

L'acoustique au quotidien !

L'acoustique est présente au quotidien à la fois sous un bon côté, avec la musique par exemple ou encore la communication parlée, mais elle est aussi souvent perçue comme une gêne avec le bruit. TECHNICA a déjà plusieurs fois abordé le thème de l'acoustique et, pour ce numéro, nous avons choisi de mettre plutôt l'accent sur l'aéroacoustique, en nous intéressant donc aux sources de bruit d'origine aérodynamique liées à la pollution sonore de notre environnement, et à un aspect peut-être plus obscur de l'acoustique !



Christophe Bailly (90)
Docteur de l'ECP, 1994

Christophe.bailly@ec-lyon.fr

Depuis 1995 : Enseignant chercheur à l'ECL

2007 : Membre junior de l'Institut Universitaire de France

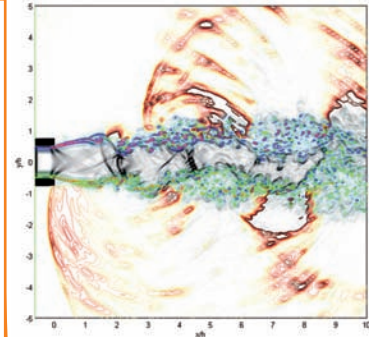
Le domaine d'application le plus connu de l'aéroacoustique est certainement l'aéronautique et le spatial. L'aéroacoustique est en effet la discipline qui étudie le bruit des écoulements, comme les jets qui sortent des moteurs d'un avion à réaction par exemple, les écoulements les plus rapides étant généralement les plus bruyants. Les premières théories en aéroacoustique publiées au début des années 1950 sont d'ailleurs étroitement liées au développement du transport aéronautique commercial. Le premier vol commercial sur un avion à réaction a été réalisé le 2 mai 1952 entre Londres et Johannesburg par un De Havilland Comet 1. On renvoie le lecteur intéressé au site internet de la British Overseas Airways Corporation (BOAC), <http://www.bamuseum.com/>, pour plus d'informations. C'est donc assez naturellement que l'on va retrouver dans ce numéro une contribution d'un motoriste. On propose également avec l'encadré d'illustrer quelques réalisations récentes effectuées sur ce sujet phare au Centre Acoustique de l'ECL, au sein du Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique (LMFA, UMR CNRS 5509).

L'aéroacoustique est également très présente dans l'industrie des transports terrestres. Le confort dans l'habitacle d'une voiture et l'utilisation intensive de la reconnaissance vocale nécessitent par exemple d'avoir un niveau de bruit « acceptable ». Des moyens expérimentaux et numé-

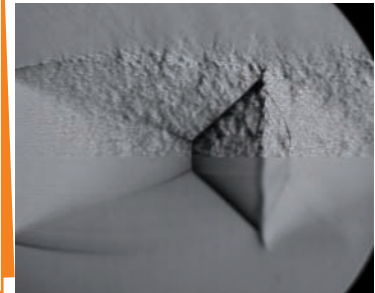
riques très importants ont été mis en œuvre ces dernières années pour résoudre ces problèmes de bruit, comme cela va être illustré dans la suite de ce numéro. L'aéroacoustique n'est pas seulement présente dans le domaine des transports, et c'est un point important à souligner, mais aussi dans beaucoup de configurations internes, dans les tuyaux pour faire simple. Cela va des conduits de ventilation au transport de fluides dans l'industrie chimique et pétrolière, et cette problématique va également être illustrée ici avec le transport de la vapeur dans les centrales produisant de l'électricité.

Deux autres contributions viennent compléter ce numéro avec l'amélioration de l'acoustique de salles de spectacle existantes par intégration de systèmes de contrôle actif, et avec les activités d'une moyenne entreprise effectuant ses prestations dans le domaine de l'acoustique et des vibrations. C'est ici l'occasion de souligner le côté multidisciplinaire et transversal de l'acoustique, qui se manifeste aussi pour l'aéroacoustique avec le traitement du signal, la mécanique des fluides, le couplage avec les structures ou bien encore les mathématiques appliquées pour la simulation numérique. Cette tribune me donne également l'opportunité de mentionner le rôle essentiel de Geneviève Comte-Bellot dans la communauté internationale, et dont le laboratoire vient de fêter les 50 ans de recherche en turbulence et en acoustique. ●

Ci-contre, résultat d'une simulation d'un jet supersonique rectangulaire non adapté, c'est-à-dire contenant des ondes de choc afin d'adapter la pression du jet à celle du milieu extérieur. On distingue en gris les gradients de masse volumique, en vert et bleu le champ de vorticité associé à la turbulence, et en couleur rouge le champ de pression rayonnant principalement dans la direction amont par rapport à la direction principale de l'écoulement.



Ci-contre, image Schlieren ou strioscopique d'un jet supersonique rond également choqué dans la grande chambre sourde du laboratoire. Cette visualisation permet de marquer les gradients de masse volumique. La moitié haute est une vue instantanée alors que la moitié basse de l'image a été obtenue après moyenne temporelle. Ces problématiques associées aux jets choqués se rencontrent sur les moteurs militaires, en accélérant la fatigue de la structure, et aussi sur les moteurs modernes d'avions commerciaux en condition de croisière.



Julien Berland, Thomas Castelain, Christophe Bogey & Christophe Bailly,
LMFA UMR CNRS 5509

Colloque

**Colloque en l'honneur de Geneviève Comte-Bellot, professeur émérite de l'Ecole Centrale de Lyon,
« Fifty Years of Research on Turbulence and Acoustics », les 29 et 30 octobre 2009.**



Les participants au colloque

Ce colloque a rassemblé environ 140 participants qui pendant 2 jours ont discuté turbulence, acoustique et chaos. L'atmosphère de ces deux journées a été très agréable de part la raison d'être de cette manifestation bien sûr, mais aussi peut-être, au-delà de la qualité des différents exposés, à cause des discussions scientifiques très libres qui ont pris place à la fin des interventions sur des sujets pointus et souvent très sensibles concernant la modélisation de la turbulence... Une réception était

organisée le jeudi soir en haut de la tour de la Part-Dieu afin de faire profiter de la vue de Lyon « by night » à nos hôtes étrangers, et le colloque a été clôturé avec un banquet le vendredi soir dans le grand réfectoire de l'Hôtel-Dieu, après une visite du musée de médecine des hospices civils de Lyon.

