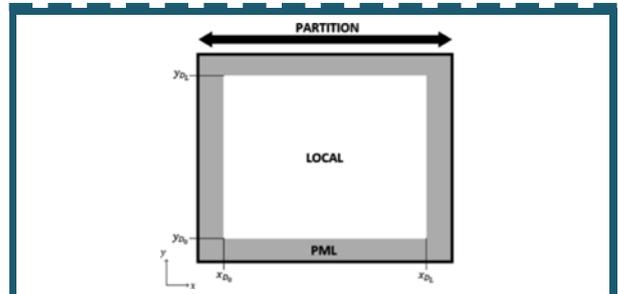


Figure 5 : Partition contenant à la fois le local étudié et la PML

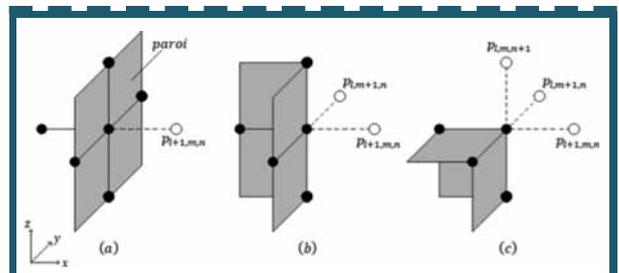


Figure 6 : Points fantômes aux limites du domaine

Dans le cas de la figure 6(a), c'est-à-dire une paroi plane, le point aux coordonnées  $[l+1, m, n]$  est un point fantôme. Ainsi, la pression acoustique au point  $[l, m, n]$  n'est estimée qu'à partir de celles oscillantes aux points voisins de coordonnées respectives  $[l-1, m, n]$ ,  $[l, m+1, n]$ ,  $[l, m-1, n]$ ,  $[l, m, n+1]$ ,  $[l, m, n-1]$ .

En partant des coefficients d'absorption acoustique par bandes de fréquences d'un matériau donné, il est possible d'obtenir le filtre numérique  $R(z)$  aux coefficients  $a_{i_k}$  et  $b_{i_k}$ .

L'impédance acoustique spécifique réduite s'exprime en fonction du coefficient de réflexion :  $\xi = \frac{1+R}{1-R}$ .

Il est ainsi possible d'exprimer le filtre d'impédance numérique  $\xi(z)$  de la façon suivante :

$$\xi(z) = \frac{\sum_{i=0}^N (a_{i_k} + b_{i_k}) z^{-i}}{\sum_{i=0}^N (a_{i_k} - b_{i_k}) z^{-i}} \quad (4)$$

La figure 7 représente la simulation de la propagation du son dans un local rectangulaire avec et sans la présence d'une cavité rectangulaire à l'aide de la méthode ARD. On remarque très clairement l'impact du relief sur le champ acoustique devenant ainsi plus diffus.

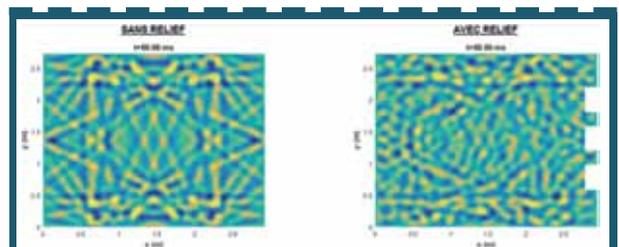


Figure 7 : Représente la simulation de la propagation du son dans un local rectangulaire en présence d'une cavité rectangulaire [19]



## 2.2. Validation du modèle

Une campagne de validation a été réalisée en trois temps : validation de la propagation dans un local rectangulaire aux parois planes et parallèles, validation de la réflexion des ondes sur une paroi à relief géométrique en champ libre et enfin validation dans un local rectangulaire dont l'une des parois contient des cavités rectangulaires.

### 2.2.1. Propagation dans un local rectangulaire

Cette première étape de validation consiste à vérifier si la simulation de la propagation en milieu confiné est correcte. Pour cela, le modèle développé est comparé à un modèle de sources images (SI) et à l'expérience au travers de réponses impulsionnelles obtenues en plusieurs points de réception et pour trois positions de sources.

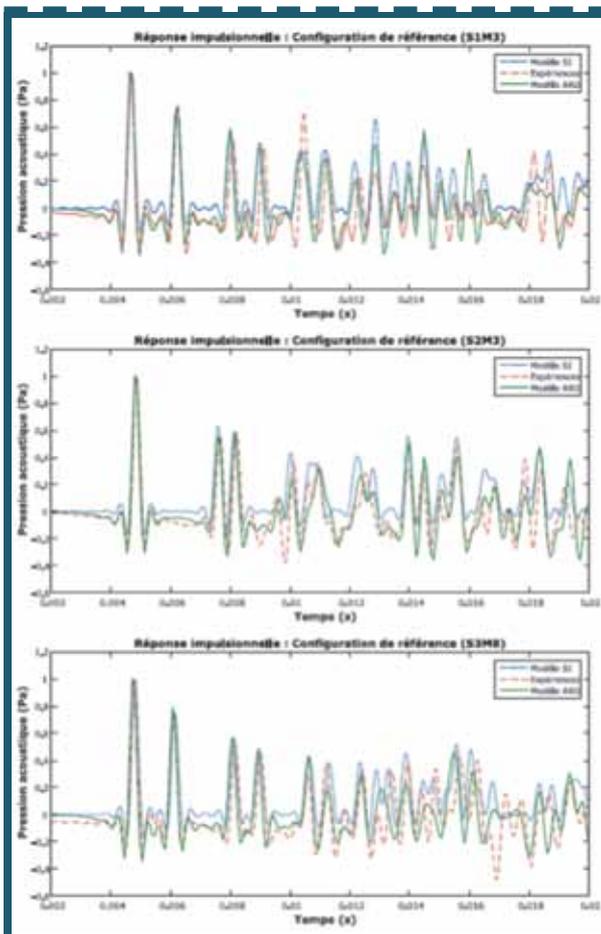


Figure 8 : Réponses impulsionnelles dans le local (sans surface à relief). Comparaison de la mesure avec les modèles SI et ARD pour trois configurations source - récepteur

La figure 8 montre les premières millisecondes des réponses impulsionnelles afin de pouvoir visualiser et distinguer les premières réflexions. La pression acoustique est normalisée par rapport à l'amplitude maximale de la première impulsion captée, c'est-à-dire celle issue du trajet direct source - récepteur. Les courbes correspondent aux trois différentes positions de source S1, S2 et S3 et aux positions de microphones M3 de coordonnées (2,50; 0,50; 1,40) m et M8 de coordonnées (3,50; 1,50; 1,40) m. Le local rectangulaire est de dimensions 3.95x4.35x2.80 m<sup>3</sup> aux six parois réfléchissantes (le coefficient de réflexion acoustique IRI=0.9).

Les coordonnées des trois positions de sources sont S1 = (1,00; 1,00; 0,90) m, S2 = (2,00; 2,00; 0,90) m et S3 = (3,00; 3,00; 0,90) m. Il est à noter que les réponses impulsionnelles obtenues à l'aide de la méthode ARD ne sont tracées que dans la bande de fréquence allant de 0 à 2500 Hz. Cette limite en fréquence provoque des oscillations parasites autour du pic d'impulsion de l'onde incidente. Malgré ces oscillations, nous constatons sur la figure 8 une concordance, à la fois en termes de temps de propagation mais aussi en termes d'amplitude des réflexions captées, entre les trois réponses présentées. Cela signifie que la propagation et surtout la réflexion aux parois est effectuée correctement par le modèle numérique.

### 2.2.2. Réflexion sur une paroi à relief

La seconde étape consiste à valider le modèle au travers de la simulation de la réflexion sur une paroi à relief par comparaison avec les résultats obtenus théoriquement et expérimentalement par Khanfir<sup>6, 13, 20</sup>. Le protocole consiste à mesurer le profil de pression acoustique au-dessus d'une paroi géométriquement complexe constituée d'une cavité rectangulaire en conditions de champ libre. La pression acoustique est captée par une ligne de microphone placée parallèlement à 20 cm au-dessus de la paroi. Deux cas sont ici présentés, dans un premier temps, la source est placée à l'aplomb du centre de la cavité et dans un second temps, la source est excentrée.

