

**CFA '18 LE HAVRE ■ 23-27 avril 2018**  
**14<sup>ème</sup> Congrès Français d'Acoustique**



**Méthode de calcul MF-HF pour le Pass-By Noise : couplage  
radiosités et tirs de rayons**

M. Rety<sup>a</sup> et N. Noe<sup>b</sup>

<sup>a</sup>RENAULT, Centre Technique d' Aubevoye, Parc de Gaillon Bât G19, 27940 Aubevoye, France

<sup>b</sup>CSTB, 11 rue Henri Picherit, Cedex 03, 44323 Nantes, France

mickael.rety@renault.com

La réglementation impose aux constructeurs automobiles de commercialiser des véhicules dont les niveaux sonores émis à l'extérieur restent inférieurs à une certaine valeur limite. Dans un contexte industriel très contraint, la simulation numérique permet d'anticiper les problèmes liés à cet objectif, en estimant les niveaux rayonnés. Il s'agit de couvrir l'ensemble du spectre audible. Néanmoins, les méthodes de calcul classiques de type FEM avouent leurs limites en MF et HF, où les longueurs d'onde associées impliquent de traiter des modèles numériques très lourds, avec des temps de calcul incompatibles avec les délais de développement. Les approches par méthode énergétique permettent de s'affranchir de cette limite fréquentielle, mais avec des hypothèses fortes sur la propagation puisque la notion de phase disparaît. Ainsi, la méthode des radiosités repose sur l'hypothèse d'échanges radiatifs et diffus de l'énergie. Sa mise en œuvre opère en des temps de calcul très courts. La méthode des tirs de rayons, obéissant aux lois de l'optique géométrique, est une autre alternative permettant de couvrir les hautes fréquences, cette fois sans négliger les aspects de phase, et donc les phénomènes d'interférence.

En combinant ces deux méthodes, il devient possible de calculer les FRF en MF et HF et de tirer profit de chacune d'elle. Les environnements, confiné pour le compartiment moteur et champ libre pour l'extérieur, se prêtent naturellement à cette technique de couplage.

Dans cette présentation, nous proposons de présenter cette méthode de calcul innovante, associant radiosités et tirs de rayons. Un 1<sup>er</sup> cas test, sous la forme d'un modèle simplifié de compartiment moteur, permet de présenter sa mise en œuvre, en explicitant les choix de modélisation et les hypothèses de calcul retenues. Enfin, des résultats sur la base d'un second cas industriel, seront présentés.

## 1. Introduction

Afin d'anticiper au mieux les contraintes liées au respect de la norme de bruit extérieur, la simulation numérique est devenue incontournable en permettant d'estimer les niveaux de bruit rayonné par le véhicule dès les premières phases de développement. La nécessité de couvrir un large spectre audible, étendu vers la HF, oriente vers des méthodes de calcul semi-analytiques (méthode des radiosités, méthode des tirs de rayons) plus performantes en terme de temps de résolution que les méthodes numériques classiques de type FEM [1].

La nouveauté que l'on souhaite présenter ici tient dans le fait que l'on associe à une méthode énergétique une méthode géométrique. Ainsi cette méthode de calcul hybride, associant radiosités et tirs de rayons, permet de répondre à un double enjeu :

- prendre en compte à la fois les échanges d'énergie diffus et les phénomènes d'interférence.
- couvrir un large domaine fréquentiel sans surcoût sur le temps de calcul.

Après avoir décrit le principe de couplage et la théorie sous-jacente à ces deux méthodes de calcul, on se propose de rappeler le principe de l'essai de bruit de passage de norme, dont le produit de sortie peut être obtenu par recombinaison source x transfert. L'enjeu des simulations présentées ici porte sur l'estimation de ces transferts bruit - plus spécifiquement ceux du Groupe Moto Propulseur appelé GMP -, avec une 1<sup>ère</sup> application sur une maquette en bois représentant grossièrement le compartiment moteur d'un véhicule. Enfin, un cas simulé sur un véhicule série sera présenté et permettra de valider la méthode de calcul.

