

# Simulation aéroacoustique des aérateurs de ventilation automobile

**Jean-Luc Adam, Denis Ricot,  
Flavien Dubief**  
Renault SAS  
1 avenue du golf  
78288 Guyancourt,  
E-mail : jean-luc.adam@renault.com

**Christine Guy**  
Ligeron  
Les Algorithmes Bâtiment Euclide  
91194 Saint Aubin

## Résumé

Cette étude aborde la simulation numérique du comportement aéroacoustique des aérateurs de ventilation automobile. Les simulations ont été réalisées avec le logiciel de mécanique des fluides instationnaire PowerFLOW basé sur une méthode numérique particulière appelée «Boltzmann sur réseau». La faible dissipation de ce schéma numérique original permet, en effet, de simuler directement les sources aéroacoustiques générées par les fluctuations turbulentes de l'écoulement et de les propager dans le même calcul. Les simulations réalisées sur des aérateurs sont donc présentées et comparées à des résultats expérimentaux obtenus dans le cadre d'un plan d'expériences. Ce dernier est basé sur une géométrie d'aérateur simplifié dont on fait varier certains paramètres caractéristiques (nombre et profondeur des ailettes, écartement des rangs d'ailettes ...) pour obtenir 18 configurations différentes. Toutes les géométries ont été simulées avec PowerFLOW et mesurées sur un banc d'essais conçu à la Direction de la Recherche de Renault. Cette diversité de cas testés a permis d'avoir une idée précise de la capacité de PowerFLOW à simuler correctement la génération de sources aéroacoustiques et leur propagation.

## Abstract

In this work we have numerically studied aeroacoustics of automotive ventilation outlets. Simulations are performed with PowerFLOW CFD software based on Lattice Boltzmann method (LBM). Low dissipative LBM scheme lets to compute aeroacoustic sources generated by turbulence fluctuations and to propagate them in the same simulation. In the first step we validate the ability of LBM for propagating acoustic waves in ducts and radiating them at open end terminations. In the second step, aeroacoustic simulations on automotive vents will be presented and compared with experimental data obtained from a DoE (Design of Experiment). The DoE is based on an idealized outlet with varying parameters (number and length of grid blades, grid spacing ...) which gives 18 distinct geometrical configurations. All these configurations have been simulated with PowerFLOW and measured with a new test facility (built in the Renault Research Department). The large number of tested geometries give a clear idea of the capability of PowerFLOW to correctly simulate the generation and propagation of aeroacoustic sources for a complex geometry. Results will be presented and discussed.

**L**es constructeurs automobiles ont fait d'importants efforts depuis de nombreuses années pour réduire les nuisances sonores dans les véhicules. La réduction du niveau de bruit global dans l'habitacle a ainsi fait émerger, plus récemment, certaines sources «secondaires» comme les bruits parasites de carrosserie ou, ce qui nous intéresse directement ici, le bruit du système de ventilation. Renault a ainsi investi de façon importante ces dernières années pour mieux comprendre les mécanismes de ce bruit et pour améliorer la performance de ces systèmes.

Dans le système de ventilation d'un véhicule, la source de bruit dominante reste le ventilateur. Néanmoins, la performance acoustique de cet élément augmentant, des sources secondaires commencent à émerger. C'est le cas des conduits et des aérateurs dans lesquels se développent des écoulements turbulents pouvant être responsables de bruit aéroacoustique. Par conséquent,

si on veut réaliser une bonne conception acoustique du système de ventilation, il devient nécessaire de prendre en compte chacun des sous-systèmes qui le compose et notamment les conduits et les aérateurs.

Les aérateurs sont des éléments géométriquement assez compliqués qui nécessitent divers mécanismes (molette, grilles d'orientation) leur permettant de réaliser leur fonction qui est d'orienter l'écoulement, au débit souhaité, vers les occupants du véhicule. Ces mécanismes, et leur couplage, sont les principaux responsables du bruit d'origine aéroacoustique qui est généré. On peut caractériser de façon expérimentale ces aérateurs et obtenir un niveau global de bruit émis. Toutefois, il est plus difficile d'arriver à analyser plus précisément l'origine du bruit, même avec des moyens de mesure complexes. Par ailleurs, le processus de conception étant de plus en plus basé sur la simulation numérique, la mise au point

expérimentale devient moins accessible. Nous avons donc concentré nos efforts sur la recherche d'outils permettant de caractériser numériquement le comportement acoustique des aérateurs automobiles.

