

OPTIMUM DE DESCRIPTION VIBROACOUSTIQUE DES SOURCES ET SYSTEMES POUR LA SIMULATION DU BRUIT DE PASSAGE DES VEHICULES AUTOMOBILES

1. CONTEXTE

Le bruit extérieur des véhicules est réglementé au niveau mondial par l'ECE R51-02 (équivalent en Europe à la directive 70-157). Ce règlement évolue vers le R51-03, publié en mai 2014 et applicable en 2016. Cela se traduira tant par un changement de procédure afin de déterminer les niveaux de bruit, que par une diminution drastique des niveaux sonores tolérés : passage en 3 étapes de 74 dBA actuellement, à 68 dBA en 2024, l'écart de méthode contribuant pour 2 dBA en moyenne. Les monitorings (mesures conjointes suivant les deux règlements, réalisées dans un cadre officiel) ont montrés que 97% des véhicules français actuels ne respectaient pas les 68 dBA à terme du futur règlement [1], [2].

Dans le même temps, la pression concurrentielle impose aux constructeurs des temps de développement plus courts et des coûts plus faibles, tant pour les solutions mise en œuvre concrètement dans les véhicules, que pour les études, pour lesquelles de nouveaux outils s'imposent [2,3]. Pour maintenir sa compétitivité, Renault a modifié ses processus de R&D, notamment en accroissant le nombre et la qualité des simulations numériques et en diminuant le nombre et la durée des essais de validation.

Renault dispose pour la prévision du bruit extérieur, de modèles dans lesquels une trame théorique globale permet d'associer les différentes « maillons », c'est-à-dire les caractéristiques acoustiques des divers sous-systèmes du véhicule qui contribuent au niveau sonore extérieur [4-6]. Les différents éléments de cette chaîne vibro-acoustique se répartissent, d'une part, en sources ou chargements (moteur, admission, échappement, pneumatique) et, d'autre part, en transferts, qui représentent l'isolation et/ou la propagation (parois du compartiment moteur, ouvertures, matériaux absorbants, écrans isolants).

Les inconvénients de ces modèles sont leur précision encore insuffisante en regard des contraintes des développements des projets, qui nécessiteraient de pouvoir remplacer complètement les essais par la simulation ; leur manque d'ouverture sur les méthodes et logiciels d'optimisation globale ; leur représentativité insuffisante et leur faible souplesse de simulation vis-à-vis des itérations en boucle courte demandées en avant-projet.

L'objectif de la thèse proposée vise à traiter ces inconvénients, qui sont en partie liés à la relative simplicité de la trame théorique globale, ainsi qu'au choix, nécessaire mais figé, des finesses de description fréquentielle et géométrique. Une démarche simple pourrait être d'accroître le nombre de paramètres de ces modèles, mais l'on sait que généralement l'erreur de prévision, si elle diminue dans un premier temps, augmente au contraire au-delà d'un certain seuil quand on augmente le nombre de paramètres. Le travail proposé consistera donc à aborder ces améliorations sous l'angle du compromis entre la robustesse et la précision de ces modèles, à identifier les différentes causes de variabilité et d'incertitudes (liées aux données d'entrées, aux modèles, etc.) et à appréhender la façon dont elles se propagent et impactent le résultat final. Ceci permettra de dégager des règles de construction de modèles industriellement optimaux pour la simulation du bruit extérieur des véhicules.