## 2. Méthode de couplage

### 2.1. Principe

Cette méthode consiste à chaîner deux types de calcul :

- un 1<sup>er</sup> calcul énergétique large bande à l'aide de la méthode des radiosités dans un environnement confiné, à l'issu duquel on récupère les intensités rayonnées par l'enveloppe extérieure,

- un 2<sup>nd</sup> calcul par méthode asymptotique (méthodes dites « rayons ») en bandes fines, propageant l'énergie depuis cette enveloppe, en prenant en compte les interactions avec l'environnement.

Dans le cas d'une automobile, le modèle géométrique est scindé en deux domaines :

- le Compartiment MOteur – ou CMO- dédié au calcul de radiosités
- l'extérieur du véhicule dédié au calcul tirs de rayons

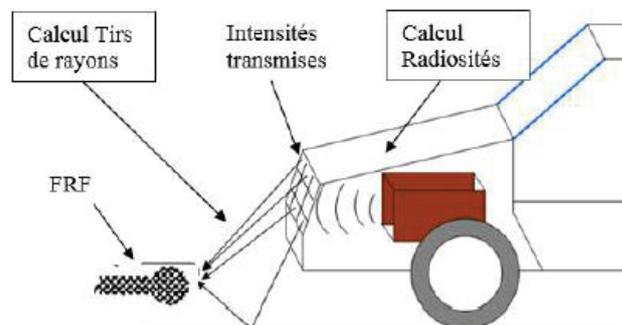


Figure 1 : Schéma de principe

En pratique, le même modèle géométrique peut être utilisé comme donnée d'entrée pour les deux calculs. Ce modèle est constitué d'un ensemble de mailles décrivant la géométrie ainsi que la frontière entre les deux domaines.

L'interprétation sera, elle, différente entre les deux calculs, puisque l'enveloppe, initialement utilisée pour le calcul des intensités, servira de source de rayonnement dans la deuxième étape.

### 2.2. Théorie

La radiosité est une méthode de calcul basée sur des échanges parfaitement diffus (Lambertiens) entre les surfaces. Utilisée originellement pour les échanges radiatifs, elle est très largement utilisée en simulation d'éclairage. En acoustique, elle peut être utilisée pour traiter des problèmes de diffusion [2], mais elle aussi utilisée dans les environnements complexes confinés (comme les sous-capots de véhicule [3]), où les échanges diffus sont induits non par les propriétés des matériaux eux-mêmes, mais par le comportement du volume rendant le champ diffus aux

moyennes et hautes fréquences. On parle aussi parfois « d'éléments finis énergétiques hautes fréquences ».

Le terme de « radiosité » correspond à la puissance quittant un point sur une surface, par unité de surface. Il s'agit donc de l'intensité acoustique, que l'on considère constante sur chacune des mailles du modèle. On cherche à calculer ces intensités, à partir d'un chargement en puissance sur des sources ponctuelles ou sur les mailles elles-mêmes. Les matériaux sont décrits par leurs caractéristiques en réflexion (alpha diffus) et transmission (TL), en bandes larges.

La résolution du problème se fait sur un maillage grossier et indépendant de la fréquence du modèle, en deux étapes :

- Une première étape purement géométrique calcule les facteurs de forme entre les mailles elles-mêmes. Le facteur de forme correspond à la fraction du flux rayonné par un élément reçue par un autre élément. Les facteurs de forme entre les sources ponctuelles et les mailles et entre les mailles et les micros sont aussi calculés.
- Une deuxième étape, consiste à résoudre l'équation de radiosité, en faisant intervenir le chargement, les alphas et les TLs. Cette résolution peut se faire par inversion de matrice, mais une approche itérative, plus robuste et plus intuitive, consistant à propager les intensités à chaque itération d'une maille vers les autres est utilisée ici.

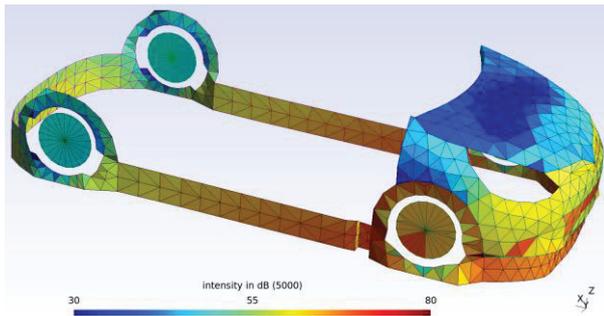


Figure 2 : Exemple de calcul de radiosités

Ces deux étapes sont très rapides, et la deuxième étape peut être répétée pour des cas de chargement différents. Il est possible d'intégrer au modèle des « surfaces virtuelles », correspondant aux ouvertures, où l'intensité rayonnée sera calculée, mais qui n'interviennent pas dans la propagation. Ainsi, on est capable de calculer l'intensité rayonnée sur l'ensemble de l'enveloppe du modèle.