Une précédente étude [1] a tenté d'obtenir des expressions analytiques du bruit des aérateurs à partir de la théorie de Nelson et Morfey [2]. En dépit de l'intérêt de cette démarche, cette formulation théorique est difficilement généralisable et applicable à des géométries très diverses. Parallèlement, au cours des dernières décennies, la croissance exponentielle de la puissance des ordinateurs a rendu possible l'utilisation de la simulation numérique en mécanique des fluides (ou CFD pour Computational Fluid Dynamics) dans le monde industriel. La CFD a d'abord été limitée à des calculs stationnaires (simulation des grandeurs moyennes de l'écoulement uniquement) ce qui n'est pas suffisant pour résoudre des problèmes d'aéroacoustique. Mais depuis le début des années 2000, certains éditeurs de logiciels de mécanique des fluides proposent enfin des codes de calcul instationnaires qui autorisent des applications aéroacoustiques en donnant accès à l'évolution temporelle des variables de l'écoulement (pression et vitesse notamment). Parmi ces éditeurs, la société EXA Corp. propose le logiciel PowerFLOW basé sur un schéma numérique particulier appelé «Boltzmann sur réseau» ou LBM (pour «Lattice-Boltzmann Method»). Ce schéma résout une autre équation que celle de Navier-Stokes même si, bien sûr, les formulations sont équivalentes. Avec PowerFLOW, la société EXA est ainsi devenue un acteur majeur sur le marché de la CFD, en particulier dans l'industrie automobile. La capacité de ce code à simuler les champs aérodynamiques instationnaires et à propager les ondes acoustiques [3] en fait effectivement un bon candidat pour les problématiques d'aéroacoustique.

Dans cet article, on présente donc un exemple d'application de la LBM pour la caractérisation des aérateurs de ventilation automobile. On valide d'abord la capacité de PowerFLOW à propager des ondes acoustiques guidées puis on montre que l'on peut réaliser, en une seule simulation, la génération et la propagation des sources aéroacoustiques dans un aérateur. A noter qu'un des points clés de ce travail est le nombre important de configurations géométriques qui ont été simulées, et mesurées, dans le cadre d'un double plan d'expériences numérique et expérimental.

### Propagation acoustique avec la LBM

L'objet de cette courte présentation n'est pas d'apporter une démonstration rigoureuse de la capacité de PowerFLOW, et donc de la LBM, à propager correctement les ondes acoustiques. Pour un point de vue plus théorique, on pourra se référer, par exemple, aux travaux réalisés à la Direction de la Recherche de Renault [3,4,5].

Dans ce paragraphe, on valide donc, au travers de deux exemples, qu'il est possible de faire propager une onde acoustique dans un conduit et de la faire diffracter à l'extrémité ouverte de celui-ci. Les exemples choisis sont un conduit circulaire non bafflé et un aérateur simplifié. Le

principe de mise en données des cas est assez simple, elle est présentée en figure 1. Il n'y a pas d'écoulement. Le conduit circulaire et l'aérateur sont simplement excités, en amont, par une onde acoustique incidente et on évalue l'onde acoustique réfléchie sur la terminaison. Le taux de réflexion peut alors être caractérisé par le coefficient de réflexion adimensionnel suivant :

$$R = \frac{P_{reflected}}{P_{incoming}} \quad (1)$$

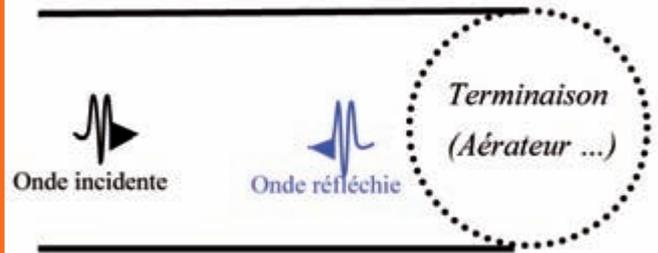


Fig. 1 : Principe de l'étude acoustique  
Acoustic validation principle

### Conduit circulaire non bafflé

La géométrie étudiée dans cette partie est un conduit circulaire de 50 mm de diamètre et de 300 mm de longueur. La source d'excitation en amont est un bruit blanc. Ce cas est intéressant car on trouve dans la littérature [6] des expressions analytiques approximant la valeur du coefficient de réflexion. On constate en figures 2 et 3 que les résultats obtenus avec PowerFLOW sont en bon accord avec la théorie. Pour l'amplitude, la différence est inférieure à 1 dB. Concernant la phase, elle est du même ordre de grandeur que ce que nous avons pu obtenir expérimentalement.