Les transparents des différents exposés sont accessibles à l'adresse suivante : <http://acoustique.ec-lyon.fr>

L'aéroacoustique dans le domaine automobile

Les différentes problématiques d'aéroacoustique rencontrées dans le domaine automobile sont abordées avec un focus particulier sur le bruit intérieur issu des sources d'origine aérodynamique générées par l'écoulement turbulent externe. Un exemple d'outil expérimental et les travaux actuels sur les modélisations numériques sont également présentés.



Denis Ricot (99)
Ingénieur-Docteur
de l'ECL

denis.ricot@renault.com

Direction de la Recherche,
des Etudes Avancées et
des Matériaux

Technocentre Renault

- 1 Soufflerie aéroacoustique S2A. Le portique permet de placer deux antennes acoustiques : une sur le côté et une au-dessus du véhicule.
- 2 Exemple de cartographie de sources aéroacoustiques mesurée en soufflerie S2A par antennerie acoustique sur une Laguna.
- 3 Simulation du bruit généré par un aérateur de système de ventilation. L'image montre le champ de vorticités pour un instant donné. Le signal acoustique du bruit rayonné en aval est capté directement et son spectre est comparé à la mesure.

Dans l'industrie automobile, les phénomènes aéroacoustiques rencontrés sont très variés. Les problèmes du bruit généré par les ventilateurs (le ventilateur de refroidissement moteur ou le ventilateur de climatisation) sont des exemples de bruit de machines tournantes. Les bruits de turbocompresseur (bruit de « souffle » et sifflement) sont d'autres exemples de problématiques qui se rapprochent le plus des problématiques aéronautiques. On rencontre aussi des problèmes de bruit de jet : pour des régimes moteur élevés, les vitesses d'air sont assez importantes en sortie de canule d'échappement, ce qui peut produire un bruit de jet perçu dans l'habitacle.

Les écoulements dans le domaine automobile se caractérisent cependant par des vitesses relativement faibles, mais le bruit généré par ces écoulements peut-être perçu comme une nuisance quand on le met en regard des niveaux acoustiques de confort que l'on atteint aujourd'hui dans les habitacles. Par exemple, les écoulements dans les conduits de climatisation doivent rester le plus propre possible afin d'éviter la génération de sources se propageant dans ces conduits qui débouchent directement dans l'habitacle. Or l'encombrement assez important à l'intérieur des planches de bord nécessite parfois de dessiner des conduits fortement irréguliers (coudés, marches locales, contractions brusques...) générant des décollements/recollements multiples susceptibles de créer des sources non négligeables.

L'écoulement turbulent externe : principale source de bruit d'origine aérodynamique perçu dans l'habitacle

Le bruit intérieur issu de l'écoulement turbulent extérieur est un des axes de travail principaux des aéroacousticiens dans le domaine automobile : il participe à l'ambiance sonore du véhicule dès 90 km/h et il est prépondérant à 130 km/h. Le bruit d'origine aérodynamique est généralement large bande : les émergences fréquentielles, même de niveau très faible, sont toujours perçues comme étant très gênantes et sont donc l'objet d'études particulièrement poussées. Pour comprendre la nature des sources de bruit d'origine aérodynamique entendu dans l'habitacle, il faut se pencher sur la problématique de l'isolation de l'habitacle vis-à-vis de l'extérieur. La voie de passage prédominante des bruits d'origine aérodynamique est les parties vitrées. L'excitation des vitrages se fait par deux types de champ de pression : le champ de pression aérodynamique (appelé parfois pseudo-son) généré par la convection des structures tourbillonnaires en proche paroi et le champ de pression acoustique généré par les zones sources de l'écoulement turbulent, situées éventuellement assez loin du vitrage lui-même. Son niveau est en général deux à trois ordres de grandeur plus faible que celui du champ de pression aérodynamique mais il est caractérisé par des longueurs d'onde et des longueurs de corrélation beaucoup plus grandes

(typiquement plusieurs dizaines de centimètres). Les longueurs d'onde de flexion des vitrages entrant en jeu dans le mécanisme de transparence vibro-acoustique étant également de plusieurs dizaines de centimètres, la capacité des ondes acoustiques à traverser les vitrages est très supérieure à celle du champ de pression aérodynamique. Ainsi, un champ pariétal acoustique de niveau inférieur de 20 ou 30 dB au niveau du champ pariétal de pression aérodynamique peut contribuer de manière significative, sinon dominante, au bruit intérieur. Ce résultat non intuitif est une des principales difficultés de l'étude des problématiques d'aéroacoustique dans le domaine automobile, tant sur le plan de la caractérisation expérimentale que numérique des champs pariétaux de pression.

Les outils expérimentaux et les modélisations numériques

Afin d'identifier les principales sources acoustiques créées par l'écoulement turbulent autour d'un véhicule, les constructeurs automobile utilisent des techniques d'antennerie acoustique. A partir de réseaux de plusieurs dizaines de microphones, les sources de bruit sont estimées sur des plans de focalisation par des algorithmes de formation de voies.

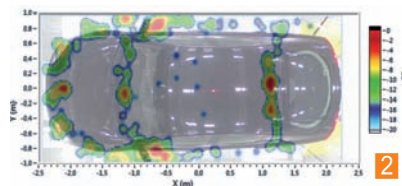


La soufflerie aéroacoustique S2A [1] située à Montigny-le-Bretonneux dans les Yvelines s'est récemment dotée d'un système d'imagerie acoustique performant permettant de réaliser des cartographies de sources sur la face latérale du véhicule mais aussi sur la face supérieure comme le montre la figure [2].