2. OBJECTIFS

Le sujet de thèse consiste précisément à développer une aide à la modélisation totale du bruit au passage d'un véhicule à 7.5 m, comme le préconisent les essais réglementaires. La stratégie doit pouvoir prendre en compte les phénomènes physiques essentiels, la description des données pertinentes et la sensibilité aux incertitudes sur les données et sur les modèles utilisés. Le travail de thèse se focalisera dans un premier temps sur le bruit issu du moteur thermique, source majoritaire pour une vitesse de véhicule entre 0 et 50 km/h. Ce problème se divise en trois parties : (1) la vibration de l'enveloppe du moteur, (2) le rayonnement sous capot et (3) la propagation acoustique externe au véhicule par voies solidienne (à travers la structure) ou aérienne (par réflexion sous le véhicule). Dans chaque partie, plusieurs types de modèles acoustiques ou vibro-acoustiques peuvent être entrepris selon les gammes de fréquence d'étude et selon la compatibilité des données échangées entre chaque modèle. Le choix d'un type de modèle implique donc une physique adéquate, une interopérabilité et le type de données utilisées (pressions, vitesses, énergies, densités spectrales de puissance, 1/3 octave, etc.). Les paramètres influents sur le résultat devront aussi être identifiés, ainsi que les erreurs liées aux incertitudes sur leurs valeurs. On se focalisera par exemple aux conditions thermiques, à l'absorption acoustique du sol, aux effets géométriques, etc. Après une étude complète sur la source moteur, on pourra étendre la méthodologie aux autres contributions. (échappement, contact pneu-chaussée)



En ce qui concerne la quantification et la propagation des incertitudes, il s'agira d'identifier la variabilité spatio-temporelle et les incertitudes des données d'entrée de celles liées aux modèles d'émission vibro-acoustique et au(x) modèle(s) de propagation acoustique. On utilisera des méthodes de propagation d'incertitude adaptées à chaque problématique (*i.e.* aux phénomènes physiques considérés et aux fréquences étudiées), en se plaçant dans la recherche d'un compromis entre précision des estimations, sensibilité aux paramètres, robustesse de la méthode et efficacité numérique (coût CPU/GPU). On abordera le problème numérique soit dans le domaine temporel (FDTD, TLM [24], etc.), soit dans le domaine fréquentiel (BEM, PE [25], etc.), soit à l'aide de méthodes analytiques classiques du type « tir de rayons ». En outre, ces modèles pourront bénéficier des travaux très récents liés à la prise en compte des réelles caractéristiques de sol (spectre de rugosité, variabilité de la porosité, etc.) dans les modèles d'impédance acoustique, eux-mêmes implémentés dans les modèles de propagation pour prendre en compte les phénomènes de réflexion, absorption, etc. [26].

L'estimation des incertitudes (et leur propagation dans l'ensemble du chaînage) pourra ensuite s'appuyer sur des approches statistiques récemment développées à l'Ifsttar avec ses partenaires (notamment EDF R&D et l'ENM Paris) dans le domaine de l'acoustique environnementale : estimation des incertitudes liées aux effets des propriétés du sol [27,28], en particulier quand ils sont couplés aux effets des conditions micro-météorologiques sur la propagation acoustique [29,30]. Ces approches seront ensuite adaptées et déployées de façon à pouvoir les appliquer dans les modèles vibro-acoustiques, au plus près de la source sonore (rayonnement moteur, acoustique sous capot, isolation).

Ce travail de thèse – tout à fait innovant dans le domaine des nuisances sonores d'origine automobile – pourra également s'appuyer sur des publications récentes dans des domaines connexes [31,32], sur des ouvrages de référence [33-35] ainsi que sur des compétences en interne chez RENAULT.

3. ORGANISATION DES TRAVAUX DE RECHERCHE

La première phase du travail de thèse consistera à réaliser une étude bibliographique complète sur les modèles vibratoires, vibro-acoustiques et acoustiques pouvant répondre au rayonnement de structure et à la propagation en milieu extérieur. Une étape sera également consacrée à la formation des outils utilisés chez Renault, tels que le modèle de synthèse hybride (développement interne Renault), les logiciels de tir de rayon (Icare) et de radiance (Acourad) et le logiciel matériaux multicouche (Thor). Une partie sera assurée par l'équipe de travail intégrée par le doctorant, une autre partie sera assurée par des formations externes. Cette formation sera parachevée par une participation effective à quelques cas concrets, permettant de bien comprendre les problèmes d'interopérabilité et les difficultés inhérentes aux modèles utilisés. Le doctorant se familiarisera ensuite aux récents travaux menés dans l'équipe IFSTTAR sur la prise en compte des incertitudes stochastiques liées aux données d'entrées, ainsi que des incertitudes épidémiques (erreur de modèle). Les premiers développements concerneront les modèles de propagation acoustique externe, où des études de sensibilité de paramètres seront réalisées.