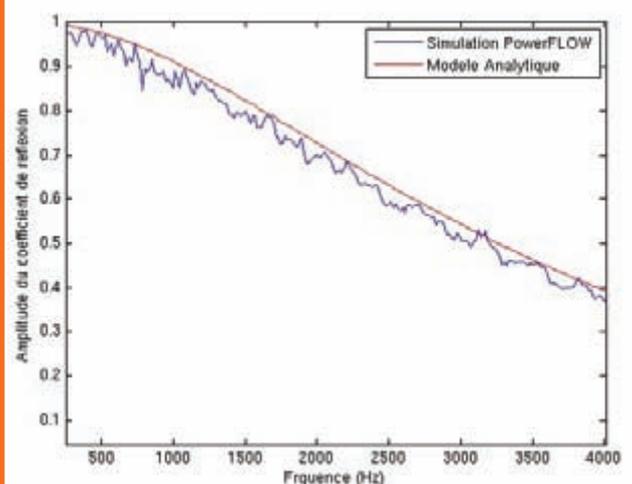
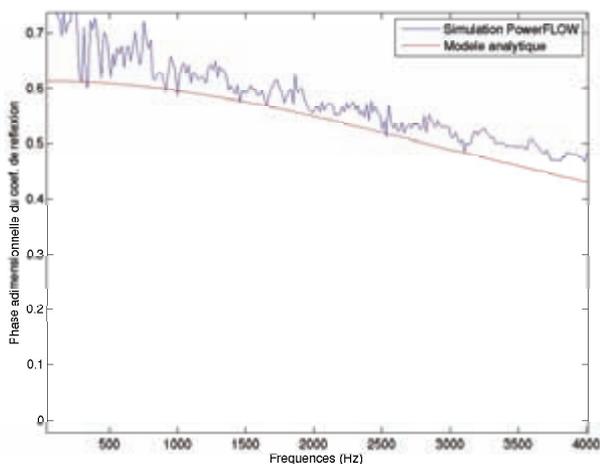


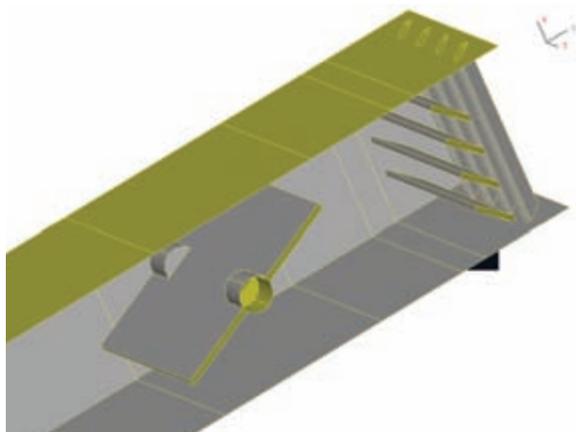
Fig. 2 : Amplitude du coefficient de réflexion d'un conduit circulaire non bafflé (en rouge valeur théorique, en bleu résultat obtenu avec PowerFLOW)  
Reflection coefficient magnitude of a circular unflanged pipe (red curve is theory, blue curve is PowerFLOW simulation)



**Fig. 3 : Phase du coefficient de réflexion d'un conduit circulaire non bafflé (en rouge valeur théorique, en bleu résultat obtenu avec PowerFLOW)**  
Reflection coefficient phase of a circular unflanged pipe (red curve is theory, blue curve is PowerFLOW simulation)

