

Les besoins en méthodes de mesure et d'analyse efficaces pour qualifier la performance acoustique des produits automobiles

Bernard Favre,
Renault VI,
DT - DRC - DER4,
1, avenue Henri Germain,
69800 Saint-Priest

La qualité acoustique, les performances en bruit et vibrations représentent un domaine très dimensionnant pour le produit automobile, devenu aujourd'hui de première importance à côté des questions de fatigue en endurance, et de crash. Ceci concerne tous les types de véhicules (voitures particulières, véhicules commerciaux...).

La maîtrise des problèmes acoustiques d'un véhicule est le résultat d'un processus impliquant un grand nombre d'intervenants, aussi bien au niveau de l'industrialisation qu'au niveau de la conception, et aussi bien chez les fournisseurs et équipementiers que chez le constructeur de véhicules lui-même.

Les cahiers des charges deviennent de plus en plus exigeants sous les contraintes du marché et de la réglementation, de sorte que la performance acoustique du produit est en perpétuelle amélioration. D'autre part, il est nécessaire, pour conserver la compétitivité dans une situation de concurrence accrue, de développer et d'industrialiser les véhicules de plus en plus vite, en réduisant les coûts de développement, tout en satisfaisant les cahiers des charges.

Il en découle que le constructeur de produits automobiles doit mettre en place et maintenir un processus de maîtrise de la qualité acoustique, au moment nécessaire. On souhaite pouvoir procéder le plus en amont possible du processus global de développement et d'industrialisation des véhicules, car traiter trop tardivement dans ce processus induit du poids, du coût accru, et des risques majeurs de non-qualité. Il s'agit de passer d'une acoustique curative à une acoustique préventive.

Nous allons discuter de la mise en place de ce processus, et en particulier mettre en évidence les aspects qui concernent les méthodes de mesure et d'analyse nécessaires pour qualifier la performance acoustique.

La performance acoustique du produit automobile

La bonne performance acoustique du produit automobile est qualifiée selon différents contextes. Il s'agit d'abord

de satisfaire les utilisateurs des produits. Le confort, la vie à bord sont des enjeux essentiels. Il faut limiter les niveaux de bruit internes à l'habitacle, et les rendre agréables pour améliorer le confort et réduire la fatigue, mais aussi il faut favoriser les sons utiles - écoute de la radio, communication sonore entre occupants et entre le conducteur et son véhicule par exemple. En quelques années, les aspects relatifs à la qualité acoustique sont devenus aussi essentiels que ceux relatifs à la quantité du bruit. Nous pensons que cette tendance se poursuivra pour satisfaire la demande du marché.

Il faut, d'autre part, limiter l'émission acoustique des véhicules vis-à-vis de l'environnement pour satisfaire les réglementations relatives au bruit extérieur et aussi le confort des autres usagers. La réglementation européenne a imposé une réduction d'émission sonore d'environ 10 dB (A) en 25 ans, pour l'ensemble des véhicules routiers dans les conditions de la procédure EEC 92-97 (84/424), soit une réduction par 10 de l'énergie sonore émise dans ces conditions. Cette réduction a exigé un travail approfondi sur les sources sonores les plus émergentes, de sorte que désormais même les sources sonores autrefois réputées secondaires interviennent dans l'émission sonore globale [1, 2]. Pour le confort des autres usagers, certains bruits (bruit de véhicule au ralenti, bruit d'autobus aux abords d'un arrêt...) font l'objet de critères de qualification.

Les critères quantifiés pour caractériser le confort

La perception (bruit perçu, qualité perçue) est la clé du travail de l'acousticien. Les aspects psychologiques, multi-sensoriels, économiques interviennent dans la définition des critères de qualité perçue.

