

<b>AAPG2024</b>	<b>PROPENSON</b>	PRME
Coordonné par :	Jean-Dominique POLACK	42 mois
B.4 : Sciences de l'ingénierie et des procédés		

## Propagation de l'énergie sonore

Depuis plus de 10 ans, Jean-Dominique Polack poursuit avec ses doctorants successifs un projet de simulation acoustique des salles directement en énergie, sans passer par le calcul préalable de la pression et de la vitesse particulière. C'est que les fréquences de modulation, qui composent le spectre énergétique, ne dépassent pas 100 Hz [1], à comparer à une bande passante de 20 kHz requise pour la simulation totale de la bande sonore audible par l'homme ; et même si la simulation doit s'effectuer bande de fréquences par bande de fréquences, leur nombre ne dépasse pas quelques dizaines, par exemple 30 dans le cas de tiers d'octave. De plus, c'est essentiellement le même modèle numérique qui est utilisé pour simuler en pression et vitesse particulière la bande la plus grave, et en énergie les autres bandes.

Malgré quelques succès initiaux [2], l'idée a vite atteint ses limites lors du passage à 3 dimensions d'espace. En effet, le nombre d'équations de conservation étant inférieur au nombre d'inconnues, des lois de comportement sont nécessaires pour fermer les équations et les résoudre. C'est ainsi qu'une hypothèse de champ diffus a été retenue dans [2], alors même que le modèle avait été développé dans l'espoir de comprendre le passage d'un champ acoustique cohérent, dominé par une source sonore et ses premières réflexions, à un champ acoustique diffus dominé par la réverbération. Le verrou a sauté cet été lorsque Zuyuan Song, étudiant de M1 en Acoustique à Sorbonne Université, a appliqué le premier théorème de Noether dans son intégralité à l'équation des ondes. S'appuyant sur la littérature [3], il a écrit précisément dans son mémoire de M1 [4] les groupes de symétrie du champ de vecteur pour lesquels l'équation des ondes est invariante, et construit pour chacun d'entre eux la quantité quadratique conservée. Ainsi, à 2 dimensions d'espace, il existe :

- 3 symétries de translation, selon le temps  $t$  et les 2 variables d'espace  $x$  et  $y$  ;
- 1 symétrie de dilatation ;
- 3 symétries de rotation, autour de chacun des 3 axes ;
- et 3 inversions

soient 10 groupes de symétries. Or, en prenant en compte le potentiel des vitesses dans le décompte des grandeurs quadratiques, c'est bien 10 inconnues qu'il s'agit de calculer. Le nombre d'équation de conservation est alors égal au nombre d'inconnues.

Ce décompte s'étend aisément à 3 dimensions d'espace, où l'on obtient 15 équations à 15 inconnues.

### I. Contexte, positionnement et objectif(s) de la pré-proposition

L'*objectif* du projet est de développer une méthode générale de simulation de la propagation de l'énergie sonore dans l'espace en acoustique linéaire, que l'espace soit clos (acoustique des salles) ou semi clos (propagation au dessus d'une impédance finie), quelques soient les caractéristiques du milieu décrit par un tenseur pseudo-métrique. Ce dernier est diagonal – métrique de Minkowski, correspondant à un espace-temps pseudo-Euclidien, comme dans les salles – ou plus généralement pseudo-Riemannien, comme dans le cas de la propagation sous-marine. Le présent projet se restreint aux deux premiers cas.

Le projet se base sur la conservation du tenseur énergie-impulsion, dont la covariance est nulle en acoustique linéaire, comme l'ont initialement prouvé P.M. Morse, Feshbach, et K.U. Ingard [5,6].

*Etat de l'art* : Il existe aujourd'hui de nombreuses méthodes de simulation du champ sonore dans les salles, qui toute se basent sur des approximations. Elles se répartissent en deux grandes catégories :

- les *méthodes géométriques*, telles que tir de rayons, associés ou non à la recherche de sources images, calculent la décroissance du son le long de rayons sonores à l'aide du coefficient de réflexion de chaque paroi. Calquées sur les méthodes de simulation visuelles, mais ayant besoin de tenir compte d'un grand nombre de réflexions successives des rayons sur les parois pour tenir

<b>AAPG2024</b>	<b>PROPENSON</b>	PRME
Coordonné par :	Jean-Dominique POLACK	42 mois
B.4 : Sciences de l'ingénierie et des procédés		

compte des particularités acoustiques, ces méthodes négligent toute interférence entre rayons sonores, ou même au niveau des parois. De même, malgré quelques tentatives [Noé], ces méthodes négligent la courbure des parois, qu'elles découpent en surfaces élémentaires planes plus petites. L'art du modélisateur est de choisir correctement la taille de ces surfaces élémentaires, qui ne doivent pas être trop petites sous peine d'explosion des temps de calcul, ainsi que le nombre de rayons pour ne pas alourdir non plus le temps de calcul. Les codes de référence dans le domaine sont *Odeon* et *Catt-Acoustics* pour l'acoustique des salles [7]; et *CadnaA* et *SoundPlan* pour la propagation en extérieur [8]. Mais de nombreux autres codes existent pour la propagation extérieure.