### Aérateur simplifié

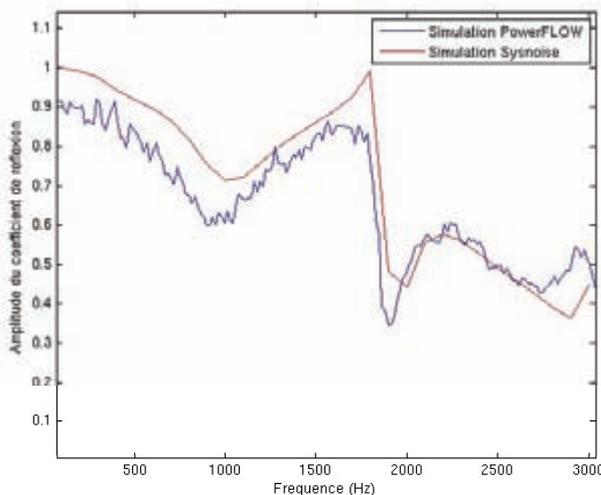
Comme indiqué en introduction, le plan d'expériences a été réalisé sur une géométrie simplifiée d'aérateur de ventilation automobile (figure 4). Il était par conséquent important de s'assurer que PowerFLOW était capable de simuler un champ acoustique se propageant dans un environnement complexe.



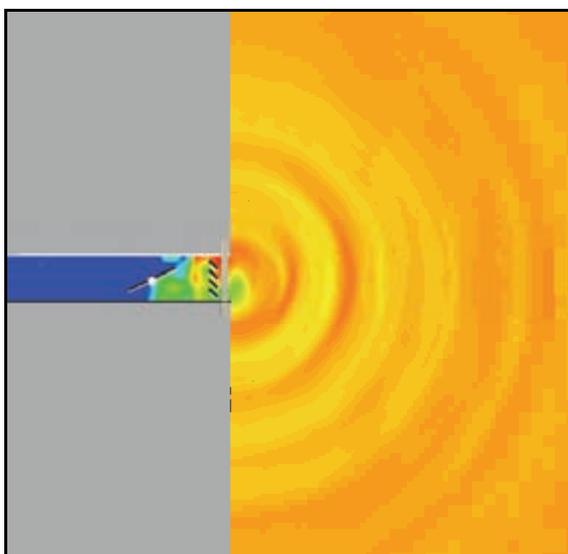
**Fig. 4 : Aérateur simplifié**  
Simplified automotive vent

La figure 5 présente le coefficient de réflexion calculé avec PowerFLOW et celui qui est obtenu en utilisant le code de calcul spécialisé en acoustique SYSNOISE (en formulation BEM). Il faut préciser ici que l'utilisation de SYSNOISE pour ce type de calcul a été validée dans le cadre d'une précédente étude menée chez Renault. Comme on le constate sur cette figure, la simulation LBM avec PowerFLOW donne une évaluation précise du coefficient de réflexion malgré la complexité de la configuration. En particulier, on retrouve bien le pic de réflexion autour de 1 500 Hz lié à l'inclinaison du clapet venant obstruer partiellement le conduit. La différence entre les résultats fournis par SYSNOISE et ceux de

PowerFLOW est inférieure à 1,5 dB, ce qui peut être considéré comme une bonne approximation. Enfin, en figure 6, on peut observer le champ acoustique à l'intérieur du conduit et sa partie diffractée par l'aérateur. Comme attendu, on constate, qualitativement, le rayonnement omnidirectionnel de l'énergie acoustique à l'extérieur du conduit.



**Fig. 5 : Amplitude du coefficient de réflexion d'un aérateur simplifié (en rouge valeur théorique, en bleu résultat obtenu avec PowerFLOW)**  
Reflection coefficient magnitude of a simplified vent (red curve is theory, blue curve is PowerFLOW simulation)



**Fig. 6 : Pression acoustique instantanée dans l'aérateur simplifié (attention, les échelles sont différentes entre l'intérieur et l'extérieur du conduit)**  
Instantaneous acoustic field through the simplified vent (two different scales inside and outside the duct)

## Montage expérimental

### Introduction

Les données expérimentales nécessaires à la validation des résultats numériques ont été obtenues sur un nouveau banc d'essais conçu à la Direction de la Recherche de

Renault. Il faut souligner ici que ce banc a été réalisé par les personnes (les auteurs de cet article) qui ont effectué les simulations numériques. Réaliser la mesure expérimentale permet, et nécessite, d'avoir une meilleure compréhension de la physique du problème.