Il faut ainsi développer des procédures d'essais qui permettent de représenter la perception subjective de l'utilisateur lors des diverses utilisations de son véhicule. On cherche à quantifier le niveau sonore pour une ou des mesures de bruit globales. Il est ensuite possible de

comparer, de classer objectivement des véhicules entre eux dans les mêmes conditions d'utilisation (par exemple, un circuit routier de référence), et ainsi de définir l'objectif quantifié qui s'exprime par une valeur à atteindre, mesurée selon une procédure d'essais propre au constructeur (conditions d'essais, type de mesure et de traitement du signal). C'est le cahier des charges "prestation acoustique".

Cette information est très utile pour un chef de projet. Elle reste peu exploitable pour un concepteur. Il faut donc passer d'une quantification globale du bruit à une quantification plus fine, et plus analytique. Dans ce cas, les procédures d'essais s'éloignent progressivement de l'usage client pour s'orienter vers des sollicitations très spécifiques. A chacune de ces sollicitations élémentaires, on associe un type de bruit. Par exemple, bruit intérieur basse fréquence (bourdonnement), ou bruit d'un composant de véhicule (bruit de turbo-compresseur).

Chaque condition est déterminée selon un mode opératoire précis - conditions de fonctionnement du véhicule, type de mesure, type de traitement du signal (fréquentiel, temporel...). Les normes sont utiles mais il s'agit le plus souvent de standards propres à chaque constructeur, basés sur l'expertise et le savoir-faire, et progressivement enrichis par les travaux de recherche et le retour d'expérience.

Pour chacun de ces critères élémentaires, il faut définir un niveau sonore objectif à satisfaire, dont le respect permettra d'atteindre l'objectif sonore global. Cette étape permet d'entrer dans le domaine de la physique acoustique.

Passer du critère acoustique au critère de conception

La suite de l'analyse permet d'établir le lien entre le bruit (caractérisé selon le critère élémentaire approprié) et

l'architecture du véhicule avec ses différents composants. La démarche de conception nécessite que chaque composant intervenant dans le système acoustique soit pris en compte : en termes de sources d'énergie aérienne et solide, ou en termes de transfert (vibratoire) ou bien de rayonnement (acoustique). Les contributions acoustiques des composants pour un type de bruit étant ainsi évaluées, il est possible d'en fixer les limites, composant par composant. C'est l'objet du cahier des charges techniques.

La caractéristique technique imposée pour un composant constitue une des données d'entrée pour le concepteur qui en réalise l'étude. Tout en travaillant dans son domaine de compétences, ce concepteur contribue ainsi directement au résultat attendu sur la satisfaction de la prestation confort acoustique.

La traduction de caractéristiques acoustiques en caractéristiques techniques est faite par l'acousticien à partir d'analyses expérimentales, de calculs, et de savoir-faire. Cette étape constitue le cœur de l'activité permettant de maîtriser les performances acoustiques globales du véhicule.

Compréhension du système acoustique : Connaître les sources d'énergie acoustique et vibratoire, et le cheminement de l'énergie jusqu'à la position retenue pour qualifier le critère acoustique, est une question fondamentale, afin de pouvoir maîtriser ce critère par une démarche de conception.

Il existe autant de modèles possibles "système acoustique" que de critères. De plus, ces modèles s'enrichissent au fur et à mesure que les connaissances s'améliorent, que la technologie évolue (matériaux, cahier des charges techniques) et que les critères deviennent plus exigeants. Ainsi, un modèle est une base nécessaire, mais en évolution permanente.