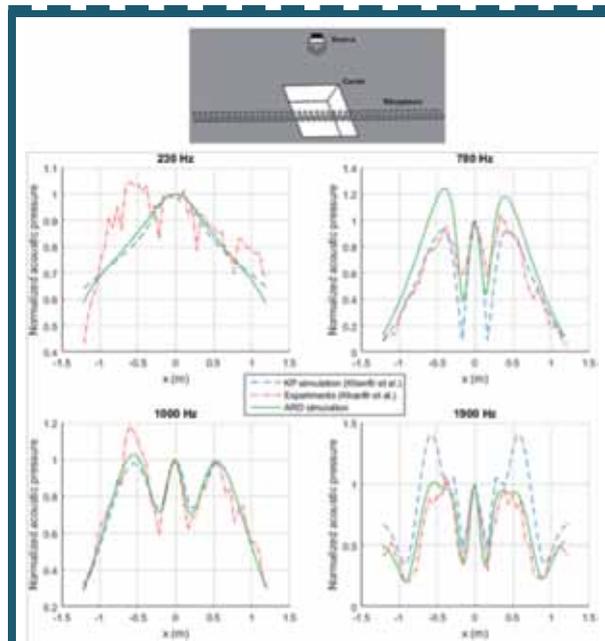


Figure 9 : Profils de pression acoustique au-dessus d'une cavité (source centrée)<sup>19</sup>

La figure 9 présente le profil de pression acoustique simulé et mesuré au-dessus d'une cavité rectangulaire de dimensions 0.46x0.48x0.21 m<sup>3</sup>. La source est placée à l'aplomb du centre de la cavité à une distance de 1 m. Les coordonnées selon les axes [x; y; z] peuvent être notées ainsi : S1 = [0; 0; 1] m. La figure 10 présente un cas similaire avec une cavité de dimensions 0.46x0.48x0.12 m<sup>3</sup> et une source excentrée selon l'axe x aux coordonnées : S2 = [-0,51; 0; 0,89] m.

Les résultats présentés ici montrent une concordance assez bonne entre les résultats obtenus antérieurement par Khanfir<sup>6</sup> et les résultats de simulations obtenus par la méthode ARD.

Les deux cas présentés ici (source centrée et excentrée) servent aussi à illustrer que l'angle d'incidence de l'onde par rapport à la paroi n'a pas d'influence sur la validité des résultats obtenus via la méthode ARD.

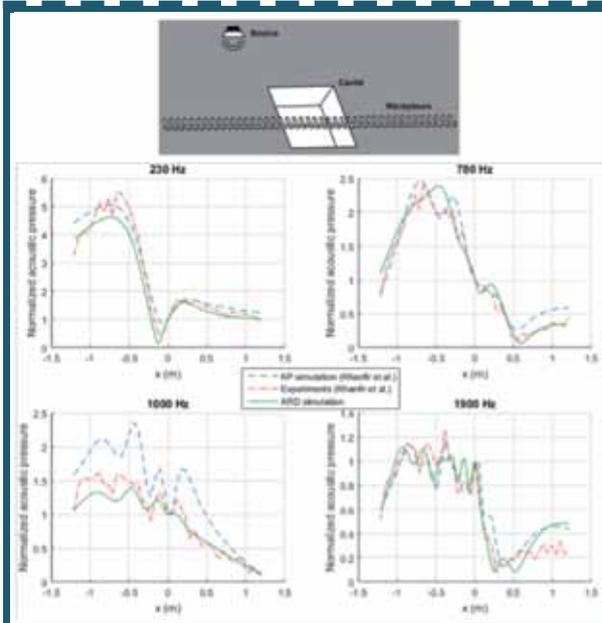


Figure 10 : Profils de pression acoustique au-dessus d'une cavité (source excentrée) <sup>19</sup>

### 2.2.3. Propagation dans un local rectangulaire contenant une paroi à relief

Nous avons enfin vérifié le modèle développé dans un milieu confiné contenant une paroi à relief. Pour cela, plusieurs cavités ont été placées sur une des parois planes du local étudié dans la première partie de l'étape de validation (paragraphe 2.2.1). Les cavités sont placées dans une zone d'une des parois planes. Cette zone est de longueur  $L_{rel} = 1,40$  m, de hauteur  $h_{rel} = 1,00$  m et d'épaisseur  $e_{rel} = 0,10$  m. Seuls le nombre et les dimensions des cavités varient entre les reliefs. Dans le cas de la Figure 11(a), nous étudions deux cavités de longueur  $L_{cav} = 0,40$  m et de hauteur  $h_{cav} = 0,60$  m avec un espace  $e_{cav} = 0,20$  m. Dans le cas des Figures 11(b) et 11(c), la longueur, la hauteur et l'espacement des cavités sont de 0,20 m, avec respectivement 6 et 12 cavités.

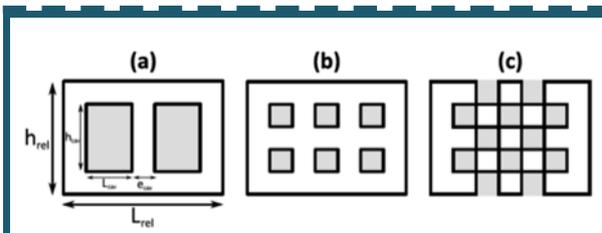


Figure 11 : Trois parois à relief géométriques étudiées. (a) 2 cavités ; (b) 6 cavités ; (c) 12 cavités

La Figure 12 présente les réponses impulsionnelles mesurées et simulées pour une position de source (S2) et de récepteur (M8) et pour les quatre configurations étudiées. Ces positions de source et récepteur ont été choisies car elles se trouvent toutes les deux proches de la surface à relief. Par conséquent, il est possible de visualiser plus clairement l'effet de cette surface.

La courbe en haut de la Figure 12 montre la configuration sans surface à relief. Le second pic capté par le récepteur à environ 7,3 ms correspond à la réflexion se produisant sur la paroi planes contenant les cavités. En présence de relief la réflexion n'engendre pas un seul pic mais plusieurs. Cependant les courbes expérimentales présentent des résultats similaires pour les trois différents reliefs. En effet, dans ces trois cas, la pression réfléchie par la paroi traitée est décomposée en trois pics. Le premier pic à environ 6,6 ms correspond à la réflexion de l'onde sur la face plane du relief. Le second pic à 7,3 ms correspond à la réflexion sur le mur au fond des cavités. Enfin le troisième pic apparaissant à 7,7 ms correspond à l'onde s'étant réfléchie sur le mur et sur les parois internes des cavités contenant le relief. Les trois résultats d'expérience présentent ces trois pics, néanmoins, l'amplitude de ces pics varie en fonction du relief étudié.

Dans le cas des courbes obtenues avec notre modèle, l'effet du relief est lui aussi observable sur chaque réponse impulsionnelle. Il existe cependant quelques différences avec les résultats expérimentaux décrits précédemment au niveau des amplitudes des pics de réflexions. Cette différence vient du filtre numérique utilisé pour simuler le relief. Mais globalement les réponses impulsionnelles obtenues théoriquement sont assez proches de celles obtenues par la mesure.