### Le banc d'essai

Il s'agit d'un banc de mesure classique pour l'acoustique en conduit. L'écoulement est généré par un ventilateur. Il est ensuite rendu «silencieux» en passant à travers un caisson traité acoustiquement. En sortie de ce caisson, on fixe un conduit à l'extrémité duquel est monté l'aérateur. Des salles couplées permettent d'isoler d'un côté (Figure 7) le ventilateur et le caisson qui sont sources de bruit, et de l'autre côté (Figure 8) l'aérateur à étudier. Dans cette configuration, on peut alors mesurer dans de bonnes conditions le rayonnement acoustique de l'aérateur.



**Fig. 7 :** Le ventilateur et le caisson absorbant fournissant l'écoulement silencieux sont isolés dans une salle séparée  
Blower and expansion chamber generating the quiet flow isolated in a separated room

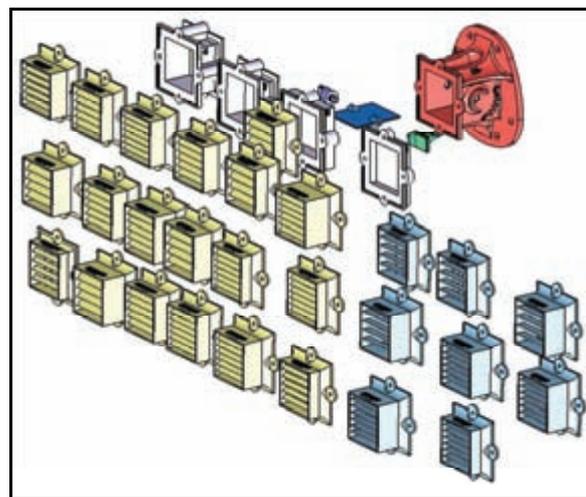


**Fig. 8 :** L'aérateur est placé dans une salle traitée acoustiquement  
Duct termination with automotive outlet connected to the blower but placed in an acoustically treated room

### Le plan d'expériences

L'objectif du plan d'expériences était d'identifier les principaux paramètres géométriques responsables

de l'émission aéroacoustique et de la perte de charge de l'aérateur. Sept paramètres de conception ont été sélectionnés (nombre et largeur des ailettes de grilles, écartement ...), chaque paramètre pouvant prendre 3 valeurs différentes. Un plan orthogonal de Taguchi à 18 essais (Figure 9) a été mis en œuvre. Il a permis d'obtenir l'influence linéaire de chaque «facteur» (les paramètres de conception) sur les «réponses» (le niveau de bruit et la perte de charge).



**Fig. 9 :** Les 18 configurations géométriques du plan d'expériences  
18 geometrical configurations for the DoE

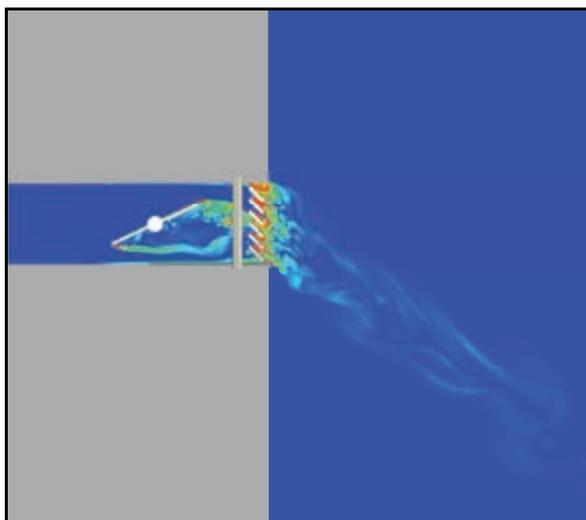
On notera que pour assurer une parfaite correspondance des géométries entre mesure expérimentale et simulation numérique, les pièces physiques ont été obtenues par frittage de poudre à partir des géométries numériques dessinées sous CATIA (Figure 9).

Dans cet article, on ne présente que quelques comparaisons calcul/mesure pour les configurations géométriques les plus représentatives. Ces exemples sont suffisants pour donner un bon aperçu des capacités de la LBM à traiter des problèmes complexes d'aéroacoustique. L'analyse statistique complète des plans expérimentaux et numériques a, bien entendu, été réalisée, mais elle n'est pas exposée ici.