Si la méthode des radiosités est bien adaptée à un environnement complexe confiné comme un sous-capot, elle n'est pas adaptée à la prise en compte d'un sol (rigide ou non), qui ne peut être considéré comme une surface diffuse. Pour résoudre ce problème, la méthode est étendue pour prendre en compte un sol spéculaire infini. Ce sol est intégré de manière transparente pour l'utilisateur dans la méthode de résolution, en construisant un modèle « image » de l'ensemble des mailles par symétrie sur le sol. Il suffit alors de calculer les facteurs de forme entre les mailles originales et ces mailles miroirs, et d'intégrer ces mailles miroirs à l'étape de résolution. L'ajout d'un sol spéculaire multiplie au maximum par deux le nombre de facteurs de forme.

Pour la propagation dans l'environnement, une méthode classique à rayons est utilisée. On crée sur chaque maille de l'enveloppe des sources ponctuelles hémisphériques (elles aussi Lambertiennes), dont la puissance est déterminée à partir de l'intensité rayonnée et de la surface des mailles. Là encore, une passe géométrique permet de calculer les chemins de propagation entre ces sources et les récepteurs, puis une passe physique permet de calculer les fonctions de transferts en bandes fines, prenant ainsi en compte les interférences entre les différentes contributions.

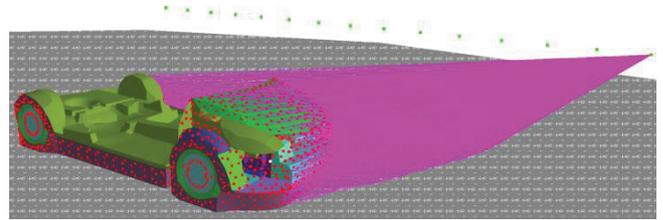


Figure 3 : Exemple de calcul de propagation

L'ensemble de la méthode de calcul, couplant les deux techniques est intégrée dans une solution unique du logiciel ICARE (version 3) du CSTB.

### 3. Mesure Pass-By Noise

L'essai en bruit de passage de norme ou Pass-By Noise consiste en la mesure du bruit émis par le véhicule lors d'un passage devant deux récepteurs situés de part et d'autre de la piste. Cet essai peut être reproduit expérimentalement en dissociant les aspects rayonnement des sources et propagation aérienne jusqu'aux récepteurs [4]. Le bruit est ainsi recomposé suivant la formule :

$$P_j^2 = \sum_{i=1}^k Q_i^2 \cdot FRF_{ij}^2$$

Avec :  $Q_i$  = débit de la source considérée

$FRF_{ij}$  = transfert entre la source  $i$  et le récepteur  $j$

Le schéma suivant illustre le cas test.

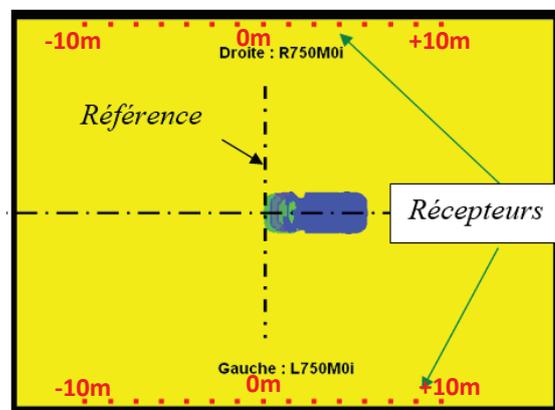


Figure 4 : Illustration du cas test

On s'intéresse plus particulièrement à la source moteur du véhicule et à son transfert jusqu'aux récepteurs à 7.5 m. Une 1<sup>ère</sup> étude est réalisée sur une maquette en bois.