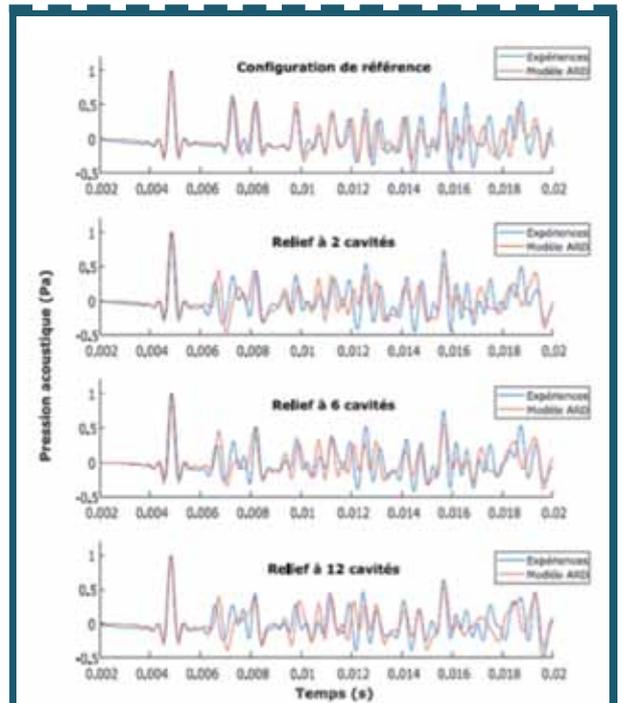


Figure 12 : Réponses impulsionnelles dans le sans (haut) et avec les trois surfaces à relief étudiées (S2M8)

### 2.3. Conclusion

Les travaux de cette étude ont eu pour objectif de développer une méthode de simulation numérique de propagation du son en milieu confiné tout en prenant en compte de manière précise la diffusion et la diffraction induites par la présence de relief géométrique au niveau des parois. Pour ce faire, la méthode ARD s'est révélée être la plus adaptée car elle permet de simuler la propagation en milieu confiné de manière rapide. Il a été montré qu'il est possible d'intégrer, au sein d'une même partition simulée, des PML ainsi que



des parois présentant du relief géométrique. Cette amélioration a permis de simuler des parois à relief possédant un coefficient de réflexion dépendant de la fréquence. Ce dernier élément a pu être introduit dans la méthode de simulation via l'utilisation de filtre d'impédance numérique. L'étape de validation a permis de montrer que les résultats de simulation, à la fois, en termes de propagation en milieu confiné mais aussi en termes de réflexion et de diffusion sur des parois géométriquement complexes concordent avec des résultats obtenus par d'autres méthodes ainsi que par des mesures expérimentales. Une campagne de mesure est actuellement en cours afin de comparer le modèle présenté ici à des mesures expérimentales effectuées dans un local réel contenant des parois à relief géométrique.

Cette étude a permis également de déterminer le coefficient d'absorption acoustique apparent des parois à relief. En effet, plusieurs cassures du rayon sonore sont constatées quand celui-ci se propage dans un espace clos et vient se réfléchir sur une paroi à relief. Si bien que l'amplitude de l'onde sonore est plus atténuée que si elle se réfléchissait sur une paroi plane. Ainsi par différence de champ pression acoustique simulé par la méthode ARD dans un local avec et sans la présence d'une paroi à relief, il a été possible d'estimer l'absorption apparente.

3

### Mesure in situ du coefficient de diffusion acoustique des parois verticales à relief

Un nouveau système de mesure du coefficient de diffusion acoustique des parois verticales présentes dans les locaux industriels a été élaboré au sein de l'équipa APLI. La technique de mesure développée à l'origine dans des conditions de champ libre <sup>14</sup> a été adaptée pour éviter les problèmes d'échos parasites venant de la réverbération et des sources bruyantes présentes dans ce type de local. Pour cela, une antenne acoustique multipolaire et une source impulsive permettant respectivement le filtrage spatial et la séparation des échos parasites ont été utilisées.

#### 3.1. Principe de mesure

La technique de mesure du coefficient de diffusion acoustique proposée à l'origine par Vorländer et Mommertz <sup>14</sup> consiste à superposer des réponses impulsionnelles obtenues au-dessus de la paroi diffuse pour plusieurs angles d'incidence du champ acoustique. La paroi à relief étudiée repose sur une table tournante. Les différentes réponses impulsionnelles sont obtenues en faisant tourner cette plateforme, ce qui permet de faire varier l'angle d'incidence  $\varphi$  (voir figure 13). Vorländer et Mommertz ont choisi d'utiliser le principe d'atténuation des ondes réfléchies diffuses par processus de moyennage dans des conditions de champ libre. La source et le récepteur sont placés en champ lointain, positionnés dans la direction spéculaire  $\theta_s$ .

La pression acoustique spéculaire  $p_{\text{spec}}$  est obtenue en moyennant selon l'angle  $\varphi$  un nombre important de pressions acoustiques réfléchies  $p_{r,\varphi_i}$  pour une incidence spéculaire  $\theta_s$  : la composante spéculaire reste cohérente en fonction de  $\varphi$  contrairement à la composante diffuse qui, une fois moyennée, s'atténue :

$$p_{\text{spec}}(t, \theta_s) \cong \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_{r,\varphi_i}(t, \theta_s) \quad (5)$$

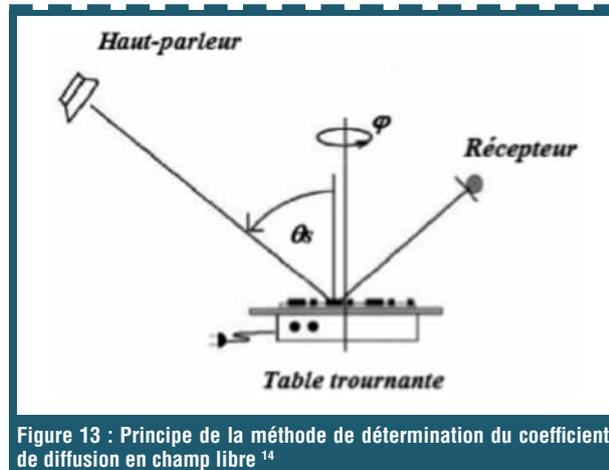


Figure 13 : Principe de la méthode de détermination du coefficient de diffusion en champ libre <sup>14</sup>

A partir de la pression acoustique spéculaire temporelle, il est possible, dans les conditions de champ lointain, de déterminer l'énergie totale réfléchiée moyennée dans la direction spéculaire  $\theta_s$  par transformées de Fourier. Il est également possible d'évaluer l'énergie réfléchiée spéculaire. En combinant ces différentes énergies, on obtient le coefficient de diffusion acoustique  $\delta$  dans une direction spéculaire  $\theta_s$  :

$$\delta(f, \theta_s) = \frac{\overbrace{\sum_{i=1}^n |p_{r,\varphi_i}(f, \theta_s)|^2}^{\text{Energie réfléchiée totale}} - \frac{1}{n} \overbrace{\left| \sum_{i=1}^n p_{r,\varphi_i}(f, \theta_s) \right|^2}^{\text{Energie réfléchiée spéculaire}}}{\underbrace{\sum_{i=1}^n |p_{r,\varphi_i}(f, \theta_s)|^2}_{\text{Energie réfléchiée totale}}}, \quad n \gg 1 \quad (6)$$

#### 3.2. Description du dispositif de mesure du coefficient de diffusion acoustique des parois verticales

Le dispositif de mesure du coefficient de diffusion acoustique des parois verticales est présenté sur la figure 14 et 15. Une antenne multipolaire contenant 13 capteurs <sup>16</sup> (15 capteurs dernièrement pour améliorer la sensibilité de la mesure en basses fréquences : octave 125 Hz) et une source impulsionnelle <sup>17</sup> sont fixées chacune sur une tige rigide pouvant être déplacée selon l'angle d'incidence spéculaire  $\theta_s$  sur deux grands arceaux semi-circulaires séparés. L'antenne et la source assurent respectivement le filtrage spatial et la séparation des échos parasites. Chaque arceau possède sur toute sa longueur une courroie crantée pilotée par deux roues dentées imbriquées qui permettent de positionner simultanément la source et l'antenne selon l'angle spéculaire  $\theta_s$ . La courbure de chaque arceau permet avec ce principe de garantir une position fixe du point de mesure en fonction de l'incidence  $\theta_s$ . Celui-ci peut varier de  $10^\circ$  à  $80^\circ$ . Un plateau rotatif permet de faire pivoter selon l'angle  $\varphi$  ces deux arceaux (par conséquent l'antenne et la source impulsionnelle) très commodément autour du point de mesure (voir figure 15).