- les *méthodes ondulatoires*, telles qu'éléments finis de volume ou de frontière, et différences finies, tiennent intrinsèquement compte des interférences entre trajets sonores proches puisqu'elles simulent l'équation des ondes. Elles exigent par contre la discrétisation de l'espace en un grand nombre d'éléments, de taille inversement proportionnelle à la fréquence maximale de calcul, et peuvent rapidement atteindre le milliard de nœuds si l'on veut monter un peu en fréquence, même dans des salles de taille moyenne (1000 m<sup>3</sup>). Quelques temps plus populaires que les éléments finis de volume (FEM) du fait de leur bien plus faible nombre de nœuds, les éléments finis de frontière (BEM) se sont avérés moins efficaces que les FEM parce que les matrices qui leur correspondent sont pleines, et non creuses ; elles gardent cependant toute leur efficacité pour l'acoustique extérieure. Plus récemment, les méthodes de différences finies, en particulier à volume finie (FVTD), ont monté leur efficacité grâce aux travaux de S. Bilbao et col. [9]. Elles sont alors capables de tenir compte d'impédances complexes sur les parois, mais pas vraiment pour l'instant de parois gauches. Il n'existe pas de code de référence en acoustique des salles pour les méthodes ondulatoires.

Face à ces deux grandes catégories, l'approche proposée est proprement innovante et révolutionnaire. Basées sur l'équation des ondes exactement comme les méthodes ondulatoires [10], l'approche par le tenseur impulsion-énergie n'est pas nouvelle [5,6], mais n'a jamais été réellement appliquée à l'acoustique, si ce n'est pas Stanzial et col. en 1992 [11], puis par notre équipe quelques 20 ans plus tard [2]. Certaines idées connexes se retrouvent également dans l'article plus récent de Stanzial et Graffigna [12], ou celui plus ancien de Mann et al. [13].

*Methodologie* : Les équations de conservation associées aux groupes de symétrie d'une équation prenant la forme de divergences [3], la méthodologie que nous proposons pour atteindre nos objectifs est une modélisation numérique par différence temporelle à volume finie (FVTD), bien adaptée à ce genre de problème. Aidan Meacham a en effet développé cette approche pour sa thèse, soutenue en déc. 2021, en s'appuyant sur les travaux de Bilbao et al. [9] pour la modélisation basse fréquence et en l'étendant au tenseur impulsion-énergie pour les autres fréquences [14]. Son code est disponible sur Github [15]. La modélisation numérique sera couplée à la mesure du champ sonore, basée sur la technique Ambisonics® et des microphones (SoundField ST250 [16], et Core Sound TetraMic [17], disponible au laboratoire. Nous envisageons également de développer nos propres capteurs, sur la base des prototypes réalisés au cours du stage de M1 de Ryan Privat (Figure 1, [18]).



**Figure 1** : Capteurs microphoniques pour la capture de la pression et la vitesse particulière  
gauche : 4 micros aux sommets d'un tétraèdre ; droite : 8 micros MEMS aux sommets d'un cube.

<b>AAPG2024</b>	<b>PROPENSON</b>	PRME
Coordonné par :	Jean-Dominique POLACK	42 mois
B.4 : Sciences de l'ingénierie et des procédés		

A noter que la dernière version, remaniée cet été, du code MIDAS [19] permet d'évaluer et visualiser les 10 composantes du tenseur impulsion-énergie [10].

Plus précisément, la modélisation numérique repose sur un maillage structuré, plus efficace pour le calcul, de type rectangulaire. Dans un deuxième temps, en fonction des nécessités, la structuration du maillage pourra être relaxée sur les parois, au niveau desquels il importe de développer des conditions limites appropriées. La voie a été montrée dans [20] pour le coefficient de diffraction sur les parois, associé à la conservation de l'intensité acoustique. Il restera à améliorer la visualisation des résultats, pour mieux comprendre les avantages et inconvénients du nouveau formalisme.

En termes d'*apport scientifique*, le projet est réellement révolutionnaire, car il fait sauter le principal verrou pour appliquer la modélisation numérique directe de l'énergie à tout un ensemble de problèmes de propagation, tels que la propagation dans les salles, la propagation au dessus d'une impédance finie, et vraisemblablement même la propagation dans les chenaux acoustiques sous-marin, le tout pour un coût de calcul réduit puisqu'il augmente linéairement avec la fréquence, par l'ajout de nouvelles bandes, et non avec le cube de la fréquence ou le cube du temps comme les méthodes actuelles.