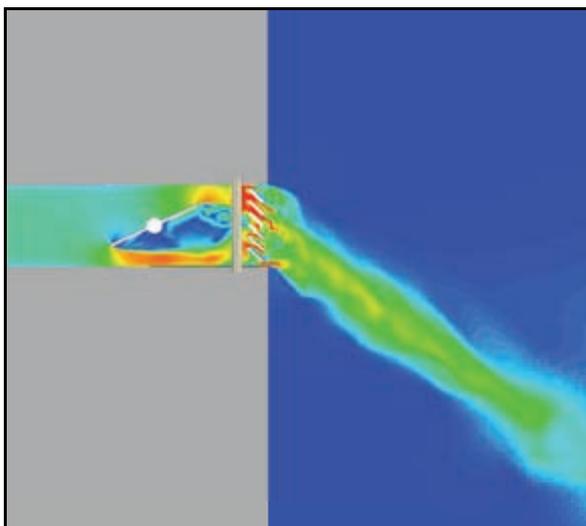
### Résultats aéroacoustiques numériques

Ce paragraphe présente une brève synthèse des résultats obtenus. On présente successivement le bruit d'origine aéroacoustique mesuré en amont (dans le conduit) et en aval (dans la salle calme).

Il est important de souligner que les courbes expérimentales et numériques montrées ici sont des densités spectrales de puissance. Il s'agit donc de spectres en bandes fines et non pas de spectres en tiers d'octave. Les spectres des simulations numériques présentent une résolution assez faible car les signaux numériques, pour des raisons de temps de calcul, sont de durée beaucoup plus courte que celle des signaux mesurés.



**Fig. 10 : Emission aéroacoustique en amont de l'aérateur pour une configuration géométrique (en bleu la mesure expérimentale, en vert la simulation PowerFLOW)**  
Aeroacoustic upstream source term for one configuration (experimental is blue curve, numerical is green curve)

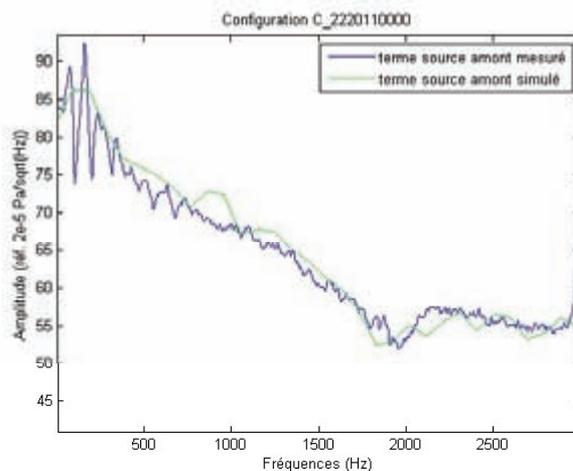


**Fig. 11 : Visualisation du champ de vorticité instantanée dans l'aérateur**  
Unsteady vorticity flow field visualization

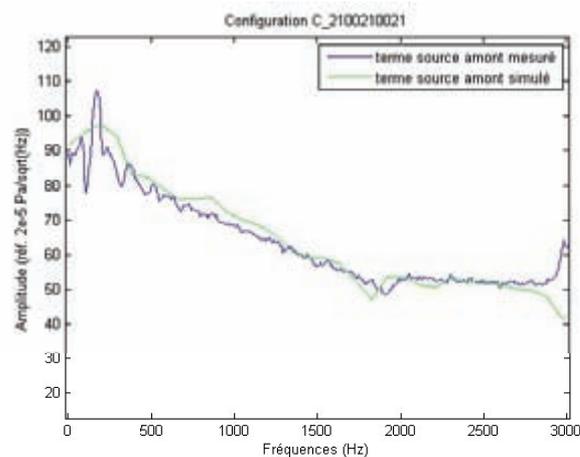
### Niveau acoustique en amont

Sur les figures 10 et 11, on peut observer les champs de vorticité et de vitesse instantanées dans la section d'un aérateur. On constate que les décollements aux extrémités inclinées du clapet et la turbulence au niveau des rangs d'ailettes sont bien captés par la simulation. Les figures 12 et 13 témoignent d'une bonne corrélation entre résultats numériques et expérimentaux sur une large plage de fréquences.

Au-delà du spectre large bande, on a remarqué, pour certaines configurations, la présence d'un sifflement (autour de 200 Hz). Ce sifflement est lié à un couplage aéroacoustique entre le clapet et les grilles d'ailettes. Ce résultat, d'abord identifié expérimentalement, a été retrouvé, sans modification du maillage et de la mise en données, avec les simulations numériques.