Dans le domaine de la simulation numérique, la complexité et la variété des topologies d'écoulement rencontrées ne permettent pas l'utilisation

Une voiture, ça décolle

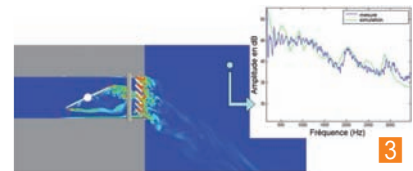
Les formes globales et locales du véhicule sont à l'origine de décollements et recollements multiples qui sont les principaux phénomènes responsables des champs de pression pariétaux aérodynamiques et acoustiques. Les plus petits décollements sont générés par les désaffleurements locaux présents au niveau des coulisses ou lécheurs de vitres latérales ou sur le bord du pare-brise. Certains accessoires comme les balais d'essuie-vitres, les antennes, les rétroviseurs viennent perturber l'écoulement plus violemment. Enfin, les formes globales comme le changement brusque d'angle entre le pare-brise et le côté de caisse constituent des zones sources très étendues.



de modèles simplifiés qui pourraient être recalés sur des configurations de référence : les simulations aéroacoustiques dans le domaine automobile sont généralement basées sur des simulations instationnaires visant à calculer de manière directe les mécanismes de source. Bien entendu les puissances de calcul actuelles ne permettent pas, pour l'instant, d'obtenir les champs instationnaires turbulents sur la totalité du spectre utile. De plus, comme on l'a vu précédemment, le champ aérodynamique ne suffit pas pour caractériser l'excitation des parois : le champ acoustique doit être également calculé. On se heurte ici à une difficulté très importante. En effet, contrairement aux cas aéronautiques, les points d'observation ne sont pas placés en champ lointain, à l'extérieur des zones sources : les points « d'observation » utiles sont les points sur les parois et sont donc situés très près, si ce n'est à l'intérieur, des zones sources elles-mêmes. Les modèles classiques de calcul hybride basés sur les analogies acoustiques ou les méthodes d'extrapolation des champs acoustiques sont donc en général inexploitable. L'adaptation de ces modèles aux problématiques automobile reste un domaine de recherche encore ouvert à l'heure actuelle.

Pour contourner cette difficulté majeure certains industriels, tels que Renault par exemple, tentent des approches de calcul direct des

sources et de leur rayonnement à l'aide de simulations instationnaires compressibles. La méthode de simulation appelée Boltzmann sur Réseau, qui est une alternative aux méthodes Navier-Stokes, semble donner des résultats



probants. La figure [3] montre un exemple de simulation du bruit généré par un aérateur automobile, réalisée à l'aide de cette méthode numérique. Le signal de pression acoustique est capté en aval de l'aérateur et peut être comparé directement à une mesure microphonique réalisée au même point. ●

La fuite : l'ennemi numéro un de l'aéroacousticien automobile

Les décollements de l'écoulement, par exemple celui se créant au niveau du montant métallique situé entre le pare-brise et la vitre latérale avant, créent des dépressions statiques importantes sur les portes qui tendent à s'écarter de leur position nominale. Ce déport réduit le taux de compression du joint entraînant parfois la création d'une fuite. En plus de la dégradation très importante de la performance en isolation due à cette fuite acoustique, les différences de pression statique entre l'extérieur et l'intérieur de l'habitacle peuvent créer un écoulement de type jet très localisé générant des sifflements très désagréables.

Vers des moteurs d'avion toujours plus silencieux

L'estimation des émissions acoustiques au cours de la conception des moteurs d'avion devient une phase essentielle à SNECMA. De nombreux efforts sont en effet entrepris pour prévoir les niveaux de bruit de chaque partie du moteur, mais également pour développer des concepts de plus en plus silencieux.



Guillaume Bodard
Ingénieur ENSMA 2009

guillaume.bodard@sneema.fr

Doctorant en aéroacoustique,

SNECMA Villaroche,
Département acoustique

Laboratoire de Mécanique des Fluides
et d'Acoustique de l'ECL

Bref historique

Le bruit d'un avion est issu de nombreuses sources qui peuvent être regroupées en deux familles : le bruit aérodynamique avion et le bruit moteur. Le premier est induit par l'écoulement d'air sur la structure de l'avion et tous ses composants (voilure, empennage, trains d'atterrissage...). Le second est, quant à lui, constitué de nombreuses sources issues des parties tournantes (fan, compresseur, turbine), mais également de la combustion et du jet.

Le bruit moteur a été considérablement réduit depuis les années 50 [1], par deux évolutions technologiques majeures. La première est le passage du turbojet au turbofan dans les années 70, séparant ainsi le flux d'entrée en deux flux avec des vitesses d'éjection plus faibles. Plus particulièrement, ce changement d'architecture a permis de réduire notablement le bruit de jet, c'est-à-dire de l'écoulement d'air en sortie de tuyère. Plus récemment, l'augmentation du taux de dilution des

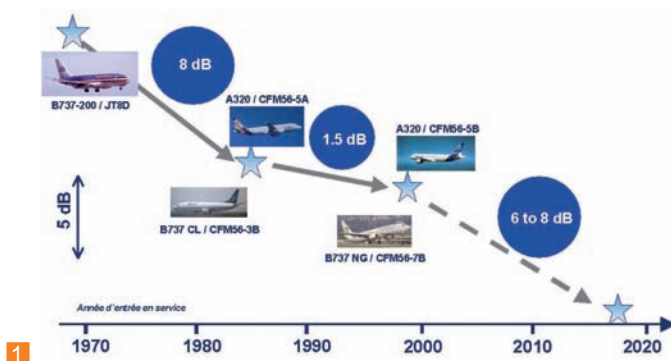
moteurs - correspondant au rapport des débits entre les flux secondaire et primaire - a permis de réduire encore davantage les niveaux de bruit moteur. Cependant les efforts à entreprendre restent conséquents, le programme européen ACARE fixant pour objectif la réduction de 50 % du bruit perçu d'ici 2020, pour pallier notamment à l'augmentation du trafic aérien.

Des normes de certification de plus en plus restrictives

...

Les avions sont soumis à des normes de certification acoustique définies par l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI) et référencées dans l'annexe 16 de la convention relative à l'aviation civile internationale. Des mesures acoustiques sont ainsi réalisées en trois points reliés aux conditions de décollage, de survol et d'approche de l'appareil. Plusieurs corrections sont alors effectuées afin de prendre en compte l'absorption atmosphérique ou encore la sensibilité de l'oreille humaine, pour aboutir aux niveaux de bruit EPNL (Effective Perceived Noise Level) exprimés en EPNdB, grandeur de référence pour la certification acoustique. Depuis janvier 2006, la norme de certification en vigueur est appelée « Chapitre 4 ». Cette norme est nettement plus sévère que la précédente, demandant une réduction supplémentaire de 10 EPNdB sur les niveaux de bruit sommés sur les trois points de certification.