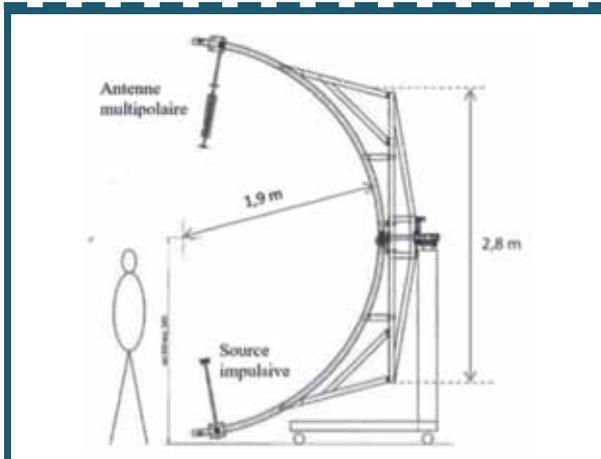


Figure 14 : Schéma du dispositif de mesure

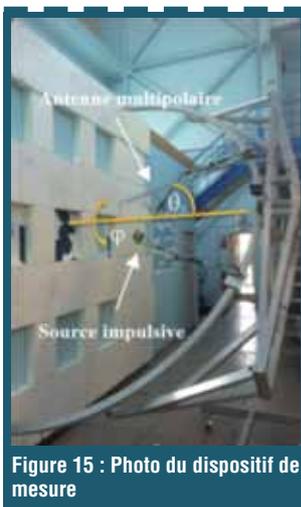


Figure 15 : Photo du dispositif de mesure

Les distances « source impulsive – paroi diffuse » et « centre de l’antenne – paroi diffuse » sont également modifiables. Celles-ci souvent fixées à 1,20 m obligent les conditions de mesure à être en champ proche et non en champ lointain comme préconisé par la méthode de mesure<sup>14</sup>.

La figure 16-b montre la réponse impulsionnelle obtenue pour une incidence spéculaire  $\theta_s$  égale à  $40^\circ$  après superposition de 10 réponses impulsionnelles synchronisées et moyennées.

Nous remarquons bien que la composante spéculaire de cette réponse impulsionnelle émerge largement par rapport à celle de la réponse impulsionnelle obtenue uniquement pour une valeur discrète de  $\varphi=30^\circ$  (figure 16-a). Cela dit, si le pas angulaire de cette discrétisation est trop grand, cela peut engendrer des erreurs de mesure sur le coefficient de diffusion.

### 3.3. Mesure du coefficient de diffusion acoustique d'un diffuseur de Schroëder

Une campagne de mesure a été menée dans un hall réverbérant de l'INRS dont les conditions acoustiques sont données dans le tableau 1. On remarque que le temps de réverbération est relativement élevé ( $T_{rmax} = 1,42$  s pour l'octave 1000 Hz). Le niveau équivalent linéaire du bruit de fond intégré sur 30 secondes a également été mesuré par bandes d'octave. Il en résulte un niveau équivalent pondéré A assez faible (37,6 dB(A)).

Octave (Hz)	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Tr (s)	2,14	1,44	1,40	1,42	1,40	1,15	0,75
$L_{eq,30s}$ (Lin)	49	40,2	26,4	22,8	18,4	14,1	13,1

Tableau 1 : Mesure du temps de réverbération et du niveau équivalent du hall

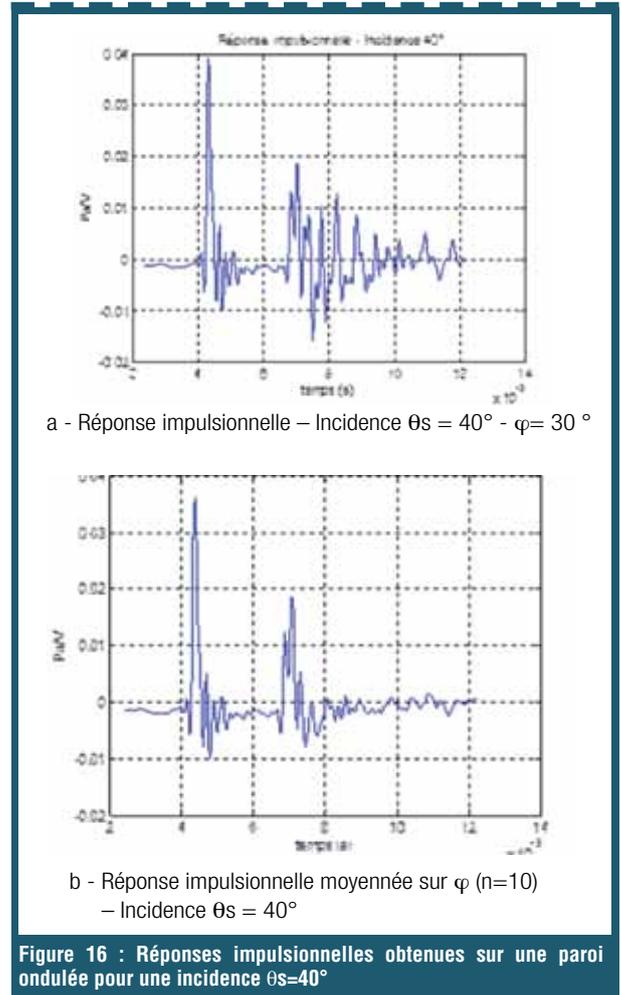


Figure 16 : Réponses impulsionnelles obtenues sur une paroi ondulée pour une incidence  $\theta_s=40^\circ$

Le premier diffuseur de Schroeder étudié possède 144 cellules dont la profondeur répond à une séquence mathématique fondée sur la racine primitive d'un nombre premier. Sa plage fréquentielle d'application s'étend de 800 Hz à 4000 Hz. Les dimensions du diffuseur sont  $60 \times 60$  cm<sup>2</sup>. 6 diffuseurs ont été accolés pour donner une surface totale diffusante de  $120 \times 180$  cm<sup>2</sup>.



Figure 17 : Blocset du diffuseur de Schroeder

Sur la figure 18, nous avons tracé par bandes de tiers d'octave la moyenne ainsi que l'écart-type des valeurs que nous avons obtenues avec notre dispositif et nous les avons comparés à d'autres résultats expérimentaux issus de la littérature scientifique<sup>15</sup>. Nos mesures ont été réalisées à 1,3 m du diffuseur (composé de 6 blocsets pour plusieurs angles d'incidence). Nous remarquons une bonne concordance entre nos résultats expérimentaux et ceux issus de la bibliographie.

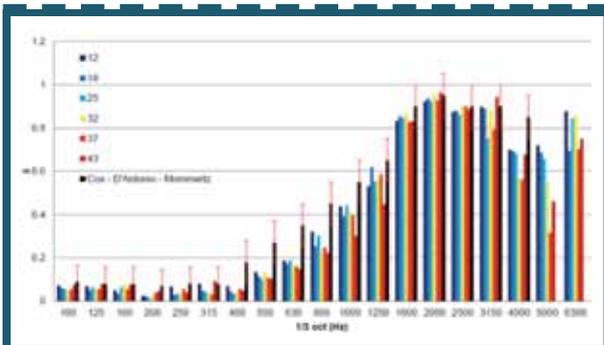


Figure 18 : Coefficient de diffusion acoustique du diffuseur de Schroeder mesuré pour plusieurs angles spéculaires mesuré à 1,3 m

Le caractère acoustique très diffusant du diffuseur montre que quel que soit l'angle d'incidence spéculaire, le coefficient de diffusion reste constant. Il est élevé dans la même zone fréquentielle 1000 Hz - 4000 Hz. Cette plage de fréquence correspond aux longueurs d'onde des dimensions caractéristiques des cellules du diffuseur, c'est-à-dire aux fréquences où la diffusion est maximale :  $f \approx c/(2.h)$  pour  $h$  compris entre 4 cm et 13 cm et pour  $f \approx c/(2.a)$  pour  $a = 4,5$  cm, soit environ de 1250 Hz à 4000 Hz (voir figure 19).

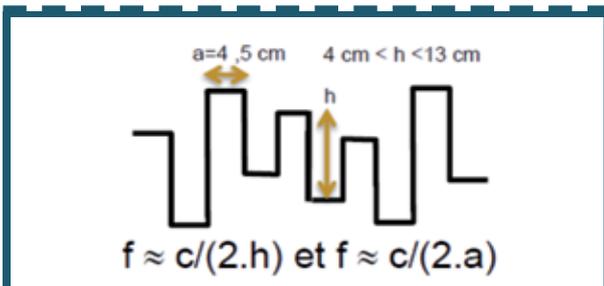


Figure 19 : Dimensions caractéristiques du diffuseur de Schroeder

Une nouvelle campagne de mesure a été réalisée sur un diffuseur Schroeder basses fréquences : il contient 169 cellules carrées de 10 cm de largeur chacune dont la profondeur varie de 0 à 79,5 cm afin de couvrir un domaine fréquentiel de 200 à 1700 Hz (voir figure 20).