**Fig. 12 : Emission aéroacoustique en amont de l'aérateur pour une configuration géométrique (en bleu la mesure expérimentale, en vert la simulation PowerFLOW)**  
Aeroacoustic upstream source term for one configuration (experimental is blue curve, numerical is green curve)



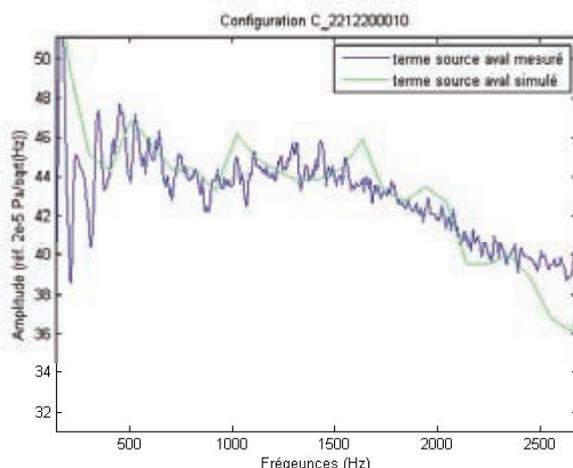
**Fig. 13 : Emission aéroacoustique en amont de l'aérateur pour une autre configuration géométrique (en bleu la mesure expérimentale, en vert la simulation PowerFLOW)**  
Aeroacoustic upstream source term for another configuration (experimental is blue curve, numerical is green curve)

### Niveau acoustique en aval

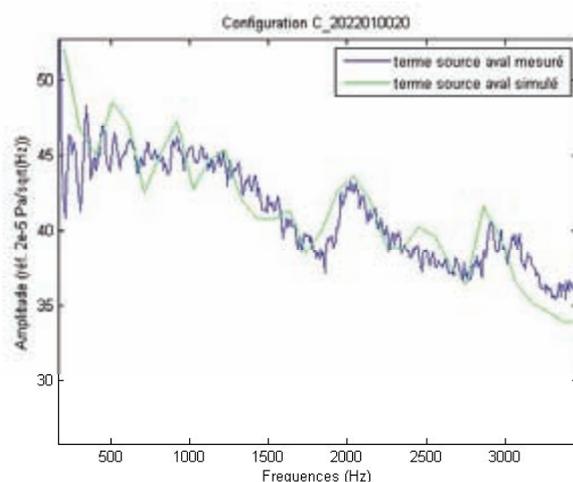
On observe là aussi une bonne corrélation entre simulation et mesure. Par rapport à la mesure en amont, les résultats en aval sont intéressants à cause des formes particulières que prennent les densités spectrales de puissance acoustique (Figures 14 et 15 page suivante). Ces formes sont liées à la réponse acoustique de l'aérateur lorsque le clapet est incliné, comme évoqué au paragraphe page X. Le fait de retrouver, par la simulation, ce comportement non-trivial de l'aérateur est une preuve particulièrement convaincante des capacités aéroacoustiques de PowerFLOW et, plus largement, de la méthode Boltzmann sur réseau (voir fig. 14 et 15).

### Limitations identifiées

Pour certaines configurations, les résultats numériques et expérimentaux ne corrèlent bien que jusqu'à une



**Fig. 14 : Emission aéroacoustique en aval de l'aérateur pour une configuration géométrique (en bleu la mesure expérimentale, en vert la simulation PowerFLOW)**  
Aeroacoustic downstream source term for one configuration (experimental is blue curve, numerical is green curve)

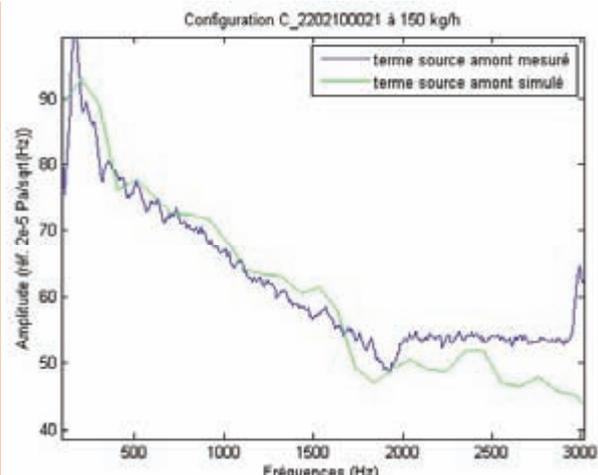


**Fig. 15 : Emission aéroacoustique en aval de l'aérateur pour une autre configuration géométrique (en bleu la mesure expérimentale, en vert la simulation PowerFLOW)**  
Aeroacoustic downstream source term for another configuration (experimental is blue curve, numerical is green curve)