*Positionnement :* Concernant l'acoustique, le présent projet s'inscrit pleinement dans l'axe B.4 de l'AAPG2024 (Sciences de l'Ingénierie et des procédés), dont il reprend le large spectre d'approches scientifiques : de la modélisation et simulation à l'expérimentation, pour profiter du couplage des deux approches. Il fait également appel au traitement du signal pour toute la partie analyse des signaux issus des capteurs.

## II. Partenariat (consortium ou équipe)

*Jean-Dominique Polack*, Professeur d'Acoustique à l'**Institut Jean Le Rond D'Alembert (Sorbonne Université)**, possède une forte expérience du management d'équipe. Premier rédacteur en chef de la revue européenne *Acta Acustica* (1993-98), il est plus tard Directeur de l'Institut de Formation Doctorale de l'UPMC (2011-16), où il gère quelque 3000 doctorants. Ses projets de recherche récents sont le projet *DiagPart* (ADEME, 2014-17) et un projet *PHP STAR* franco-coréen (2018-19), ce dernier en tant que coordinateur français. Par le passé, il a coordonné deux projets *PREDIT* en 1998-2002 et 2003-7. Il a été membre du *GO 7* dans le programme *PREDIT 3* (2002-7), et du premier Comité Scientifique des Sciences de l'Ingénieur (ANR, CSD2) en 2005. Il consacra 80% de son temps de recherche sur le projet, qui constitue son sujet de recherche central.

Le projet s'appuie sur une thèse de doctorat (3ans), et sur plusieurs stages complémentaires d'étudiants de Master, a priori un par an. Il prend également en compte les frais liés à la participation à 2 conférences et à 3 publications en Open Access chaque année. Après vérification de leur aptitude, il est prévu la fabrication de plusieurs sondes microphoniques, ainsi que les heures de calcul.

*Zuyuan Song*, étudiant en Master 2 d'Acoustique à Sorbonne Université, est le candidat pressenti pour la thèse. En effet, son analyse de la littérature au cours de son stage M1, a mis en évidence les 10 groupes de symétrie, et les 10 équations de conservation correspondantes. Il est donc logique de lui faire profiter de sa découverte.

## III. Bibliographie

*Les auteurs en caractères gras sont impliqués dans le projet..*

- [1] **J.D. Polack**, H. Alrutz, M.R. Schroeder, The modulation transfer function and its applications to reverberation measurements, *Acustica* 55 (1984) 258-265
- [2] H. Dujourdy, B. Pialot, T. Toulemonde, **J.D. Polack**, Energetic wave equation for modelling diffuse sound fields - Application to corridors, *Acta Acustica* 103 (2017) 480-491, [hal-03002381](#); Energetic wave equation for modelling diffuse sound fields - Application to open-offices, *Wave*

<b>AAPG2024</b>	<b>PROPENSON</b>	PRME
Coordonné par :	Jean-Dominique POLACK	42 mois
B.4 : Sciences de l'ingénierie et des procédés		

- Motion 87 (2019), 193-212, hal-03002209, <https://doi.org/10.1016/j.wavemoti.2018.07.006>
- [3] P.J. Olver, *Application of Lie Groups to Differential Equations (2<sup>nd</sup> Edition)*. Springer-Verlag, 1993; pp. 247.
- [4] **Z. Song**, *Théorème de Noether et Diffraction acoustique par un dièdre en géométrie de Riemann à courbure négative*, Mémoire de Master 1, Sorbonne Université, sept. 2023.
- [5] P.M. Morse, H. Feshbach, *Methods of mathematical physics*, McGraw-Hill 1953
- [6] P.M. Morse, K.U. Ingard, *Theoretical Acoustics*, McGraw-Hill, 1968
- [7] <https://odeon.dk> and <https://www.catt.se>
- [8] <https://www.datakustik.com/products/cadnaa/cadnaa> and <https://www.soundplan.eu/en/>
- [9] S. Bilbao, B. Hamilton, J. Botts, L. Savioja, Finite Volume Time Domain Room Acoustics Simulation under General Impedance Boundary Conditions, IEEE Trans. ALSP 24(1) (2016) 161–173.
- [10] **J.D. Polack**, Energy relationships in enclosures, Proc. Forum Acusticum 2023, Turin.
- [11] D. Stanzial, D. Bonzi, G. Schiffrer, Four-dimensional treatment of linear acoustic fields and radiation pressure, *Acta Ac. u. Acustica* 88 (1992) 213–224.
- [12] D. Stanzial, C.E. Graffigna, “On the general connection between wave impedance and complex sound intensity”, Proc. Mtgs. Acoust. 30 (2017) 055013; doi: 10.1121/2.0000797
- [13] J.A. Mann, J. Tichy, and A.J. Romano, Instantaneous and time-averaged energy transfer in acoustic fields, *J. Acoust. Soc. Am.* 82(1) (1987) 17–30.
- [14] A. Meacham, R. Badeau, **J.D. Polack**, Auralization of a hybrid sound field using an energy-stress tensor based model, Forum Acusticum 2020, paper 833
- [15] [https://github.com/1ceaham/AcousticFVTD\\_GeneralImpedance/](https://github.com/1ceaham/AcousticFVTD_GeneralImpedance/)
- [16] <https://www.soundonsound.com/reviews/soundfield-st250>
- [17] <https://www.core-sound.com/products/tetramic>
- [18] R. Privat, Mesure in situ des coefficients d'absorption et diffraction avec une sonde à 4 microphones, Mémoire de Master 1, Sorbonne Université, sept. 2021.
- [19] **J.D. Polack**, A.H. Marshall, G. Dodd, Digital evaluation of the acoustics of small models: the MIDAS package, *J. Acoust. Soc. Am.* 85 (1989) 185–193.
- [20] **J.D. Polack**, A. Meacham, R. Badeau, The absorptive nature of the scattering coefficient in the stress-energy tensor formalism for room acoustics, ICA 2022, paper 382