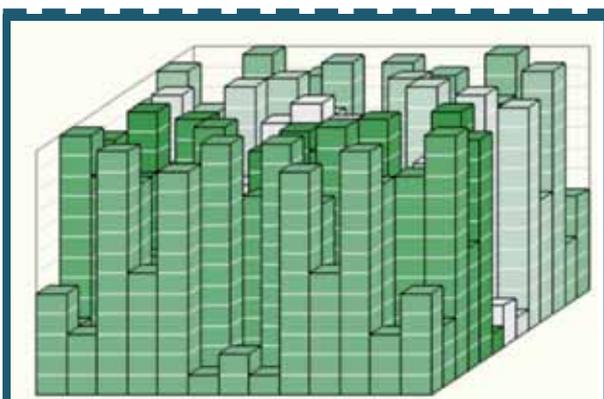


Figure 20 : Prototype du diffuseur de Schroeder basses fréquences

Nous constatons que la diffusion acoustique est importante sur un large domaine fréquentiel et ce dès le tiers d'octave 100 Hz pour de faibles incidences.

Elle diminue quand l'angle d'incidence augmente. En effet, les cellules du diffuseur de grandes profondeurs qui induisent une forte diffusion acoustique en basses fréquences, sont beaucoup moins insonifiées dès que l'angle d'incidence augmente.

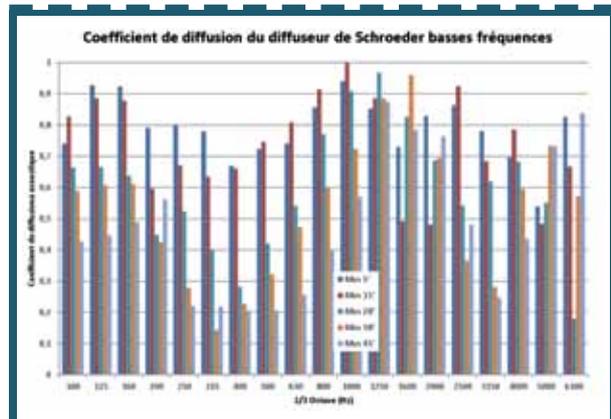


Figure 21 : Coefficient de diffusion acoustique du diffuseur de Schroeder basses fréquences mesuré pour plusieurs angles spéculaires mesuré à 1,3 m

La figure 21 montre la comparaison entre le coefficient de diffusion mesuré avec notre dispositif et celui issu de la théorie des diffuseurs (transformée spatiale de Fourier)<sup>16</sup>. Nous constatons que le dispositif permet d'estimer correctement le coefficient de diffusion de ce type de paroi très diffusante pour de faibles incidences.

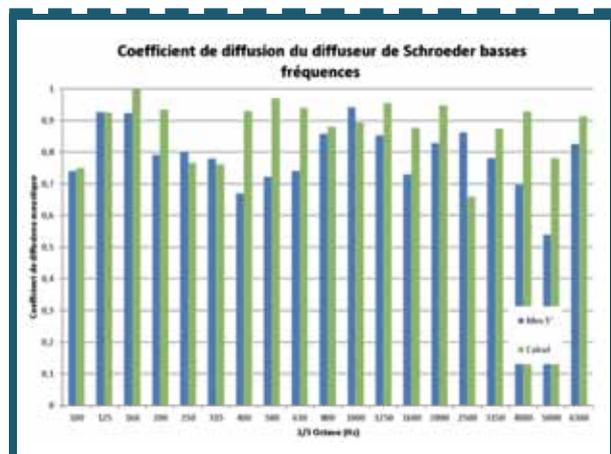


Figure 22 : Coefficient de diffusion acoustique du diffuseur de Schroeder basses fréquences théorique et mesuré pour un angle spéculaire  $\theta_s = 5^\circ$  à 1,3 m

### 3.4. Conclusion

Le développement de ce système a permis la mesure du coefficient de diffusion acoustique de nombreuses parois à relief (contenant des cavités, tôle ondulée, ...). Une étude récente sur le domaine de validité de ce système a été menée. Elle a montré que l'estimation du coefficient est correcte quand la diffusion engendrée par la paroi est importante.

En effet, les rayons diffus issus de la paroi à relief doivent être suffisamment nombreux et aléatoires pour que le processus de moyennage sur lequel repose la technique de mesure soit assuré.

Par conséquent, pour des parois peu diffusantes où seulement quelques rayons sonores sont diffractés, le dispositif n'est pas performant pour évaluer le coefficient de diffusion. Le système a montré cependant son efficacité sur un large domaine fréquentiel et a permis d'élaborer une première base de données du coefficient de diffusion des objets encombrants dans les locaux industriels <sup>21</sup>. Actuellement, une autre technique de mesure basé sur les réponses impulsionnelles spatiales est en cours de développement pour pallier au problème des parois peu diffusantes.

## 4

### Conclusion générale

L'ensemble des travaux développés par l'équipe APLI concerne l'acoustique industrielle et sont au service d'outils qui permettent de réduire à terme le bruit et l'exposition des salariés dans le secteur industriel. En effet, les solutions de traitement acoustique sont d'autant plus appropriées et efficaces quand les caractéristiques des parois qui délimitent les locaux sont à l'origine bien connues et maîtrisées.

A l'avenir, les outils développés pour simuler le champ de pression dans un local seront exploités pour estimer les indices de clarté comme le C50 ou C80. Ainsi, l'impact du relief des parois sur ces indicateurs pourra être étudié. Les réponses impulsionnelles simulées dans ce type de local convoluées avec les signaux en sortie d'aides d'auditives permettront également d'étudier la dégradation ou l'amélioration de ces indices si l'aide auditive est utilisée avec un traitement, un réglage particulier comme la directivité, réducteur de bruit, ...

## 5

### Bibliographie

- 1 A.M Ondet, J-L Barbry, **Modelling of sound propagation in fitted workshops using ray tracing**, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol : 85, pp 787-796, 1989
- 2 J.F. Allard, B. Sieben, **Measurement of acoustic impedance in a free field with two microphones and a spectrum analyser**, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol : 77, pp1617-1618, 1985
- 3 J. Ducourneau, **Mesure in situ du coefficient de réflexion et d'absorption acoustique de revêtements utilisés dans les locaux industriels**, Document de travail INRS, I.E.T – DT – 423 JD, 1999
- 4 J. Ducourneau, V. Planeau, **New average absorption coefficient for enclosed spaces with non uniformly distributed absorption**, *Applied Acoustics*, Vol : 64, pp 845-862, 2003
- 5 L. Bos, « **Caractérisation acoustique des parois épaisses périodiques dans les locaux industriels** », Université Henri Poincaré Nancy 1, Nancy, 2006.
- 6 A. Khanfir, **Étude des mécanismes de diffusion acoustique d'une cavité et d'un réseau à relief périodique et aperiodique**, Université de Lorraine, Nancy, 2012.