## 4. Etude du caisson

### 4.1. Présentation

Une maquette simplifiée de compartiment moteur, fabriquée à partir de panneaux MDF et de contre-plaqué, a été réalisée par la société AUTONEUM [5].

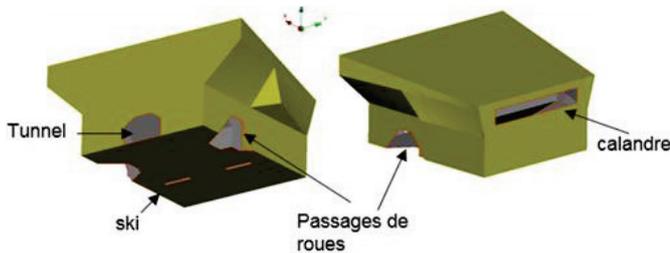


Figure 5 : Vue extérieure du caisson

Des absorbants ont été intégrés à l'intérieur :

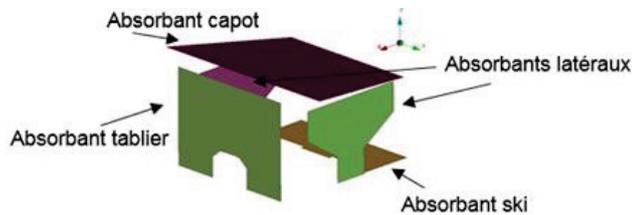


Figure 6 : Vue des absorbants

Une campagne de mesures de FRF en chambre semi-anéchoïque a été lancée sur cette maquette, suivant plusieurs configurations.

Tableau 1 : configurations testées

		Ouverture	
		Ouvertures Toutes ouvertes	Ouvertures Toutes fermées
Absorbant	aucun	CAS 1	CAS 1A
	capot, tablier, ski	CAS 3	CAS 3A

### 4.2. Application de la méthode

En parallèle de ces mesures, Autoneum a également fourni la géométrie 3D du caisson, avec tous ses absorbants, au format Nastran. Après un travail de remaillage et de mise en données, des calculs de FRF ont pu être lancés suivant la méthode couplée radiosités/tirs de rayons.

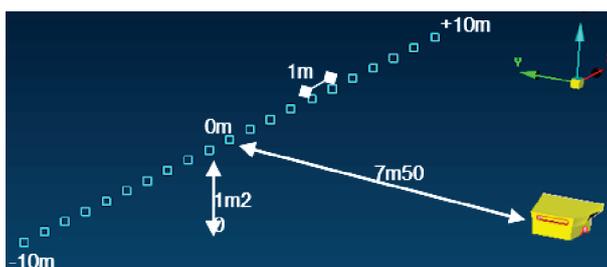


Figure 7 : Modélisation du caisson avec récepteurs

Les schémas suivants illustrent la technique de mise en œuvre de la méthode couplée au caisson.

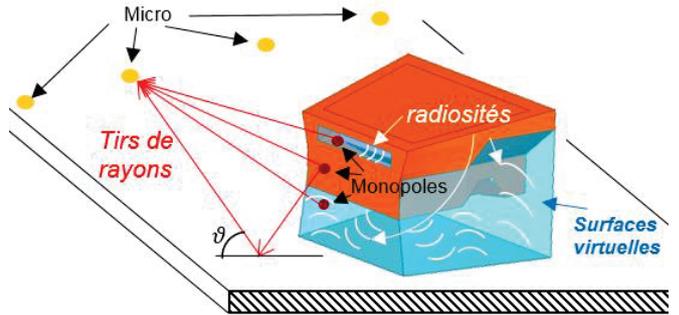


Figure 8 : Modélisation : vue iso

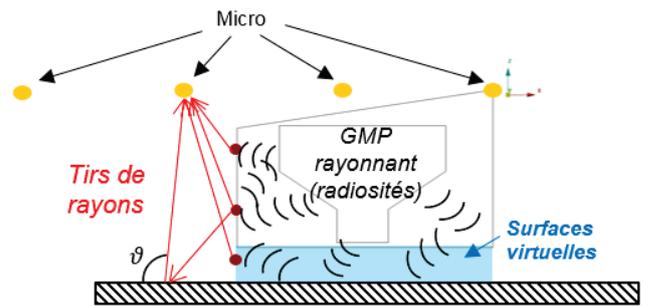


Figure 9 : Modélisation : vue en coupe

La transparence des panneaux est prise en compte dans le calcul, et les monopoles positionnés à la surface du caisson permettent le rayonnement à l'extérieur. Toutes les ouvertures sont fermées par des surfaces virtuelles afin de collecter les intensités à propager.