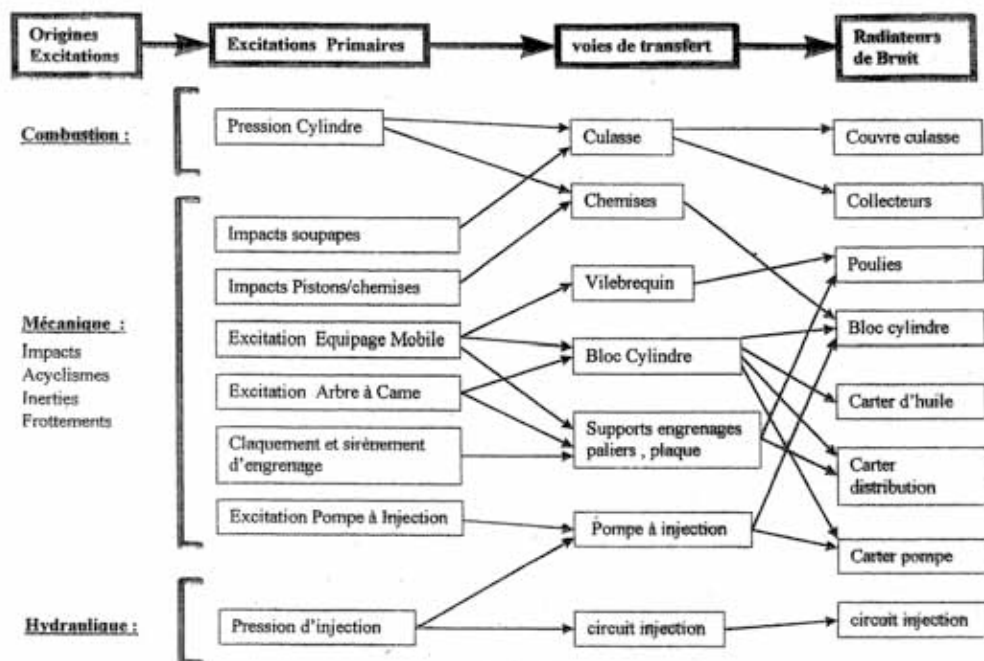


Fig. 1 : Modèle de système acoustique "moteur" pour caractérisation du bruit rayonné

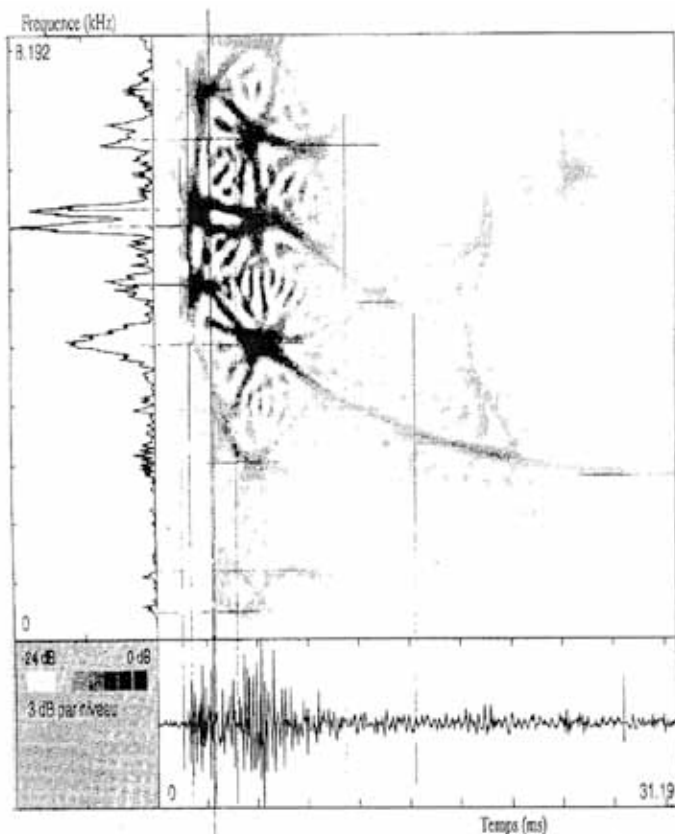


Fig. 2 : Analyse temps - fréquence (Wigner-Ville) sur un point de mesure interne moteur

La figure 1 représente un modèle simplifié utilisable pour caractériser le rayonnement acoustique d'un moteur vers l'extérieur du moteur.