- 7 J. Ducourneau, L. Bos, V. Planeau, A. Faiz, S. Skali Lami, A. Nejade, **Prediction of the acoustic pressure above periodically uneven facings in industrial workplaces**, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 329, n° 11, pp 2276-2290, 2010
- 8 J. Ducourneau, A. Faiz, et J. Chatillon, **New device for measuring mapping of sound scattering coefficients of vertical uneven surfaces in a reverberant workplace**, *Applied Acoustics*, vol. 90, pp 21-30, avr. 2015
- 9 N. Raghuvanshi, R. Narain, & M. C. Lin, **Efficient and Accurate Sound Propagation Using Adaptive Rectangular Decomposition**, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 15, no 5, pp 789 801, sept. 2009
- 10 D. Botteldooren, **Finite-difference time-domain simulation of low-frequency room acoustic problems**, *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 98, n° 6, pp 3302-3308, 1995
- 11 G. Mur, **Absorbing Boundary Conditions for the Finite-Difference Approximation of the Time-Domain Electromagnetic-Field Equations**, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. EMC-23, n°4, pp 377-382, 1981
- 12 N. Raghuvanshi, **Interactive physically-based sound simulation**, University of North Carolina at Chapel Hill, Chapel Hill, N.C., 2013
- 13 Khanfir, A. Faiz, J.Ducourneau, J. Chatillon, S. Skali-Lami, **Scattered acoustic field above a grating of parallel rectangular cavities**. *Journal of Sound and Vibration*, Vol : 332, n° 4, pp 1047-1060, 2013
- 14 M. Vorlander, E. Mommertz, **Definition and measurement of random-incidence scattering coefficient**, *Applied Acoustics*, 60, pp 187 – 199, 2000
- 15 J. Ducourneau, A. Faiz, A Khanfir and J. Chatillon, **Measuring sound scattering coefficients of uneven surfaces in a reverberant workplace - principle and validation of the method**, *Applied Acoustics* 74, pp 653-660, 2013
- 16 J. Ducourneau, V. Planeau, A. Nejade, **Design of a multipolar weighting for acoustic antennae**, *Applied Acoustics* 70, pp 484-49, 2009
- 17 J. Ducourneau, V. Planeau, J. Chatillon, A. Nejade, **Measurement of sound absorption coefficients of flat surfaces in a workshop**, *Applied Acoustics* 70, pp 710-721, 2009
- 18 T.J Cox, P. D'Antonio, **Acoustics absorbers and diffusers Theory, Design and application**, Spon Press, 2004
- 19 K. Rabisse, J. Ducourneau, A. Faiz, N. Trompette, **Physically-based numerical sound propagation modeling in rooms with non-flat walls**, *International Congress on Acoustic*, ICA Buenos Aires, 2016
- 20 A. Khanfir, A. Faiz, J. Ducourneau, J. Chatillon, **Scattered acoustic field above a grating of non-parallel rectangular cavities** », *J. Sound Vib.*, vol. 361, pp 251-260, 2016.
- 21 A. Faiz, J. Ducourneau, A. Khnafir, N. Trompette, **A list of sound scattering coefficients of bulky objects and people in industrial workplaces**, *Acoustics in Practice*, Issue 6, 2017

# Les Cahiers de *l'Audition*

La Revue du Collège National d'Audioprothèse



## Déposez vos petites annonces

dans la revue incontournable **distribuée gratuitement à tous les audioprothésistes français** et aux étudiants de 2ème et 3ème année en faculté d'audioprothèse

**La mise en ligne est offerte sur [www.lescahiersdelaudition.fr](http://www.lescahiersdelaudition.fr) pour toute parution au sein de la revue**

Pour tout renseignement, contactez le Collège National d'Audioprothèse  
**01.42.96.87.77 ou [cna.paris@orange.fr](mailto:cna.paris@orange.fr)**

## Audilab, un réseau qui apporte à vos patients, une prise en charge de qualité.



### DES VALEURS RECONNUES

Depuis 5 ans, Audilab est l'unique réseau d'audioprothésistes à détenir 3 certifications (ISO 9001, ISO 14001 et NF Service 518) qui affichent de façon objective la prise en charge optimale des patients.

### DES VALEURS COMMUNES

Le réseau, composé de plus de 180 centres, est dirigé par des audioprothésistes associés pour favoriser le partage des expériences et la montée en compétences par des sessions de formation.

### DES VALEURS NOVATRICES

Les centres sont équipés des toutes récentes innovations technologiques et profitent en permanence des dernières évolutions pour garantir des méthodes d'appareillage des plus précises.

### DES VALEURS PARTAGÉES

Les services mis à disposition libèrent les audioprothésistes associés de lourdes contraintes administratives et de gestion, leur permettant de se concentrer sur leur cœur de métier.

Audioprothésistes, si vous vous retrouvez dans ces valeurs, contactez-nous en toute confidentialité :  
**02 47 64 64 20 | [direction@audilab.fr](mailto:direction@audilab.fr)**



Retrouvez nous sur  
[www.audilab.fr](http://www.audilab.fr)

RÉSEAU  
**Audilab**

# Les thématiques de recherche en oto-neurologie de l'équipe nancéienne

**Cécile PARIETTI-WINKLER** Professeur des Universités, Université de Lorraine  
 Praticien Hospitalier, Service d'ORL et chirurgie cervico-faciale, CHRU de Nancy  
 EA3450 DevAH "Développement, Adaptation, Handicap" - Centre de Formation en Audioprothèse, Faculté de Pharmacie  
 Département Universitaire d'Orthophonie, Faculté de Médecine

Les thématiques de recherche en otoneurologie sont développées par le Pr Parietti-Winkler au sein de l'EA 3450 DevAH (Développement-Adaptation-Handicap), Pôle BMS (Biologie Santé Environnement), Université de Lorraine. Ces thématiques s'articulent autour de 3 axes en parfaite adéquation avec l'activité clinique du Pr Parietti-Winkler : premièrement, une thématique « Audition », deuxièmement une thématique « Equilibre, contrôle de la posture et atteintes vestibulaires », et troisièmement une thématique plus récente de recherche en pédagogie en lien avec ses missions de formatrice au sein de l'Ecole de Chirurgie et de membre du RAP (réseau d'accompagnateur pédagogique) du SU2IP (Service Universitaire d'Innovation et d'Ingénierie Pédagogique) de l'Université de Lorraine. La richesse des thématiques de recherche développées est basée sur de très nombreuses collaborations : des collaborations entre différents laboratoires de recherche (APEMAC, INRS-Nancy, IJL, LEM3, LEMTA), entre différentes structures de soins (Service d'ORL et CCF et de gériatrie du CHRU, Institut Régional de Réadaptation) mais également entre différentes composantes de formation de l'Université de Lorraine (Centre de Formation en Audioprothèse, Ecole de Chirurgie, Département Universitaire d'Orthophonie, SU2IP).

La thématique « **Equilibre, contrôle de la posture et atteintes vestibulaires** » est la thématique de recherche la plus anciennement développée par l'équipe nancéienne. Elle s'intéresse

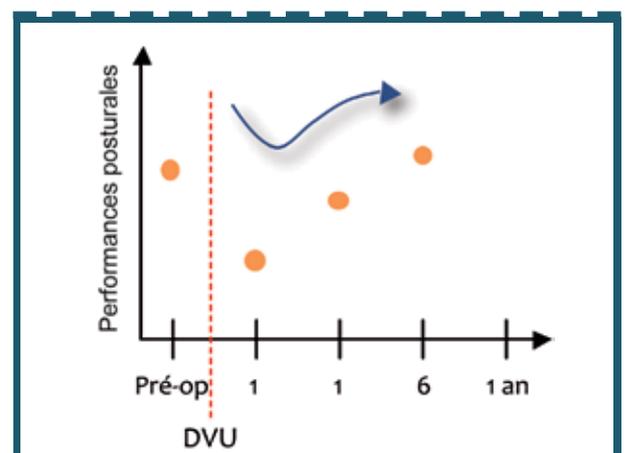
aux modalités de compensation de la fonction d'équilibration et du contrôle de la posture en cas d'atteintes vestibulaires, comme par exemple, lors d'une implantation cochléaire ou en cas de schwannome vestibulaire avec exérèse chirurgicale.

Un schwannome vestibulaire (SV) est une tumeur bénigne développée au dépend du nerf vestibulaire, et dont la croissance lente entraîne une altération progressive de la fonction vestibulaire. La mise en place graduelle, parallèlement à la dégradation vestibulaire, de mécanismes d'adaptation, appelés compensation vestibulaire, limite les troubles de l'équilibre et la symptomatologie vertigineuse ressentis par le patient, sans pour autant maintenir des performances posturales normales.