1 Evolution globale des niveaux de bruit par point depuis les années 70.



... qui nécessitent des travaux de recherche perpétuels ...

Les nuisances sonores et polluantes induites par les avions sont au cœur des problématiques environnementales des motoristes. Ainsi, les programmes de recherche, qu'ils soient internes, nationaux ou internationaux, se multiplient afin de réduire ces émissions. Le programme européen VITAL en est un exemple récent (voir encadré).

Les évaluations numériques sont les plus employées, et des calculs de plus en plus complexes sont réalisés, intégrant l'influence du pylône et de l'aile dans la modélisation. D'autre part, des simulations instationnaires (calculs chorochroniques et simulations des grandes échelles) sont désormais effectuées pour évaluer le rayonnement acoustique avec un degré de modélisation plus faible, nécessitant en contrepartie des temps de calcul supérieurs.

Ces estimations numériques sont très utiles et permettent des études paramétriques assez précises. Elles nécessitent toutefois des essais expérimentaux complémentaires. C'est pourquoi de nombreux essais en soufflerie anéchoïque sont réalisés, notamment pour évaluer le bruit de jet [2]. Dans ce type d'essais, les effets d'interaction entre le jet et l'aile sont par exemple étudiés, tout comme les réductions de niveaux sonores introduites par des dispositifs géométriques (chevrons) ou fluidiques (microjets) positionnés en sortie de tuyère. D'autres essais plus avancés sont réalisés sur moteur à échelle 1 dans des bancs d'essais à l'air libre [3].

Ces essais sont très utiles car ils permettent d'obtenir le rayonnement acoustique du moteur dans sa globalité, contrairement aux essais à échelle maquette qui sont dédiés à l'étude d'une source particulière.

Enfin, le dernier type d'essais est réalisé en vol sur avion, et est bien évidemment beaucoup moins fréquent car nettement plus coûteux.

... conduisant à de nouveaux concepts

Les programmes de recherche sont également à l'origine de l'étude de nouveaux concepts de moteurs d'avion. Parmi ces concepts, les open-rotor [4], déjà étudiés dans les années 80, sont remis au goût du jour car ils permettraient de réduire la consommation de carburant de 20 %. Le rayonnement acoustique de ce type de moteur est cependant assez marqué car les aubes ne sont pas carénées, contrairement aux moteurs conventionnels actuels. D'autres architectures de moteurs sont également étudiées ; citons par exemple les moteurs à soufflantes contra-rotatives carénées, dont le principal intérêt est de réduire les niveaux de bruit.

La recherche en acoustique : un domaine pluridisciplinaire

En conclusion, le métier d'ingénieur acousticien en Recherche&Développement permet de participer à la fois à des études numériques (mise en place de calculs complexes, études paramétriques pour la recherche d'optimums...) et expérimentales (conduite d'essais en soufflerie ou en banc d'essais, dépouillement et analyse des résultats...) et ainsi d'acquérir une expérience pluridisciplinaire très formatrice. Le cursus proposé à l'ECL dans ce domaine, que ce soit l'année de spécialisation ou même les doctorats réalisés au Centre Acoustique, est parfaitement adapté et contribue à la construction de bases très solides pour l'intégration en entreprise. ●



2 Soufflerie CEPRA19 (ONERA).

3 Banc d'essais à l'air libre (Peebles).

4 Vue d'artiste d'un open-rotor (SNECMA)

VITAL (*EnVironmentALLY Friendly Aero-Engine*) est un programme européen de quatre ans mené par SNECMA avec un budget global de 90,9 millions d'euros, dont 50,7 financés par la Commission Européenne. Ce programme illustre parfaitement les efforts conjoints effectués par les motoristes et avionneurs européens, 53 partenaires étant recensés dans ce projet. L'objectif est de développer des moteurs à très grand taux de dilution, ce qui permettrait de réduire le bruit de 5 à 8 dB, tout en réduisant les émissions de CO₂. Ces travaux sont réalisés à la fois numériquement et expérimentalement.

L'aéroacoustique au service de la maîtrise du bruit et des vibrations dans les centrales EDF

La maîtrise du bruit et des vibrations est une préoccupation industrielle pour le groupe EDF dans la gestion de son parc de production d'électricité. La direction R&D de Clamart (92) développe des outils numériques et expérimentaux d'analyse des phénomènes de sifflements, résonances ou couplages d'origine aéroacoustique.



Fabien Crouzet (99)

2000 : Ingénieur Chercheur, EDF R&D
Depuis 2009 : Chef de projet



Philippe Lafon (84)
Ingénieur ENSEEIHT

1988 : Ingénieur Chercheur, EDF R&D
1996 : Chef de groupe
Depuis 2003 : Ingénieur Senior



Hélène Henry (94)

1998 : Ingénieur de recherche en acoustique
1999 : Ingénieur Chercheur puis Chef de projet, EDF R&D
Depuis 2008 : Chef du groupe Acoustique, Vibrations sous Ecoulement et Dynamique des Machines

1 Salle des machines d'une centrale nucléaire de type REP (Réacteur à Eau Pressurisée)

Les installations industrielles d'EDF soumises à des problèmes aéroacoustiques sont principalement les tuyauteries vapeur du circuit secondaire des centrales nucléaires ou thermiques. Les organes de contrôle et de réglage (vannes, soupapes...) de ces circuits perturbent les écoulements, générant des taux de turbulence élevés. Les zones de forte turbulence ainsi créées constituent alors autant de sources de bruit. Or, si les écoulements de fluides légers comme la vapeur n'engendrent généralement pas d'excitations nuisibles en elles-mêmes, ils sont toutefois susceptibles de générer des phénomènes violents lorsque ces excitations sont couplées à des résonances acoustiques.

Dans ces circonstances, des sources aéroacoustiques très énergétiques peuvent apparaître sous la forme de sifflements ou d'accrochages entre l'écoulement et des résonances acoustiques. Ces sources concernent aussi bien les écoulements subsoniques que transsoniques qui, dans le cas d'organes à fort taux de détente, sont associées à la présence d'ondes de choc. Ces phénomènes peuvent générer des vibrations nuisibles pour les installations ou des niveaux acoustiques excessifs à proximité de ces mêmes installations. De plus, de tels phénomènes apparaissent de manière non prévisible, ce qui peut perturber l'exploitation industrielle des centrales.