Dans cet exemple, on peut distinguer les sources d'excitation aérienne et solidienne, les voies de transfert, et les surfaces de rayonnement acoustique. Les sources d'excitation sont de trois types :

- **combustion**, qui génère la variation de la pression cylindre ;
- **mécanique**, qui génère des chocs, des frottements, au niveau des cames, des soupapes, du piston, des engrenages, des pompes ;
- **hydraulique**, qui génère la variation de la pression d'injection. Les voies de transfert concernent les flux d'énergie dynamique à travers les différentes structures du moteur, attelage mobile, bloc moteur, circuits fluides. Les radiateurs de bruit concernent l'ensemble des structures au contact de l'environnement extérieur.

Si les sources et/ou les transferts ne sont pas tous de même importance pour un cas donné, leur identification et leur prise en compte sont toutefois nécessaires car la hiérarchie des sources et des transferts varie de façon permanente selon les architectures du produit en fonction des choix de conception et des paramètres d'industrialisation.

L'identification d'un modèle acoustique est un problème extrêmement complexe, nécessitant la mise en œuvre d'un ensemble de techniques expérimentales, d'outils métrologiques, d'outils de calculs.

Ces techniques sont nécessaires pour isoler les différents éléments du modèle, les quantifier en termes acoustique et vibratoire, déterminer les couplages entre les éléments, en déduire les voies d'émission et de transfert les plus pertinentes.

Elles nécessitent la mise en œuvre de capteurs de pression, de vitesse, d'accélération, de déplacement, selon des bandes passantes adaptées au problème. La bande de fréquences peut concerner toute la bande audible. Le choix des capteurs, leur configuration (capteur isolé, capteurs doublés pour faire des mesures d'intensité, capteurs multiples en ligne, en plan, en volume...), leur conditionnement tient compte des spécificités du cas traité, dimensions de la structure, facilité d'accès, environnement thermique... Appareiller de manière fine l'attelage mobile d'un moteur Diesel pour déterminer son rôle de transmission de l'énergie vibroacoustique entre la chambre de combustion et les parois du bloc moteur ne pose pas les mêmes problèmes qu'instrumenter un véhicule pour identifier les sources sonores individuelles dans les conditions de la réglementation. On peut multiplier les exemples : visualisation d'un rayonnement acoustique de structure moteur, mesure de l'excitation par un engrenage, un étrier de frein, réponse vibratoire d'un panneau de carrosserie...

On dispose d'une grande variété de méthodologies expérimentales, adaptées aux différents modèles envisageables selon les critères acoustiques concernés, couplés ou non à des approches numériques pour expliciter certaines quantités physiques ou pour corréler modèle physique et modèle analytique associé.

Renault VI a ainsi développé notamment l'application des techniques de traitement du signal temps/fréquence pour identifier le modèle acoustique de rayonnement moteur (Fig. 2, [3]), les méthodes de réciprocité pour identifier le modèle acoustique véhicule en bruit extérieur (Fig. 3, [4]), les méthodes expérimentales SEA pour identifier le modèle acoustique cabine en bruit intérieur. (Fig. 4, [5])

La figure 2 montre l'exemple d'une analyse de Wigner-Ville appliquée à différents points de mesure répartis au sein d'un moteur. L'objet de ces expérimentations est de comprendre de manière fine les mécanismes d'excitation et de transfert de cette structure, dans des conditions de fonctionnement réelles, de caractère fortement non stationnaire et non linéaire. L'analyse des signaux temporels permet d'extraire des informations pertinentes sur la cinématique de l'équipement mobile et sur ses relations avec les variations de pression et les paramètres temporels d'injection. L'analyse des signaux fréquentiels permet d'identifier des fréquences caractéristiques de modes de différentes parties de la structure. L'analyse temps-fréquence enfin permet d'observer des événements caractérisés par leur date d'arrivée, leur fréquence prépondérante, les résonances éventuelles, et d'approfondir la compréhension des phénomènes physiques.