La dégradation des performances posturales est d'autant plus marquée au cours de la croissance tumorale, qu'il existe en cas de tumeur volumineuse, une probable atteinte centrale surajoutée, en rapport avec la compression des structures nerveuses centrales par la tumeur (Ribeyre et al., 2015). L'exérèse chirurgicale du SV équivaut à une déafférentation vestibulaire unilatérale aigue (DVUa), supprimant brutalement toutes les informations vestibulaires résiduelles et décompensant ainsi une situation préalablement compensée (bien qu'incomplètement). Cette DVUa entraîne ainsi un effondrement des performances posturales immédiatement après la chirurgie, suivie par une récupération progressive des niveaux de performances pré-opératoires (à 1 et 3 mois après la chirurgie), voire même, à long terme (6 et 12 mois après la chirurgie), d'une amélioration comparée aux performances posturales pré-opératoires. Après la chirurgie, la mise en place de mécanismes centraux d'adaptation basés sur la substitution sensorielle et le développement de nouvelles



Coupe IRM axiale d'un patient présentant un schwannome vestibulaire gauche (étoile)



Cinétique de variations des performances posturales après exérèse chirurgicale d'un schwannome vestibulaire



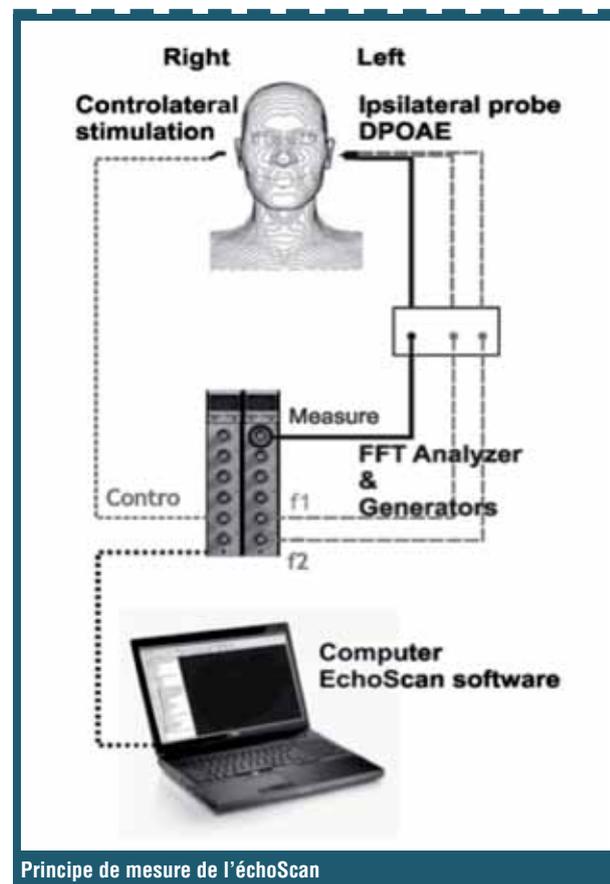
stratégies comportementales permet la récupération du contrôle de la posture et l'amélioration des performances d'équilibres (Parietti-Winkler et al., 2006, 2008).

L'équipe nancéienne a mis en évidence l'influence de nombreux facteurs pré-opérateurs sur les modalités de compensation du contrôle de la posture après exérèse chirurgicale d'un SV. C'est le cas de l'âge (Gauchard et al., 2012), de la préférence sensorielle pré-opérateur (Parietti-Winkler et al., 2008), de la pratique d'activités physiques préopérateur (Gauchard et al., 2013), du statut vestibulaire pré-opérateur (Parietti-Winkler et al., 2011), de certains paramètres psychoaffectifs (Ribeyre et al., 2016), ces différents facteurs modifiant le profil de récupération du contrôle de la posture postopérateur. Une comparaison du poids respectif de ces différents paramètres pré-opérateurs dans la compensation posturale a permis d'identifier que le statut vestibulaire et la pratique d'activités physiques (AP) sont des facteurs prédictifs majeurs pour le contrôle de la posture (Parietti-Winkler et al., 2016). En effet, l'asymétrie vestibulaire pré-opérateur et la pratique pré-opérateur d'AP sont des facteurs protecteurs vis-à-vis de la dégradation des performances posturales post-opérateurs. Une collaboration avec l'Institut Régional de Réadaptation (Pr. Jean PAYSANT, Dr. Benoîte LASSALLE médecin physique et rééducateur référent en rééducation vestibulaire) est venue enrichir cette thématique de recherche depuis les 3 dernières années. Elle a permis l'élaboration d'un protocole de recherche clinique qui, sur la base des travaux de l'équipe concernant l'influence de la pratique d'AP, a pour but d'évaluer l'efficacité d'une rééducation vestibulaire pré-opérateur sur la compensation de l'équilibre après exérèse chirurgicale d'un SV. Ce protocole a été retenu lauréat dans la 8ème édition du Programme Hospitalier de Recherche Clinique et d'innovation Interrégional (PHRC-I 2013), obtenant ainsi une dotation de 181000 euros de la DGOS. Il est actuellement en cours.

L'implantation cochléaire, dont l'efficacité dans la réhabilitation des surdités sévères à profondes bilatérales n'est plus à démontrer, peut également être pourvoyeuse d'atteintes vestibulaires. En effet, elle nécessite l'insertion dans la cochlée d'un corps étranger (le porte-électrode). L'effraction labyrinthique ainsi réalisée, peut, bien que toutes les précautions soient prises lors de la chirurgie, avoir un effet délétère sur l'appareil vestibulaire et donc des conséquences sur le contrôle de la posture et sur la perception visuelle de la verticale gravitaire. Des premiers travaux réalisés par l'équipe nancéienne ont mis en évidence que, tandis qu'une altération de la fonction vestibulaire stricto sensu peut être observée de façon très variable après la chirurgie, l'implantation cochléaire n'entraîne pas de dégradation des performances posturales (Parietti-Winkler et al., 2015). A l'inverse, il semblerait que l'implantation cochléaire, par le biais de la réhabilitation auditive, améliore à long terme les performances posturales. L'hypothèse serait que la restauration de l'audition conduit au développement de nouvelles stratégies sensori-motrices et comportementales améliorant l'efficacité du contrôle postural et de l'orientation, en particulier dans les conditions d'équilibration les plus complexes. Ces travaux, qui font l'objet d'une thèse d'Université, sont actuellement en cours.

**La thématique « Audition »** développée au sein de l'équipe nancéienne a débuté en 2006 dans le cadre d'une collaboration avec le laboratoire d'Ototoxicité et de Neurotoxicité de l'INRS-Nancy (Institut National de Recherche de Sécurité), dirigé alors par Mr. Pierre CAMPO qui pilote, au sein de l'INRS, la thématique « Multiexposition ». Cette équipe de recherche s'intéresse

aux mécanismes lésionnels d'une exposition au bruit et aux solvants sur le système auditif. En effet, les solvants aromatiques présentent non seulement des effets ototoxiques directes, mais potentialisent de plus les effets néfastes d'une surstimulation sonore sur le système auditif. L'équipe de Mr. Campo a mis en évidence, chez l'animal, que le toluène, l'un des solvants aromatiques les plus utilisés dans l'industrie, inhibe le réflexe d'oreille moyenne, rendant l'oreille interne plus fragile à la surstimulation sonore, et expliquant ainsi l'effet synergique de la co-exposition solvants-bruit. Dans ce contexte scientifique, des premiers travaux issus de la collaboration de l'équipe nancéienne avec l'INRS ont permis de préciser que le mécanisme en cause semblait être une inhibition des noyaux centraux pilotant le réflexe d'oreille moyenne. Ils ont également permis d'en préciser la cible moléculaire (Maguin et al. 2009 ; Waniusiow et al. 2009). De plus, grâce à un nouveau dispositif utilisant la mesure des produits de distorsions acoustiques associée à une stimulation acoustique controlatérale à forte intensité, et permettant d'évaluer à la fois le réflexe d'oreille moyenne et le réflexe de protection de l'oreille interne par mise en œuvre du système efférent olivocochleaire, les équipes de Mr. CAMPO et du Pr. PARIETTI-WINKLER ont mis en évidence que les structures nerveuses centrales impliquées dans le réflexe de protection de l'oreille interne sont très peu sensibles au toluène, contrairement à celles impliquées dans le réflexe d'oreille moyenne (Campo et al., 2011). Cet axe de recherche mené avec l'INRS s'est avéré être une activité de recherche de type translationnel, développée sur des modèles animaux et transposée à l'homme : en effet, à la suite de ces premiers travaux sur l'animal, a été conçu pour l'Homme un nouveau dispositif d'évaluation objective de l'audition, baptisé EchoScan.



Principe de mesure de l'échoScan

Ce dispositif mesure donc à la fois les otoémissions, reflétant le fonctionnement des cellules ciliées externes, cibles privilégiées de nombreux agents vulnérants pour l'audition (vieillesse, bruit, médicaments ototoxiques...), et le réflexe d'oreille moyenne, dont la commande centrale est la cible des solvants aromatiques très présents dans l'industrie.