Les échanges d'énergie sont considérés diffus à l'intérieur et en dessous du caisson, et traités par la méthode des radiosités. Cette hypothèse, intuitive du point de vue de la physique, permet de contourner quelques faiblesses de la méthode tirs de rayons :

- Mauvaise gestion des rayons rampants
- Diffraction délicate à définir, et coûteuse en temps de calcul
- Risque de non convergence géométrique lorsqu'il y a un obstacle
- Validité pour des distances entre deux réflexions au moins égales à la longueur d'onde

Dans notre cas, l'environnement confiné et réverbérant du caisson (avec une distance inter-objet petite) est donc traité par radiosités, tout comme le sous-bassement.

La propagation extérieure, en champ libre, est fidèlement modélisée par tirs de rayons en intégrant les phénomènes d'interférence liés au comportement spéculaire du sol, considéré comme infiniment rigide.

### 4.3. Corrélation calcul/mesure

Les mesures ont été réalisées avec des sources artificielles positionnées sur chacune des faces du GMP. Leur amplitude est exprimée en débit d'accélération volumique unitaire :  $Q^2 = 1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-2}$ .

Afin de rester homogène, les calculs ont été réalisés avec des sources ponctuelles, de type monopôle, positionnées à

l'identique des mesures. Dans le logiciel, celles-ci sont décrites par une puissance en Watt. Considérant un monopole bafflé rayonnant dans un demi-espace, la relation entre débit d'accélération volumique et puissance  $W$  s'écrit :

$$W_{source} = \frac{\rho_0}{2\pi c_0} \cdot \dot{Q}_{RMS}^2 = 0.00057 W$$

Plusieurs hypothèses de rayonnement et de conditions limites sont évaluées. Le tableau ci-dessous en dresse la liste.

Tableau 2 : hypothèses de calcul

			Hypothèses			
			H1	H2	H3	H4
radiosité seule	phase1: radiosité	conditions limites	sol lambertien			
		rayonnement	monopole hémisphérique			
radiosité + tirs de rayons	phase1: radiosité	conditions limites		sol lambertien	sol lambertien	sol spéculaire
		rayonnement		monopole hémisphérique	monopole hémisphérique	monopole hémisphérique
	phase2: tirs de rayons	conditions limites		sol spéculaire	sol spéculaire	sol spéculaire
		rayonnement		monopole hémisphérique	monopole lambertien	monopole lambertien

Les courbes de niveaux présentées ci-dessous sont obtenues par moyennage quadratique sur tout le spectre, pour chaque position de récepteur. On s'intéresse aux configurations nues et habillées, tout ouvert.