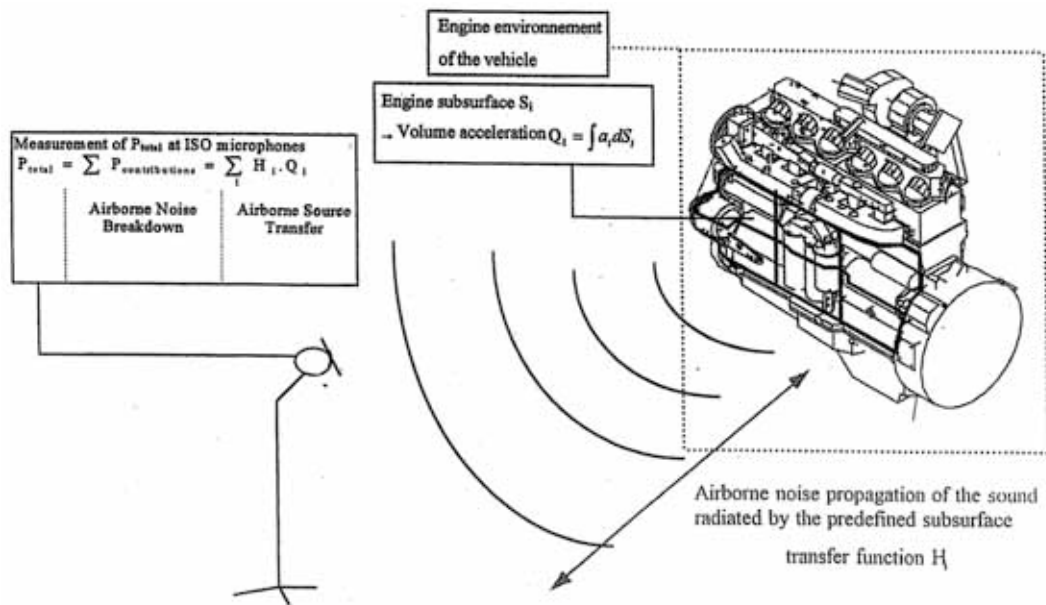


Fig. 3 : Principe de la méthode de quantification des sources (rayonnement moteur) par rapport au microphone de référence

Sur la figure 3, on montre le principe d'une méthode développée dans le cadre du projet européen PIANO et appliquée à la caractérisation de l'effet de rayonnement d'un moteur au bruit reçu par un microphone dans les conditions de la réglementation. Cette méthode nécessite la décomposition des surfaces du moteur en surfaces élémentaires. Pour chacune d'entre elles, on détermine son rayonnement acoustique élémentaire par un modèle de source

monopolaire décorrélée. On détermine, d'autre part, les transferts entre chacune de ces sources et le microphone de mesure par la méthode de réciprocité. La combinaison de l'énergie rayonnée et de son transfert au microphone détermine le niveau de pression sonore reçu pour chaque surface élémentaire. La méthode permet d'identifier et de hiérarchiser les émissions les plus significatives pour le bruit reçu.