La deuxième phase du projet sera consacrée aux modèles vibro-acoustiques permettant le calcul de l'acoustique sous capot. Ces modèles devront pouvoir se connecter aux modèles de propagation acoustique par voies solidiennes (transparence) et aériennes (ouverture sol). Les approches de prise en compte des incertitudes seront alors étendues aux modèles retenus. Les effets des incertitudes seront étudiés en fonction des modèles utilisés et de la nature des variables calculées, servant de données de sortie et d'entrée entre modèles.

In fine, des cas industriels seront étudiés, pour lesquels les résultats seront confrontés expérimentalement.

Les travaux réalisés feront l'objet de communications au sein de la communauté scientifique. On attend ainsi, à *minima*, trois présentations dans des congrès internationaux spécialisés ainsi que la soumission d'un ou deux articles dans un journal international à comité de lecture de rang A.

4. BIBLIOGRAPHIE

[1] L-F. Pardo, S. Ficheux, «Exterior pass-by noise regulation - Monitoring database and impact assessment», SIA 2012, Le Mans

[2] C.Locqueteau, JF.Salem, «Point of view of automotive OEM for new passby noise regulation R51-03 : challenges and new deployment », Congrès SIA confort acoustique automobile et ferroviaire, octobre 2012

[3] R. Wedel, B. Verrecas, «New Pass-by Noise regulation and need for new development tools», LMS European Vehicle conference 2012



- [4] Verheij, Hoebrechts, Thompson, «Acoustical Source Strength Characterization for Heavy Road Vehicles Engines in Connection with Pass-By Noise», Third International Congress on Air- and Structure-borne Sound and Vibration, June 1994, Montreal
- [5] P. Van der Linden, Mantovani, «The Validity of Reciprocal Acoustic Transfer Function Measurements on Trucks for Pass-By Noise», Internoise 1996
- [6] P. Van der Linden, H.Defay, J-P. Le Martret, «Truck Pass-By Noise, Detailed Sources Contribution Identification During ISO362 Pass-By», ISMA 1998
- [7] W. Biermayer, F. Brandl, Y. Shirahashi, H. Nishimaru, «Development of a software tool for the analysis and optimisation of passenger car pass-by noise», SAE 20035413
- [8] G.Eisele, N.Alt, F. Pichot, « Vehicle exterior noise simulation », ICSV13-Vienna, The third international congress on sound and vibration, Vienna, Austria, July 2-6, 2006
- [9] K. Janssens, P. Aarnoutse, P. Gajdatsy, L. Britte, F. Deblauwe, H. Van der Auweraer, « Time domain source contribution analysis method for in-room pass-by noise », 11NVC-0111, SAE International 2011
- [10] J.B. Keller « Geometrical Theory of Diffraction », J. Opt. Soc. Am., 1962, 52 (2)116-130
- [11] R.G. Kouyoumjan, P.H. Pathak, «A uniform geometrical theory for an edge in a perfectly conducting surface», Proc of the IEEE, 1974, 62(11), 1448-1461
- [12] F.Molinet, « Geometrical Theory of Diffraction , Part I : foundation of the theory», IEEE Trans. Antennas Propag Society Newsletter, 1987, August, 6-17
- [13] F.Molinet, « Geometrical Theory of Diffraction , Part II : extensions and futures trends of the theory», IEEE Trans. Antennas Propag Society Newsletter, 1987, October, 5-16
- [14] T.Schmitt, « Modélisation des transferts acoustique en moyenne et hautes fréquences par méthode énergétique : application à l'encapsulation des compartiments moteurs», These Ecole Centrale de Lyon, 29 mars 2004
- [15] N.Hermant, « Limitations and improvements for a beam tracing simulation software applied to room acoustics », Master Thesis, Chalmers Univ, Göteborg, Sweden 2010
- [16] N. Noe, C. Rougier, J. Rouch, I. Schmich, « An hybrid beam and particle tracing with time dependant radiosity for accurate impulse response of rooms prediction », Proceedings of the Acoustics 2012 Nantes Conference, 23-27 April 2012, Nantes, France
- [17] P. Jean, « Coupling geometrical and integral method for indoor and outdoor sound propagation : validation examples», Acta Acustica, 87:236-246, 2001
- [18] P. Jean, « Coupling geometrical and integral representation for vibro acoustic problems», Journal of sound and vibration, 224(3), 475-487, 1999
- [19] P. Jean, J. Rolland« Application of the green ray integral method (GRIM) to sound transmission problems», Building Acoustics, 8(2), 139-156, 2001
- [20] J.F. Rondeau, A. Duval, C. Morgenstern, G.Borello, S.Frikha, A.Gallet, P.Jean, N.Noë, « Sonvert : hybrid traffic noise simulation approach », 09NVC-0255, SAE International 2009
- [21] K. Fujita, T. Abe, Y. Hori: «Simulation of Acceleration Pass-by Noise Considering the Acoustic Radiation Characteristics of a Vehicle Body». JSAE Review Vol. 7, No. 3, October 1986
- [22] Z. Zhang, N. Vlahopoulos, T. Allen, K.Y. Zhang, «Development and validation of a computational process for pass-by noise simulation», Int. J. Vehicle Design, Vol. 34, No. 1 (2004), pp. 12–34.
- [23] A. R. Fleszar, P.J.G. van der Linden, J. R. Johnson, M. J. Grimmer, «Combining Vehicle and Test-Bed Diagnosis Information to Guide Vehicle Development for Pass-By Noise», 01NVC-182, SAE International 2001
- [24] G. Guillaume, J. Picaut, G. Dutilleux, B. Gauvreau, (2011), "Time-domain impedance formulation for transmission line matrix modelling of outdoor sound propagation", Journal of Sound and Vib. 330(26), 6467-6481
- [25] B. Lihoreau, B. Gauvreau, M. Bérengier, Ph. Blanc-Benon, I. Calmet, (2006), "Outdoor sound propagation modeling in realistic environments: Application of coupled parabolic and atmospheric models", J. Acoust. Soc. Amer., Vol. 120, N°1, pp. 110-119
- [26] O. Faure, B. Gauvreau, F. Junker, Ph. Lafon, (2013), "Effective impedance models for rough surfaces in time-domain propagation methods", invited paper, Proc. Internoise 2013, Innsbruck (Au), september 15-18 2013