Un double enjeu pour EDF : respect de l'environnement et maîtrise des vibrations

Dans ce contexte, EDF veille à minimiser le bruit émis par ses installations et à maîtriser le comportement vibratoire des principaux matériels exploités dans les centrales.

Sur le site R&D de Clamart (92), le département *Analyses Mécaniques et Acoustique* (AMA) a donc développé une compétence en aéroacoustique, avec une double approche numérique et expérimentale. L'activité est portée par le groupe *Acoustique, Vibrations sous Ecoulement et Dynamique des Machines*, qui s'appuie principalement sur deux outils : l'outil de calcul *Code_Safari* et le banc d'essais *Clarinette*.

Clarinette, un banc d'essais utilisé pour des mesures sur maquettes à échelle réduite

La voie expérimentale est indispensable pour l'établissement d'un diagnostic, mais aussi pour la compréhension des problèmes de bruit ou de vibrations d'origine aéroacoustique. Etant donnée la

difficulté d'effectuer des mesures sur sites, le groupe s'appuie alors sur la réalisation d'essais en laboratoire. Ces essais servent également à valider les modèles de calcul numérique.

Le banc d'essais Clarinette est constitué de deux veines d'essais en air, l'une de section rectangulaire, l'autre de section circulaire. Il est utilisé pour tester des maquettes à échelle réduite d'organes industriels avec des rapports de pression représentatifs de ceux rencontrés sur sites. Il est particulièrement bien adapté aux configurations présentant de forts taux de détente.

Plusieurs types de mesures sont mises en œuvre. La méthode d'intensimétrie acoustique est utilisée pour évaluer le bruit de turbulence généré par les organes de régulation (vannes, diaphragmes...). Elle consiste à mesurer le bruit généré de part et d'autre de la singularité au moyen de deux triplets de microphones, puis d'en déduire la puissance acoustique de l'organe testé.

La veine rectangulaire, transparente, permet également des mesures fines du champ de vitesse par méthode PIV (Particle Image Velocimetry) : l'écoulement étant préalablement ensemençé à l'aide de particules de fumée, la méthode consiste à reconstruire le champ de vitesse fluide à partir d'images successives d'un plan de la maquette, éclairé à l'aide d'un laser.



Code_Safari, un code de simulation numérique dédié à l'aéroacoustique

La voie numérique est explorée de manière complémentaire à la voie expérimentale. Dans un premier temps, les calculs sont confrontés à l'expérience sur des maquettes en air (banc Clarinette). Une fois les méthodes validées, les calculs sont alors entrepris dans une configuration réelle avec des écoulements de vapeur représentatifs des conditions sur sites.

Pour ce faire, le groupe a développé un outil de calcul, *Code_Safari*, dédié à la simulation des phénomènes aéroacoustiques. Les équations résolues sont celles de la mécanique des fluides compressibles. Toutefois, les phénomènes à reproduire sont complexes car il faut capter à la fois les grandeurs liées à l'écoulement et celles liées à l'acoustique, qui sont de nature différente. Les méthodes classiquement utilisées pour la simulation des écoulements ne sont alors pas adaptées. C'est pourquoi il est indispensable d'utiliser des méthodes de calcul spécifiques, telles que celles développées par l'équipe d'aéroacoustique numérique du *Centre Acoustique* du LMFA (Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique) de l'Ecole Centrale de Lyon. EDF collabore depuis plusieurs années avec cette équipe, notamment au travers de thèses cofinancées.

Enfin, la complexité des phénomènes recherchés nécessite de calculer les plus petites structures turbulentes de l'écoulement et par conséquent de discrétiser très finement les domaines de calcul. Il en résulte des calculs très lourds. Néanmoins, le développement récent des puissances de

calcul et le recours massif au calcul parallèle, rendent aujourd'hui accessibles des simulations numériques jusqu'alors invisibles.

EDF utilise pour cela les moyens de calcul du Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) et dispose également de ses propres calculateurs massivement parallèles (clusters IBM BlueGene), ce qui place l'entreprise dans le peloton de tête mondial en termes de capacité de calculs.

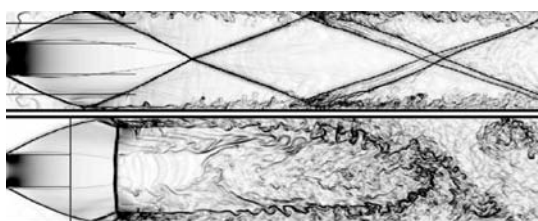
L'aéroacoustique, une discipline transverse porteuse de développements

Les outils et méthodes développés à EDF en aéroacoustique font appel à un large éventail de compétences, depuis les techniques de mesures des écoulements ou le traitement du signal, jusqu'à l'acoustique, la mécanique des fluides, mais aussi les méthodes numériques, l'informatique et le calcul haute performance.

Cela fait de l'aéroacoustique une activité réellement transverse dont les méthodes inspirent de plus en plus des disciplines connexes comme l'aéroélasticité ou la simulation de la turbulence.

Nul doute qu'elle passionnera encore des générations de jeunes ingénieurs et chercheurs et qu'elle contribuera à améliorer la compréhension des phénomènes d'accrochages, d'instabilités ou d'autres résonances, observés dans les écoulements. ●

2 Mesures de bruit généré par un diaphragme sur le banc d'essais Clarinette d'EDF R&D à Clamart, Octobre 2009.



Calcul de l'écoulement à travers un élargissement brusque, réalisé avec *Code_Safari* (visualisation Schlieren du gradient de masse volumique).

La configuration étudiée est typique des écoulements rencontrés à l'aval des organes à fort taux de détente. L'écoulement est fortement turbulent et transsonique. On remarque en particulier la présence d'ondes de choc et le développement de structures tourbillonnaires à partir des parois.

L'acoustique active

des salles de spectacle

L'utilisation des salles de spectacle est très diversifiée. Dans une même salle, on peut voir une pièce de théâtre un soir, le dernier groupe à la mode le lendemain, ou un orchestre symphonique un autre jour. Mais d'un point de vue acoustique, chacun de ces spectacles nécessite une acoustique particulière. Des moyens de variabilité existent, et en particulier des solutions « actives ».