<b>AAPG2024</b>	<b>PROPENSON</b>	PRME
Coordonné par :	Jean-Dominique POLACK	42 mois
B.4 : Sciences de l'ingénierie et des procédés		

**Un dépôt réussi ne renvoie pas uniquement à la rédaction d'un document scientifique clair, mais aussi à une complétion anticipée et cohérente du site de dépôt « [IRIS](#) ». Merci de vérifier, entre autres, les points suivants :**

- L'instrument de financement indiqué en en-tête de mon document scientifique est-il conforme à celui sélectionné sur le site de dépôt ?
- L'axe scientifique indiqué en en-tête de mon document scientifique est-il conforme à celui sélectionné sur le site de dépôt ?

**Les informations saisies en ligne prévalent sur celles développées au sein du document scientifique si ces deux sources d'informations s'avéraient non-concordantes, y compris si mal renseignées ou manquantes.**

- Le titre en français/anglais de mon projet est-il bien indiqué dans le champ dédié ? Idem concernant le résumé en français/anglais de mon projet ?
- Le titre ou le résumé de mon projet ne comprennent-ils aucune information qui pourrait entraver le dépôt ultérieur d'un brevet ?
- Le partenariat développé dans le document scientifique est-il conforme au partenariat renseigné sur le site de dépôt [IRIS](#) : identité du coordinateur ou coordinatrice, du ou de la responsable scientifique de chaque partenaire, des membres participants aux projets, y compris étranger.e.s dans le cadre d'un projet PRCI ?
- Dans le cadre de l'instrument PRME, ai-je bien les 1.5 ETPR (Emploi Temps Plein Recherche) attendus ?
- Ai-je bien signifié sur le site de dépôt mon intérêt pour un cofinancement, une labélisation par un ou des pôles de compétitivité, une OSI ou une IR\* ?
- Le formulaire en ligne est-il bien complet à date et heure de clôture ?
- Mon document scientifique respecte-t-il la limite des 4 pages autorisées ? Est-il bien au format pdf ? Répond-il aux attendus des critères d'évaluation applicables en étape 1 ? Ai-je bien téléversé la dernière version du document scientifique sur [IRIS](#) ?

**Aucune modification en pourra être apportée au document scientifique tel que déposé à date et heure de clôture sur le site de dépôt [IRIS](#)**

- Ai-je bien anticipé la rédaction de mon projet en me rapprochant du / de la FSD (Fonctionnaire Sécurité Défense) de mon établissement afin de vérifier l'éligibilité de mon projet au regard de la PPST (Protection du Potentiel Scientifique et Technique, cf. §D.6 du [texte de l'AAPG2024](#)) appliquée par l'ANR ?
- Les CV du coordinateur ou de la coordinatrice et du ou de la responsable scientifique de chaque partenaire, y compris étranger.e dans le cadre d'un enregistrement d'un projet PRCI, sont-ils bien complétés sur [IRIS](#) à date et heure de clôture ?

**Il est de la responsabilité du coordinateur ou de la coordinatrice de s'assurer de la bonne complétion des CV sur le site [IRIS](#) à date et heure de clôture. Attention : chaque CV doit être complété par chaque partenaire, en utilisant la même adresse courriel pour se connecter que celle utilisée pour renseigner la personne concernée dans le partenariat.**

- Dans le cadre d'un projet PRCI : mes partenaires étrangers ont-ils accompli les éventuelles démarches nécessaires auprès de l'agence de financement étrangère ? (cf. annexes dédiées aux collaborations bilatérales PRCI à venir sur la [page Web de l'AAPG2024](#)).