- [27] O. Baume, «Approche géostatistique de l'influence des paramètres physiques sur la propagation acoustique à grande distance», PhD Thesis, Univ. du Maine, Le Mans, 2006
- [28] O. Baume, B. Gauvreau, M. Bérengier, F. Junker, H. Wackernagel, J.P. Chilès, (2009), "Geostatistical modeling of sound propagation: principles and a field application experiment", J. Acoust. Soc. Amer., Vol. 126(6), pp 2894–2904
- [29] O. Leroy, «Estimation d'incertitudes pour la propagation acoustique en milieu extérieur », PhD Thesis, Univ. du Maine, Le Mans, 2010
- [30] O. Leroy, B. Gauvreau, F. Junker, E. de Rocquigny and M. Bérengier, "Uncertainty assessment for outdoor sound propagation", invited paper to International Congress on Acoustics (ICA) 2010, Sydney (A), 23-27 aug. 2010
- [31] D.K. Wilson, (2005), "Uncertainty in outdoor noise measurement and prediction", J. Acoust. Soc. Amer., Vol. 118, p 1890
- [32] S.N. Vecherin, V. E. Ostashev and D. K. Wilson, (2013), "Assessment of systematic measurement errors for acoustic travel-time tomography of the atmosphere", J. Acoust. Soc. Amer., Vol. 134(3), pp1802-1813
- [33] E. de Rocquigny, N. Devictor, S Tarantola, Uncertainty in industrial practice – A guide to quantitative uncertainty management, Wiley & Sons Ed., 2008, 339p
- [34] N. Cressie, Statistics for spatial data, Wiley & Sons Ed., 1993, 900p
- [35] J.P. Chilès, P. Delfiner, Geostatistics : Modelling spatial uncertainty, Wiley & Sons Ed., 1999, 545p