Christophe Rougier (07)
Master Recherche
MEGA Acoustique

christophe.rougier@cstb.fr

2007 : Ingénieur Etudes et Recherche au Département Acoustique et Eclairage du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) à Grenoble.

Depuis l'époque romaine et des amphithéâtres, bien connus pour leur acoustique parfaitement adaptée aux pièces de théâtre de l'époque, l'homme cherche à adapter l'acoustique d'un lieu au spectacle qu'il accueille. Parallèlement, et peu à peu, la science de l'acoustique des salles s'est développée avec un pas important fait à la fin du 19^{ème} siècle par Wallace Clement Sabine. Il relia par une formule le temps de réverbération d'une pièce (voir encadré) à sa géométrie et à ses matériaux. Cette formule est d'ailleurs maintenant appelée « formule de Sabine ». Cette théorisation de l'acoustique des salles (ou acoustique architecturale) a permis par la suite d'étudier des possibilités de variation de l'acoustique.

La polyvalence : une nécessité

Du point de vue économique, les gérants de salles de spectacle offrent souvent aux spectateurs une programmation la plus variée possible, le but étant d'exploiter le lieu au maximum. Ainsi, il est courant d'assister dans une même salle à une pièce de théâtre, un concert de rock, de jazz, ou de musique classique. On parle alors de salles polyvalentes. Seulement, du point de vue acoustique, il n'est pas idéal de recevoir tous types de spectacles dans une salle dont l'acoustique est figée. En effet, chaque type de spectacle — et plus particulièrement chaque genre de musique — néces-

site un environnement sonore spécifique caractérisé entre autre par le temps de réverbération. Ainsi par exemple, une réverbération faible (0,5 s à 1 s) est souhaitable pour le théâtre ou la musique « amplifiée », alors qu'une réverbération plus ample (1,8 s à 2,2 s) et plus riche en basses fréquences est appréciée pour la musique symphonique. Si on prend le cas limite d'une église — où le temps de réverbération est très élevé — ce lieu n'est pas adapté pour accueillir un concert de musique amplifiée... pourtant ce type de lieu est très apprécié des chorales où l'ampleur du son vient supporter les voix des chanteurs ! On le voit, chaque spectacle nécessite idéalement une acoustique adaptée.

La plupart du temps l'acoustique de la salle est conçue pour être « moyenne » : on cherche alors un compromis permettant de recevoir une grande variété de spectacles dans des conditions acceptables.

La variabilité acoustique au service de la polyvalence

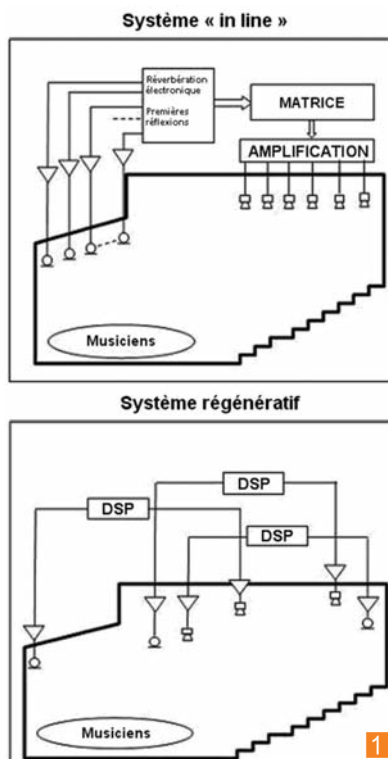
Il existe toutefois des techniques de variabilité pour adapter l'acoustique d'une salle au spectacle qu'elle accueille. Avant le développement des techniques électroacoustiques, il n'existait que des solutions « passives » de variabilité. Elles consistent à modifier le temps de réverbération en jouant notamment sur l'absorption acoustique des matériaux présents dans la salle. On

fait alors appel à des réflecteurs, des panneaux mobiles, des rideaux absorbants, des conques d'orchestre, et parfois même à des parois ou plafonds mobiles. Ces techniques sont toujours utilisées car très simples et robustes par principe. Mais elles présentent des inconvénients liés à leur mise en place (déplacement de lourdes pièces mécaniques notamment).

L'acoustique active pour plus de variabilité

L'idée a alors été lancée d'utiliser des moyens électroacoustiques (microphones, haut-parleurs) pour contrôler ou améliorer l'acoustique d'une salle. Cette idée est aussi ancienne que le développement des techniques électroacoustiques elles-mêmes. Il a fallu attendre les années 1960 pour voir apparaître la première réalisation d'un système appelé AR (Assisted Resonance), installé en un seul exemplaire au Royal Festival Hall de Londres et conçu et développé par le Prof. Peter PARKIN. Huit années plus tard, en 1968, la société Philips a proposé un système MCR (Multiple-Channel amplification of Reverberation), créant le premier système commercialisé. Comme le système AR, ce système était basé sur un principe régénératif, le champ sonore étant amplifié par recirculation multiple dans une centaine de canaux électroacoustiques indépendants (microphones, haut-parleurs) dispersés dans la salle. Depuis, d'autres systèmes régénératifs ont été développés, comme le système CARMEN du CSTB. Les plus performants permettent de doubler le temps de réverbération, ce qui signifie passer d'un TR de 1 s à 2 s. Une salle plutôt typée « musique amplifiée » est alors adaptée pour recevoir de la musique classique.

Avec l'apparition des techniques de traitement numérique des signaux dans les années 80, d'autres systèmes ont ensuite été développés. Ces systèmes, bien que présentant quelques différences notables, sont basés sur le même principe dit « en ligne » par référence à l'anglais, qui consiste à prendre les sons originaux le plus près possible des sources



sonores, de les réverbérer et les retarder électroniquement dans un certain nombre de canaux (de quelques unités à une vingtaine environ) et de les reproduire sur un très grand nombre de canaux d'amplification (pouvant aller jusqu'à plus de 250) répartis tout autour de la salle et au plafond. L'intérêt de ce type de système est qu'il est possible d'ajouter un grand nombre d'effets audio.