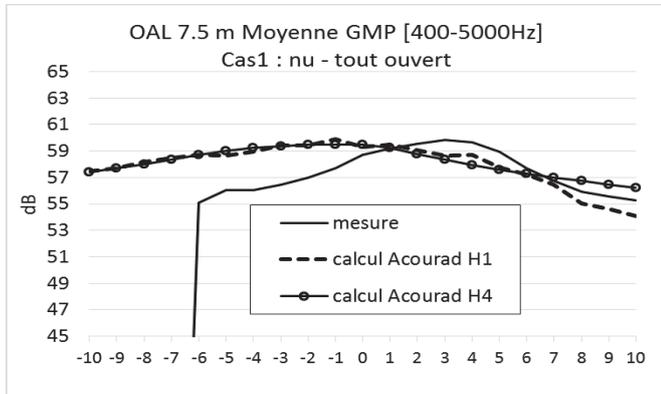


Figure 10 : Transfert bruit global du caisson nu

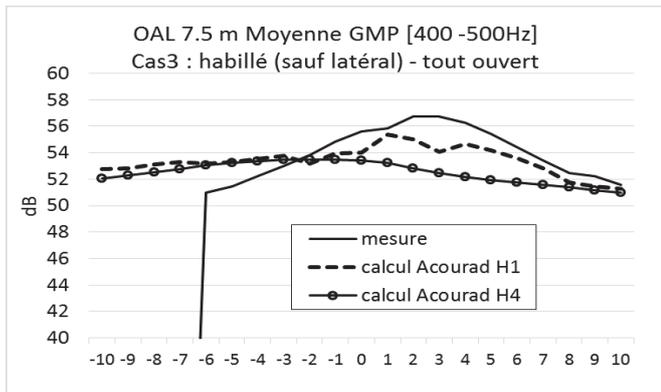


Figure 11 : Transfert bruit global du caisson habillé

Les simulations par radiosité seule donnent des résultats satisfaisants qu'il faut nuancer : l'observation des spectres révèle une forte imprécision, avec un lissage gommant les pics liés aux phénomènes d'interférence. Les graphiques suivants illustrent le phénomène aux positions +1m et -1m.

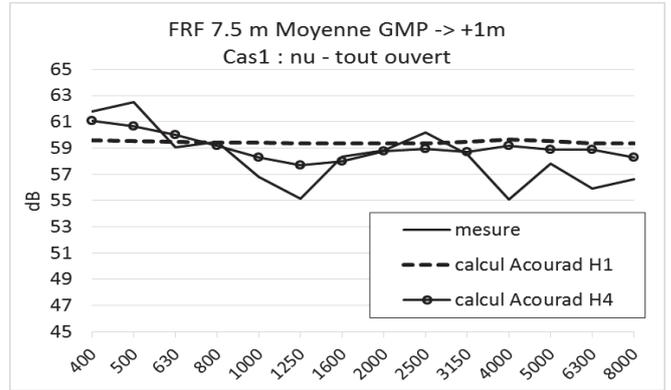


Figure 12 : FRF du caisson nu

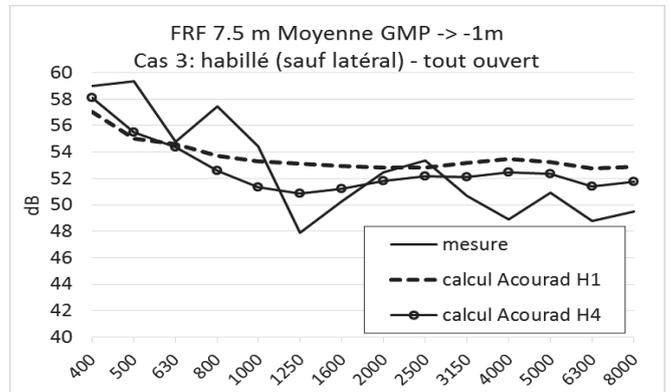


Figure 13 : FRF du caisson habillé

La méthode couplée, avec sol spéculaire en phase radiosité et monopôles lambertiens, estime les niveaux de manière plus juste du point de vue de la physique.

## 5. Etude Clio 3

Les FRF ont été mesurées en chambre semi-anéchoïque sur une Clio 3 1L5dci à l'état série.

### 5.1. Application de la méthode

Dans un souci d'optimisation du temps de calcul, seul l'avant du véhicule a été maillé (enveloppe extérieure + compartiment moteur).

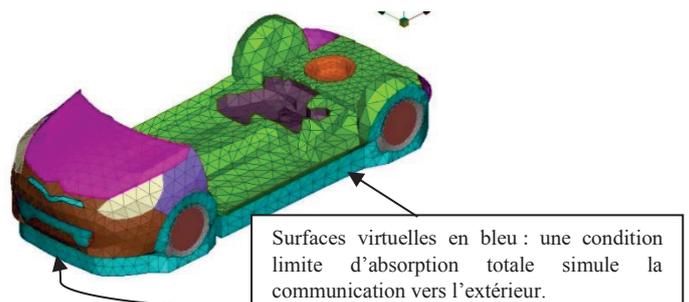


Figure 14 : Modélisation de la Clio3

Un compromis a été trouvé entre finesse du maillage et taille du modèle afin de rendre compte d'un maximum de détails géométriques et retranscrire le confinement intérieur, condition de réussite pour le calcul de radiosités [6].