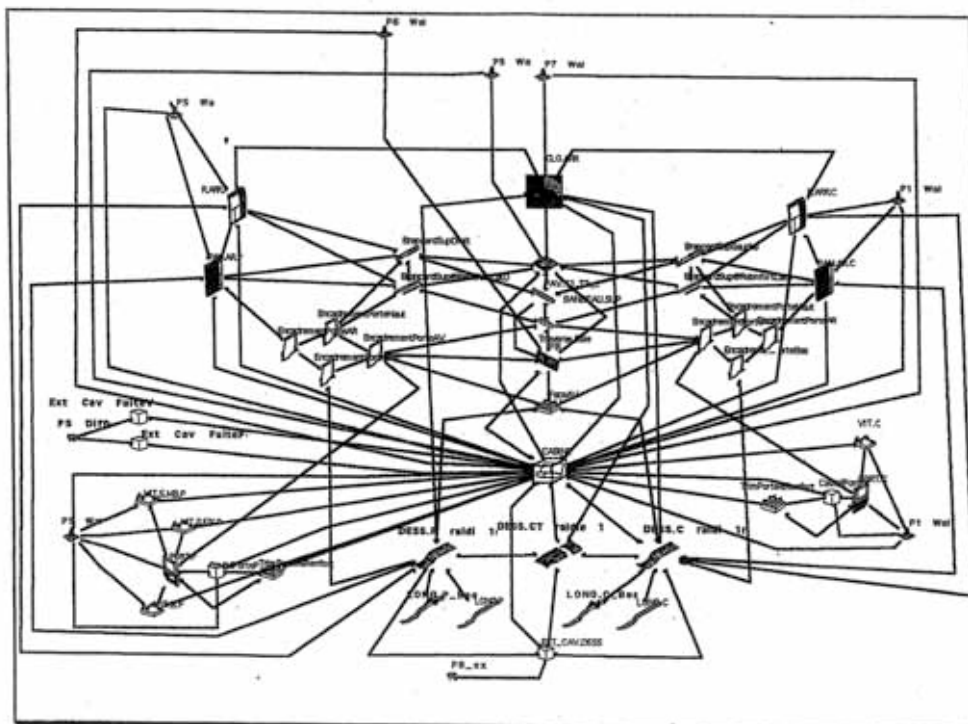


Fig. 4 : Schéma du modèle analytique SEA cabine excitée par des sources acoustiques extérieures

La figure 4 schématise le modèle SEA d'une cabine de véhicule établi à partir d'une approche hybride associant SEA expérimentale et SEA analytique. Un certain nombre de mesures est nécessaire pour caractériser les facteurs de couplage et d'amortissement, les niveaux sonores et les accélérations pour des niveaux d'excitation de référence, en excitation solidienne et en excitation aérienne. Ces mesures permettent de construire le modèle SEA et de le recalculer. Le modèle SEA est ensuite un outil utilisable pour action.

Ces méthodologies sont puissantes, mais d'usage restreint, car la difficulté de leur mise en œuvre les limite généralement à des cas d'analyse physique approfondie permettant de construire les modèles génériques à partir desquels sont développées des méthodes numériques, ou des méthodes expérimentales plus légères.

Il faut d'ailleurs souvent corréliser entre elles différentes démarches méthodologiques pour passer de la pièce au composant, du composant au véhicule, du banc à la piste.

Dans ce cas, les environnements acoustiques changent (champ libre/chambre anéchoïque/chambre réverbérante par exemple), ainsi que les conditions d'usage (stabilité/transitoire ou stationnaire/en mouvement, excitation forcée/libre).

Construction de la filière numérique : Pour chaque type de problème ainsi modélisé, pour chaque système acoustique, on cherche à construire la filière numérique associée. Celle-ci doit permettre :

- d'associer aux éléments du modèle acoustique (sources, transferts...) des éléments technologiques accessibles au concepteur,
- de développer, par un enchaînement judicieux d'outils numériques, la méthodologie de conception permettant aux différents concepteurs impliqués (le responsable du moteur, le responsable du châssis, le responsable de la cabine...) de dimensionner les éléments du véhicule selon un langage de concepteur et non pas un langage d'acousticien.

Lier l'acoustique à la technologie : Les caractéristiques acoustiques d'un élément d'un modèle acoustique sont directement liées à ses caractéristiques technologiques. Celles-ci sont le résultat de choix de conception (géométrie, matériau, conditions d'assemblage...) et d'industrialisation (tolérances géométriques, maîtrise du process industriel...). Relier les caractéristiques acoustiques aux caractéristiques technologiques est souvent délicat. Certains paramètres technologiques sont plus faciles à manipuler que d'autres : la géométrie, la matière, la masse, la raideur sont généralement simples à déterminer pour des structures homogènes. Il n'en est pas de même par exemple des conditions aux limites (chargements, chocs, frottements, pressions...) ou de l'amortissement.