Globalement on peut considérer que tous ces types de systèmes effectuent un ajustement de l'absorption acoustique de la salle. Ainsi, en modifiant les paramètres électroniques de réglages, il est possible de créer autant de configurations acoustiques que voulues. Par exemple, une configuration théâtre, ou jazz, ou musique de chambre, ou une configuration pour orchestre symphonique. Par rapport aux moyens

passifs, les systèmes actifs permettent de changer instantanément l'acoustique d'une salle sans manipulation d'éléments mécaniques. L'autre point fort, auquel les architectes sont très sensibles, est qu'il est possible de totalement intégrer le système dans l'architecture de la salle, que ce soit lors de la construction ou à l'occasion d'une rénovation. Sur la photo de la Salle des Princes au Forum Grimaldi de Monaco, dans laquelle un système CARMEN est installé, difficile de voir que des haut-parleurs et des microphones sont installés dans le plafond !



A l'exception de certaines salles à forte notoriété dans lesquelles quasiment un seul type de spectacle est programmé (certaines salles de concerts symphoniques par exemple), les exploitants de salles apprécient la possibilité d'avoir une acoustique s'adaptant à chaque spectacle. Les systèmes actifs de variation de l'acoustique présentent alors une alternative très efficace face aux moyens passifs. ●

1 Deux grands types de systèmes

2 Salle des Princes du Forum Grimaldi, Monaco
Crédit : J.-C. Vinaj – L'Agence

Le temps de réverbération (TR) s'exprime en secondes et correspond au temps d'extinction naturelle du son dans une salle. C'est le temps que met le son à décroître jusqu'à 1 millionième de son énergie de départ, soit une décroissance de 60 dB.

Ce paramètre permet d'avoir une idée globale de l'acoustique d'une salle.

L'acoustique dans le monde industriel

Au mot acoustique sont souvent associés les mots : musique, instrument, haute fidélité, salle de concert... A la question posée aux jeunes ingénieurs candidats pour un premier poste « pourquoi avez-vous choisi une option en acoustique ? », près de 50 % répondent « je suis intéressé par la musique ».



Christophe Maliczak
(01)

christophe.maliczak@vibratec.fr

2001 : Ingénieur en analyse vibro-acoustique - société Vibratec.

2007 : Chef de projet - Département Ferroviaire Vibratec.

Nicolas Vincent
(80)

Directeur général délégué de Vibratec.

Co-fondateur de la société Vibratec en 1986, après un parcours de 5 ans comme ingénieur d'étude.

En terme quantitatif, les postes d'ingénieur en acoustique musicale au sens large « recherche sur la sonorité des instruments, électro-acoustique, conception de salles de concert » sont confidentiels. En France, les postes d'ingénieurs et de techniciens en acoustique se retrouvent principalement au sein des deux branches suivantes :

- l'acoustique du bâtiment et de l'environnement, couverte par une multitude de petits bureaux d'études et d'ingénieurs indépendants, ainsi que par les services acoustiques d'organismes d'Etat comme le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) ou le LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) ;
- l'acoustique industrielle, centrée principalement autour des constructeurs de matériels de transport : automobile – poids lourds, aéronautique, ferroviaire.

Sur le plan technique et scientifique, l'acoustique est au confluent de la mécanique des solides (bruit des instruments à corde ou à percussion) et de la mécanique des fluides (bruit des instruments à vent), et nécessite la maîtrise d'autres sciences de l'ingénieur comme le traitement du signal.

Acoustique industrielle : 30 ans pour passer de l'âge de pierre au tout numérique

Avant les années 70 - 80, l'acoustique se limitait principalement au secteur du bâtiment. L'acousticien se

présentait sous la forme de l'ingénieur conseil, muni de son sonomètre et de son expérience des matériaux isolants et absorbants. Des approches principalement correctives étaient mises en place lorsqu'un problème de bruit était identifié.

A la fin des années 70, la construction des premiers sous-marins nucléaires a initié l'essor de l'acoustique moderne, le principal atout du sous-marin lanceur d'engin résidant dans sa discrétion acoustique. La recherche acoustique a alors bénéficié d'un soutien considérable des fonds publics, soutien qui a favorisé l'émergence de sociétés d'études spécialisées en acoustique. L'enjeu auquel les ingénieurs ont du répondre peut se résumer ainsi : « comment concevoir un objet industriel silencieux du premier coup (en l'occurrence un sous-marin) ? » ou encore « comment opérer les bons choix d'architecture générale et de composants pour éviter les actions correctives sur le premier exemplaire, actions dont l'efficacité reste forcément très limitée ? ».

Le secteur des transports a ensuite pris le relais au milieu des années 80, alors que les subsides gouvernementaux à destination des militaires commençaient à se tarir. La conception « silencieuse » revêt dans ce secteur, un double enjeu :

- un premier enjeu réglementaire (hier national, aujourd'hui européen) de protection de l'environnement,

- un deuxième enjeu commercial, le confort acoustique représentant un facteur associé à la qualité et à la notoriété du produit – confort du conducteur et de ses passagers pour les véhicules particuliers et confort de l'utilisateur pour les transports collectifs.

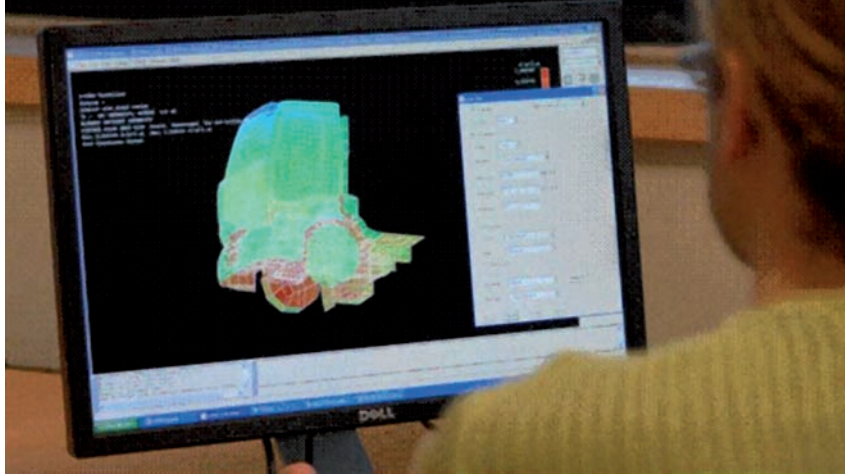
L'industrie automobile, représente le secteur qui a, depuis 20 ans, le plus massivement investi dans le domaine de l'acoustique ; les constructeurs Renault et PSA abritent chacun plus de 200 acousticiens, contre quelques dizaines chez les industriels du ferroviaire (Alstom, Bombardier Transport, SNCF) et de l'aéronautique et quelques poignées dans les sociétés de la mécanique et de l'électroménager. C'est cette industrie qui a le mieux su intégrer, dans le processus de conception, la maîtrise de la prestation acoustique du véhicule, en s'appuyant :

- sur les approches associées à l'ingénierie système, d'une part (cycle en V – voir encadré 1),
- et sur le déploiement des méthodes numériques apparues au cours des années 90 d'autre part.