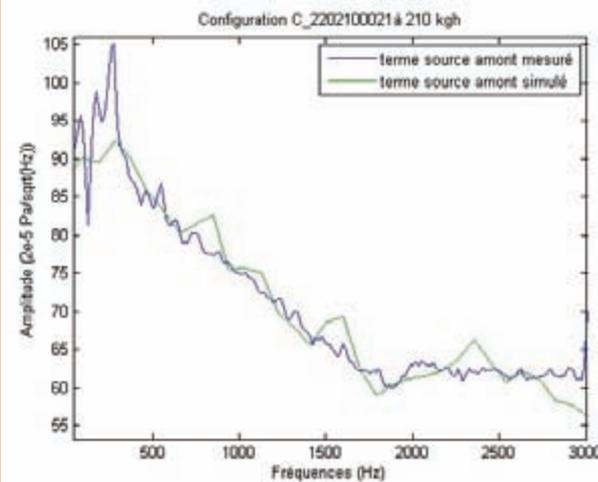
fréquence moins élevée, typiquement 2 000 Hz environ (Figure 16). On a pu mettre en évidence que cette limitation était principalement liée à un manque de raffinement du maillage. En effet, en reprenant la même simulation, avec un maillage identique mais une vitesse d'écoulement plus élevée (afin d'augmenter artificiellement la fréquence de coupure de la simulation) on retrouve une bonne corrélation entre calcul et mesure jusqu'à 3 000 Hz (Figure 17) !

## Conclusion

Cette étude a permis de montrer que la méthode Boltzmann sur réseau, et le logiciel commercial PowerFLOW qui l'implémente, sont capables de générer et de faire propager des sources aéroacoustiques pour des configurations complexes telles qu'on peut les rencontrer dans l'industrie. Pour obtenir ces résultats, les auteurs tiennent encore à souligner l'importance



**Fig. 16 : Emission aéroacoustique en amont de l'aérateur pour une configuration géométrique présentant une corrélation calcul/mesure limitée (en bleu la mesure expérimentale, en vert la simulation PowerFLOW)**  
Aeroacoustic upstream source term for one configuration with limited correlation



**Fig. 17 : Même configuration que la figure 16 mais avec une résolution plus élevée**  
Same aeroacoustic upstream source term than figure 16 but with artificially increased resolution

d'avoir réalisé eux-mêmes les simulations et les mesures expérimentales. Ce point est essentiel dans un domaine comme l'aéroacoustique qui peut s'avérer très sensible à des différences géométriques, même faibles, et aux techniques de mesures employées.

## Références bibliographiques

- [1] S. Guérin, E. Thomy, M.C.M. Wright, "Aeroacoustics of automotive vents", *Journal of Sound and Vibration* 285, 859-875 (2005)
- [2] P.A. Nelson, C.L. Morfey, "Aerodynamic sound production in low speed flow duct", *Journal of Sound and Vibration* 79, 263-289 (1981)
- [3] S. Marié, D. Ricot, P. Sagaut "Accuracy of Lattice Boltzmann Method for Aeroacoustic simulations", AIAA-paper 2007-3515 (2007)[4] S. Marié, D. Ricot, P. Sagaut, "Comparison between Lattice Boltzmann Method and Navier-Stokes high order schemes for aeroacoustics", submitted to *Journal of Comp. Physics* (2007)
- [5] D. Ricot, V. Maillard, C. Bailly, "Numerical simulation of unsteady cavity flow using Lattice Boltzmann Method", AIAA-paper 2002-2532 (2002)
- [6] A.N. Norris, I.C. Sheng, "Acoustic radiation from a circular pipe with an infinite flange", *Journal of Sound and Vibration* 135, 85-93 (1989)
- [7] M.L. Munjal, "Acoustics of ducts and mufflers", John Wiley & Sons (1987)
- [8] J. Demonsant, "Comprendre et mener des plans d'expériences", Editions AFNOR (1996)