Sur des structures non homogènes, la question est également plus difficile.

En conséquence, un travail d'analyse et de modélisation numérique permet de faire le lien entre les caractéristiques

acoustiques et les caractéristiques technologiques pour certains éléments du système, mais pas pour tous, et de manière généralement imparfaite. Il faut compléter ce travail par un travail expérimental permettant d'associer à l'acoustique des caractéristiques technologiques (par exemple, des modes de vibration d'une structure). Les outils numériques utilisés sont le plus souvent les outils de calcul de dynamique des structures, soit comportement vibratoire, soit rayonnement acoustique. Les outils ou combinaisons d'outils utilisables dépendent du domaine de fréquence acoustiques concerné (basses fréquences, moyennes et hautes fréquences). D'autres outils numériques, outils "métier", outils de spécialistes, portent sur la génération de bruit et permettent de définir les paramètres (d'ordre géométrique en général) afin de contrôler le bruit généré ou transmis dans les structures : calcul de l'erreur cinématique d'engrènement, de choc de piston, de l'atténuation d'un silencieux...

Le concepteur peut intervenir grâce à ces outils qui lui permettent de manipuler les paramètres technologiques qu'il maîtrise. Une fois traduits les objectifs acoustiques en objectifs technologiques, il peut se prononcer sur sa capacité à les satisfaire. Ceci peut concerner par exemple, la satisfaction d'une fréquence modale minimale pour une pièce complexe, ou d'une inertie, ou d'une épaisseur, ou d'une tolérance...

Développer la méthodologie de conception : Pour un nouveau projet, la méthodologie de conception suppose donc l'analyse globale du système acoustique selon ses différents éléments, l'affectation à chaque élément d'un objectif en termes acoustiques (en termes d'émission ou de filtration), puis, pour chacun de ces éléments, la traduction de l'objectif acoustique en objectif technologique et sa prise en compte dans la démarche conception/industrialisation.

Cette démarche fait intervenir d'une part l'acousticien, et d'autre part, les concepteurs des différents bureaux d'étude concernés. L'acousticien est chargé de l'analyse du système acoustique, et de sa synthèse. Les concepteurs sont chargés de leurs composants ou éléments de structure respectifs.

La méthodologie de conception peut par ailleurs s'envisager en deux étapes, une étape d'avant-projet pour mettre en place les concepts de base, et une étape de projet proprement dite afin de réaliser la conception détaillée. Pour chacune de ces étapes, il faut développer une méthodologie adaptée. Par exemple, on ne peut pas, en avant-projet, connaître la géométrie fine des structures, seulement leur géométrie globale. En revanche, au cours du projet, la mise à disposition de maquettes ou modèles numériques détaillés permet d'optimiser la conception en acoustique.

Enfin, pour reboucler la phase de conception, une phase de validation est nécessaire, pour assurer la synthèse acoustique de l'assemblage. A ce niveau-là, la mise au point acoustique détaillée requiert généralement l'intervention de l'acousticien avec des outils de diagnostic appropriés, et met en œuvre des solutions additionnelles qui émanent davantage de la technologie acoustique (absorption, isolement, amortissement, filtration).

Vers une intégration progressive calcul/essais

La maîtrise globale de la qualité acoustique des produits automobiles est donc le résultat d'un processus qui suppose une bonne connaissance de la physique globale du véhicule en termes de bruit et de vibrations, la détermination de critères acoustiques cibles, la décomposition en systèmes acoustiques individuels, leur identification, l'affectation d'objectifs par élément, la traduction de ces objectifs acoustiques en objectifs technologiques, et la réalisation de ces objectifs. Ce processus est largement évolutif.