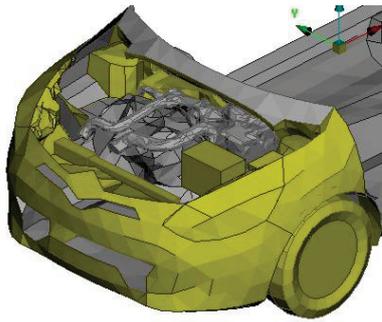


Figure 15 : Détail du maillage du CMO

## 5.2. Corrélation calcul/mesure

Pour la suite du calcul, les mêmes conditions limites que pour le caisson ont été retenues :

- Transparence des panneaux
- Sol infiniment rigide
- Surfaces virtuelles totalement absorbantes

Le graphique ci-dessous présente les fonctions de transfert globales suivant les mêmes hypothèses de calcul.

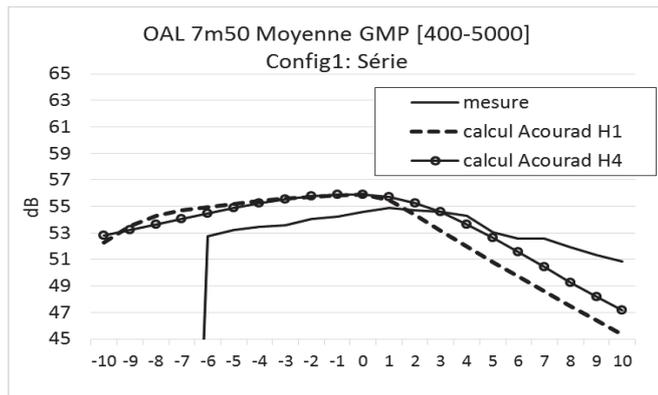


Figure 16 : Transfert bruit global de la Clio3

La méthode couplée donne de meilleurs résultats au global. L'observation des FRF sous formes de spectres amène à la même conclusion : la méthode couplée est la plus juste du point de vue de la physique.

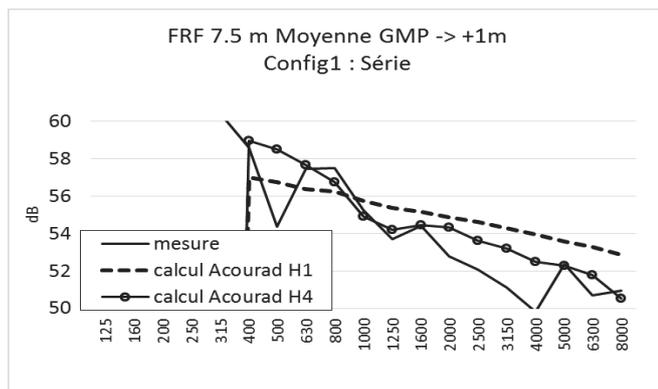


Figure 17 : FRF de la Clio3

Le sol spéculaire en radiosité permet de sommer les contributions de manière plus précise. Les monopôles à la surface frontière du véhicule rayonnent de ce fait une énergie mieux proportionnée, moins sensible à l'effet de zone d'ombre numérique en phase tirs de rayons.

Le niveau de corrélation calcul – mesure peut être observé également sous l'angle statistique. Ci-dessous, la distribution des écarts cumulés entre le calcul et la mesure, aux 1/3 d'octaves 500, 1000, 2000 et 4000Hz