Il est actuellement commercialisé par la Société Echodia. Grâce à plusieurs protocoles de recherche clinique promus par le CHU de Nancy et réalisés dans le Service d'ORL et CCF, ce dispositif a été validé chez l'homme. Il fournit, en toute innocuité, des résultats objectifs et reproductibles. Il est plus sensible que l'audiométrie subjective et pourrait être particulièrement intéressant dans des programmes de dépistage des atteintes auditives (Venet et al. 2011). Ainsi, ce dispositif a été utilisé dans l'évaluation auditive de populations de salariés exposés à des agents vulnérants pour le système auditif, comme le bruit et les solvants, sur les lieux même de l'exposition professionnelle. Il a permis de mettre en évidence chez ces salariés une altération de la fonction auditive avant même une élévation des seuils auditifs en audiométrie conventionnelle (signant des dégâts irréversibles dans l'oreille interne), confirmant l'intérêt de ce dispositif dans les programmes de dépistage et de prévention (Venet et al. 2014). Enfin ce dispositif a été utilisé dans l'évaluation auditive des téléopérateurs (Venet et al. 2018), ce dernier protocole de recherche clinique ayant fait appel à une collaboration avec le Centre de Formation en audioprothèse.

Parallèlement à ce premier axe de recherche, l'équipe nancéenne a également développé un axe de recherche concernant le versant audiologique de l'implantation cochléaire, dans un souci d'évaluation de ses propres pratiques cliniques et de promotion de cette technologie. Ainsi l'équipe nancéenne a mis en évidence, dans une étude portant sur l'évaluation de l'impact de l'implantation cochléaire sur la qualité de vie et sa corrélation avec les performances d'intelligibilité et les capacités à téléphoner d'une population de patients adultes implantés cochléaires, que plus la capacité à téléphoner se rapproche de la normale, plus les performances auditives sont grandes et plus la qualité de vie est élevée (Rumeau et al. 2015). L'évaluation de la capacité à téléphoner chez les patients implantés cochléaires pourrait donc constituer un moyen simple et rapide pour évaluer à la fois les performances d'intelligibilité et la qualité de vie, fournissant ainsi un reflet global du résultat de l'implantation cochléaire.

Chez le sujet âgé, l'équipe nancéenne a mis en évidence que l'implantation cochléaire permettait une amélioration de l'intelligibilité et de la qualité de vie, tout comme chez le sujet plus jeune, l'âge ne devant donc pas être considéré comme un facteur limitant de l'implantation cochléaire (Sonnet et al., 2017). De plus, elle a montré que l'implantation cochléaire améliorait l'autonomie du sujet âgé, chez qui la dépendance et l'institutionnalisation qui en découle souvent sont un problème majeur de santé publique. Promouvoir l'implantation cochléaire pourrait donc participer à la réduction du coût sociétal de la prise en charge du sujet âgé sourd.

**La thématique de recherche en pédagogie** est développée dans les différentes composantes de formation dans lesquelles est impliquée le Pr. C. Parietti-Winkler (Centre de formation en Audioprothèses, Ecole de Chirurgie, Département Universitaire d'Orthophonie, Faculté de Médecine). Elle s'intègre dans l'Hôpital Virtuel de Lorraine, projet régional et européen porté par l'Université de Lorraine et bénéficiant d'un financement FEDER.

Au sein de l'Ecole de Chirurgie, l'équipe nancéenne a développé un dispositif de formation à la chirurgie de l'oreille moyenne par simulation articulée autour de 2 axes pratiques : un entraînement sur simulateur de réalité virtuelle VoxelMan (dont 2 ont été acquis par l'Ecole de Chirurgie) d'une part, et un entraînement sur maquette synthétique d'os temporal d'autre part. Une collaboration entre le Pr Parietti-Winkler et une société concevant des dispositifs médicaux et chirurgicaux en impression 3D à partir de données patients d'imagerie, a donné le jour à une maquette d'os temporal destinée à l'apprentissage de la chirurgie otologique. Cette maquette se décline en 2 gammes (basic et advanced), avec, pour chacune, 2 modèles (Middle-Ear et Inner-Ear), adaptés aux différentes étapes de l'apprentissage chirurgical, ce qui rend accessible l'apprentissage de la chirurgie otologique dès le début de l'Internat. Elle permet ainsi l'acquisition par les Internes, des connaissances et compétences technique de base en chirurgie otologique, facilitant ainsi le transfert des acquisitions initiales sur les pièces anatomiques, plus coûteuses et plus difficiles d'accès. Plusieurs voies de recherche sont en cours au sein de l'Hôpital Virtuel de Lorraine pour évaluer l'intérêt de ces dispositifs de formation innovante.

En effet, avant d'être intégré dans un programme d'entraînement ou de formation, les dispositifs de simulation doivent être validés en tant qu'outils pédagogiques. Ainsi, une étude récente de l'équipe nancéenne a évalué la validité de surface, de contenu et de construction du simulateur VoxelMan (Varoquier et al., 2017).





Session de serious game en cours



Après le serious game

Cette étude a mis en évidence que bien que certaines caractéristiques du simulateur nécessitent des améliorations, ce dispositif représentait un outil pédagogique intéressant et novateur, complémentaire aux méthodes d'apprentissage traditionnelles. Concernant la validation de la maquette d'os temporal en tant qu'outils pédagogique, il convient de s'assurer d'une part de la capacité de la maquette à générer pour le chirurgien un ressenti proche de celui observé lors du fraisage de l'os temporal réel (c'est-à-dire l'usabilité). D'autre part, il convient de s'assurer que le procédé de fabrication permet de reproduire avec une fidélité et une résolution suffisantes, l'anatomie de l'os temporal normal, cette région anatomique étant particulièrement complexe.

Ces travaux de validation de l'usabilité et l'anatomie de la maquette d'os temporal nancéenne sont en cours et s'appuie sur une collaboration avec Mme Anne-Sophie BONNET, Mr Gaël LECOZ et Mr Cédric LAURENT du laboratoire de recherche LEM3 (Laboratoire d'Etude des Microstructures et de Mécaniques des Matériaux (LEM3-UMR CNRS 7239).

Enfin, au sein des centres lorrains de formation en audioprothèse et en orthophonie, dans un souci de mutualisation de l'effort de recherche et de l'enseignement, le Pr. C. Parietti-Winkler a conçu « un serious games » (jeu sérieux) dédié à l'audiologie.

Comme tout « serious game », ce nouveau dispositif de formation combine une intention pédagogique « sérieuse » avec des ressorts ludiques, dépassant ainsi la seule dimension du divertissement. Inspiré d'un jeu de plateau très célèbre et adapté à la thématique

de l'audiologie, il permet une mobilisation et une restitution des connaissances mémorisées à la suite de cours magistraux transmissifs dans la discipline audiolinguistique, en mettant en œuvre des processus cognitifs d'apprentissages plus complexes que ceux mobilisés lors de la seule mémorisation des connaissances socles. Les modalités choisies dans le « game designed » de cette activité pédagogique active et innovante permettent un apprentissage à la fois coopératif et collaboratif, la participation d'un grand nombre d'étudiants (contrairement à la plupart de serious games, en particulier numériques), et un interfaçage des futurs professionnels de santé de disciplines différentes mais intervenant tous dans le domaine de l'audiologie, promouvant ainsi l'échange et la communication de ces disciplines cliniques connexes.

Favorisant les savoirs et le savoir-être, il s'intègre parfaitement dans une approche par compétences intégrées de l'enseignement en audiologie. Déployé pour la première fois à Nancy en janvier 2018 sous la forme d'un « challenge inter-écoles », en collaboration avec le Pr Ducourneau, ce dispositif de formation a réuni 85 étudiants en audioprothèse (première et troisième année) et en orthophonie (niveau L2) des centres de formations lorrains. Une évaluation de ce dispositif en tant qu'outils pédagogique est en cours. Cette initiative, plébiscitée par les étudiants, va être reconduite et constitue la première étape d'une mutualisation des enseignements entre les centres de formation en audioprothèse et en orthophonie en Lorraine.