Renforcer la filière de conception : Nous ne sommes pas encore parvenus à un stade où nous disposerions de l'ensemble des données, des outils et des compétences nécessaires pour concevoir et industrialiser "bien du premier coup" un produit présentant l'ensemble des performances requises en acoustique. Pour atteindre ces objectifs, il faut poursuivre le travail d'amélioration des différents outils et d'intégration de ces outils dans la filière de développement. Ce travail immense porte sur des questions aussi variées que la modélisation des systèmes acoustiques (en moyenne et haute fréquences), les problèmes numériques, la robustesse des outils, la disponibilité des données requises pour les utiliser, la maîtrise de la dispersion, les couplages entre composants, l'expertise à développer et son entretien.

Par exemple, la dispersion est inévitable du fait des cadences de production et la connaissance des paramètres dispersifs les plus influents, pour les mettre sous contrôle, n'est pas toujours acquise.

Les aspects statistiques sont donc très appréciables dans toute modélisation, et toute solution proposée doit être jugée également en fonction de sa robustesse. Il reste à réaliser un important travail qui permettrait d'évaluer un bruit sous forme de valeurs moyennes et d'écart-type, à partir de données directement reliées au processus de fabrication (erreurs minimales d'assemblage, variation des couples, de serrage des vis, de la composition des mastics...).

Ceci requiert la poursuite d'un travail associant mesures expérimentales et analyse numérique, pour faire du recalcage, fiabiliser les outils de calcul, leur donner la capacité de contrôler la dispersion, sur des structures réelles et non pas des cas académiques.

A la fin du processus, une étape de mise au point et de validation expérimentale finale est nécessaire.

Accompagner l'évolution du produit : Même si les connaissances et la méthodologie progressent de manière spectaculaire, les demandes augmentent également avec des cahiers des charges renforcés qui impliquent la prise en compte des phénomènes acoustiques jusqu'ici secondaires, et avec l'introduction de nouvelles technologies (électronique, matériaux, architectures, systèmes énergétiques...). Ces nouvelles demandes génèrent à leur tour des besoins nouveaux pour comprendre la physique des systèmes acoustiques concernés, d'où le besoin de méthodes expérimentales décrivant ces nouveaux systèmes, afin d'établir les données d'entrée nécessaires...

Renforcer les métiers : Des outils de plus en plus performants, des produits de plus en plus complexes, des durées de développement de plus en plus courtes : il faut accompagner et piloter ces évolutions fortes en renforçant l'expertise et les métiers. Ceci nécessite à la fois des spécialistes en bruit et vibrations capables de poursuivre les recherches ou approfondir les travaux en cours, et également aptes à mettre leur expertise au service de l'analyse physique des problèmes, mais aussi des généralistes sensibilisés aux questions de bruit et vibrations, pour assurer l'interface avec la conception et l'industrialisation.

En conséquence, il y a une dimension très importante sur les questions de la formation, du maintien et de l'enrichissement des compétences ; il s'agit d'un challenge fondamental sur le plan des ressources humaines, nécessaire pour assurer le transfert réussi vers les utilisateurs et les applications, en traitant les aspects économiques et culturels.

Références bibliographiques

[1] Bernard Favre, Jacques Lambert, Jean Delsey, Perspectives de réduction du bruit des véhicules routiers pour 1985 et 2000, compte tenu des possibilités techniques, de la consommation énergétique, et du coût, Rapport EUR 8 573 EN, FR CCE - Contrat U/80/168, 1983

[2] Bernard Favre, John Tyler, Quiet Vehicle Development-Transportation noise Reference Book, Chapter 8 Butterworths, 1987

[3] Monique Chiollaz, Bernard Favre, Caractérisation fine de bruits moteurs par analyse temps-fréquence de Wigner-Ville. Traitement du signal volume VIII, n° 5, p 301-318, 1992

[4] P. J. G Van Den Linden, Hervé Defay, Jean-Pierre Le Matret - Truck pass-by noise, detailed contribution, identification during ISO 362 Pass-By - ISMA proceedings, Leuven, 1996

[5] Gérard Borello, Predicting noise transmission in a truck cabin using the statistical energy analysis approach. IUTAM Symposium on SEA, ISVR Southampton, July 1997