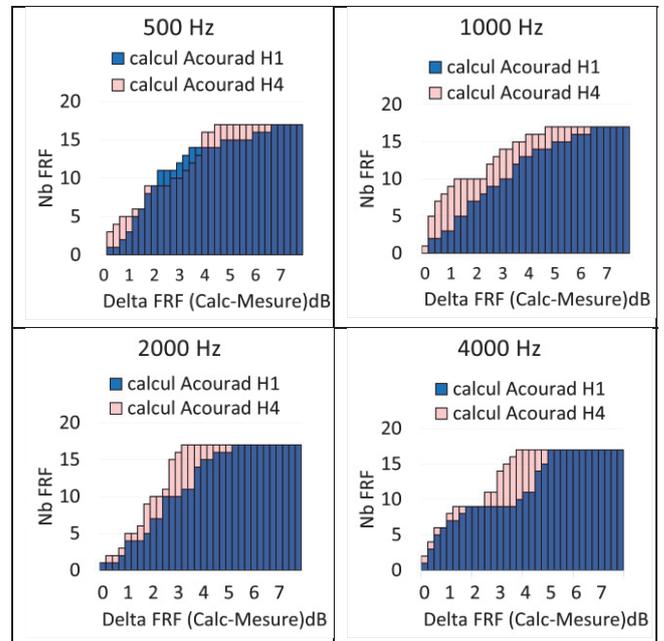


Figure 18 : Distribution des écarts calcul - mesure

A partir de ces graphiques, il est possible de dégager un indice de confiance, en se focalisant arbitrairement sur 70% des FRF calculées. Le graphique ci-dessous exprime cet indice sous forme de spectre.

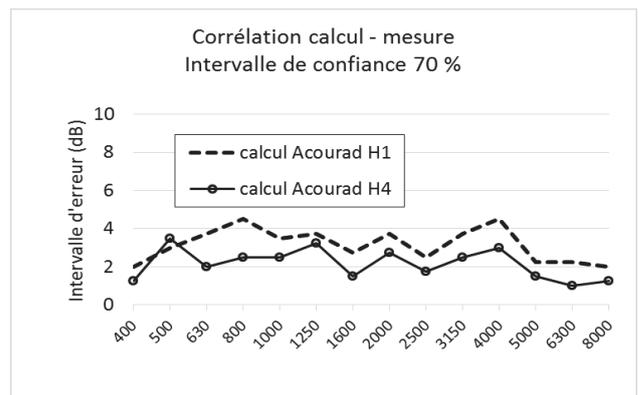


Figure 19 : Ecart à la mesure des FRF de la Clio3

Concrètement, le graphique se lit comme suit :

- la courbe calculée H1 représente l'écart maxi à la mesure pour 70% des FRF
- la courbe calculée H4 représente l'écart maxi à la mesure pour 70% des FRF

## 6. Conclusion

En proposant l'approche combinant radiosités et tirs de rayons, nous avons souhaité montrer l'intérêt qu'il y avait à utiliser cette méthode de calcul dans la prédiction de FRF en bruit extérieur, en MF et HF. Les hypothèses de propagation et de conditions limites permettent de rendre compte assez fidèlement des phénomènes physiques mis en jeu, à l'exception de la diffraction non intégrée dans les modèles. Du point de vue fréquentiel, les calculs corréleront assez bien la mesure sur les plages [400-2000Hz] et [5000-8000Hz], selon les positions des récepteurs.

Pour s'assurer de la robustesse de cette méthode, il serait intéressant d'étudier d'autres véhicules en confrontant les écarts calcul-mesure entre eux.

Enfin, des travaux portant sur l'intégration de la diffraction et la définition des rayonnements des monopôles laissent espérer un gain supplémentaire sur la précision des résultats de calcul.

## Références

- [1] A. Appel de Gardane, D. Copiello, P. Mordillat, *Numerical assessment of car pass-by noise*, Automotive NVH Comfort, SIA, 2016
- [2] N. Noé, C. Rougier, J. Rouch, I. Schmich, *An Hybrid Beam and Particle Tracing with Time Dependant Radiosity for Accurate Impulse Response of Rooms Prediction*, 11<sup>ème</sup> congrès Français d'Acoustique, 2012
- [3] M. Thivant, P. Bouvet, A. Cloix, N. Blairon, *Boundary Energy Method for the Acoustic Prediction of External and Internal Vehicle Noise*, 6<sup>th</sup> International Syrian Noise, Vibration & Harshness Congress, 2010
- [4] H. Hamdad, *Recherche d'une description optimum des sources et systèmes vibro-acoustiques pour la simulation du bruit de passage des véhicules automobiles*, Le Mans Université, juin 2018
- [5] A. Bihhadi, C. Bertolini, C. Locqueteau, *Simulation of exterior powertrain ATFs on an engine bay mock-up with complex trim configurations*, Automotive Acoustics Conference, 3<sup>rd</sup> International ATZ Conference, 2013
- [6] J. Kakeu-Momo, *Modélisation des transferts acoustiques d'un compartiment moteur*, Stage de fin d'étude, RENAULT - ENSIM, 2017