Les nombreuses vagues de véhicules prototypes utilisés (entre autres) à la mise au point acoustique, sont aujourd'hui remplacées par une vague unique, visant à valider la prestation. Le confort acoustique, que l'on peut constater lors de l'achat d'un nouveau véhicule, atteste de la réussite de cet investissement. Les méthodologies développées par les grands de l'automobile ont ensuite naturellement diffusé chez les équipementiers, chez les industriels du poids lourd (favorisé à l'époque par les liens capitalistiques forts entre Renault Trucks et Renault) et aussi dans le secteur du ferroviaire, dans les années 90, Alstom Transport s'est appuyé sur un ingénieur en provenance de Renault, pour structurer son équipe acoustique, puis aujourd'hui dans le secteur de la mécanique (engins de chantier, machines...).

Passage du quantitatif au qualitatif

En parallèle de la réduction des niveaux sonores, les ingénieurs s'inté-



Optimisation numérique de l'environnement acoustique à l'aide de l'outil SONOR développé par VIBRATEC : le cas présenté ici traite de l'environnement d'un GMP de poids lourd

ressent de plus en plus à la qualité du son perçu ; les notions de qualités sonores et/ou de design sonore ont fait leur rentrée dans les bureaux d'études automobile, mais aussi dans l'électroménager (aspirateur, sèche-cheveux...), et l'industrie des produits de luxe : « claquement lors de la fermeture du tube de rouge à lèvres ».

Exemple d'un secteur – bruit ferroviaire

Le bruit ferroviaire constitue une illustration intéressante des progrès saisissants de l'acoustique depuis 30 ans. En 1986 les services spécialisés en acoustique de la SNCF ou de la DB (Deutsche Bahn), les deux compagnies leader en Europe, ignoraient encore qui, de la voie ou du matériel roulant, était à l'origine du rayonnement acoustique (poids respectifs des roues, des wagons, des rails, des traverses et du ballast dans le rayonnement). La pose d'écrans le long des voies constituait le levier unique à disposition de l'acousticien. En parallèle, jusqu'en 1996, aucun des 3 grands constructeurs mondiaux (Alstom, Bombardier et Siemens) ne disposait d'outils numériques de conception acoustique de train ; ils découvraient donc les performances de confort acoustique interne lors de la sortie de la première rame (en ferroviaire, le prototype n'existe pas – la première rame sortie de l'usine est à usage commercial).

- Les mécanismes physiques à l'origine du bruit ferroviaire et les outils de simulation numériques associés ont été consolidés entre 1986 et 1996 sous l'impulsion d'un effort de recherche concerté au niveau européen (voir page suivante l'encadré 2 pour la source « bruit

de roulement ferroviaire »),

- Les premières solutions visant à maîtriser le bruit dans l'environnement à la source, ont vu le jour à partir des années 1996,
- Les premiers matériels ayant bénéficié d'une approche de conception acoustique ont été mis sur le marché autour des années 2000 (voir l'encadré 3 qui présente l'une des approches possibles pour la prédiction du bruit aérien).

Conclusion

En une trentaine d'années, l'avènement des outils et des approches numériques a révolutionné la conception silencieuse.

Dans le domaine ferroviaire, on peut considérer que les logiciels de prédiction des niveaux acoustiques de sources importantes, telles que le bruit de roulement, sont arrivés à maturité et font partie de la palette des outils disponibles pour l'ingénieur. Cependant, avec la volonté de voyager de plus en vite (projet V 360 mené par la SNCF), de nouvelles sources de bruit deviennent significatives et doivent être prises en compte pour réaliser une estimation fiable des niveaux de bruit. Ainsi, la plupart des sources d'origine aérodynamique (bruit aérodynamique du bogie, du pantographe, bruit de couche limite turbulente) sont concernées. Les outils numériques existent dans des laboratoires tels que le LMFA de l'ECL mais ne sont pas encore utilisables au stade de la conception de matériel roulant avec les contraintes de l'ingénieur.

Toute la difficulté et en même temps l'intérêt de ces thématiques résident dans la subtile adaptation des approches et des outils de recherche au contexte industriel. ●

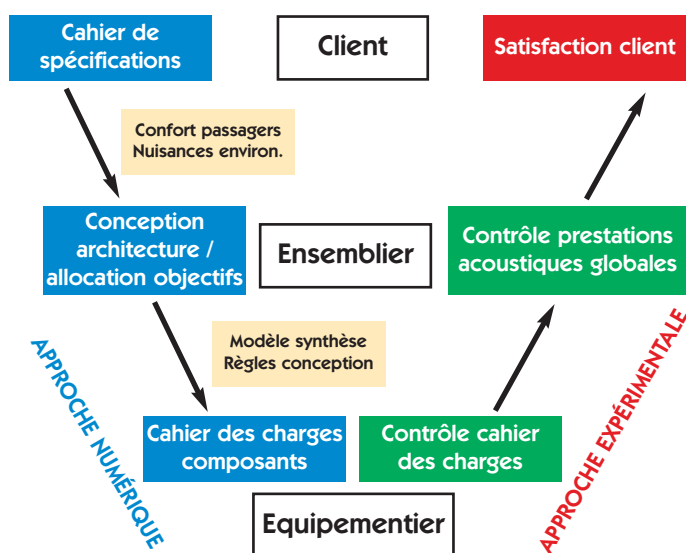
La classique « démarche en V » appliquée à la conception silencieuse

La branche descendante du V s'articule principalement autour des modèles de synthèse numériques.

Ces modèles sont déployés le plus souvent en mêlant les prédictions numériques directes et les résultats expérimentaux (base de données, recalage, etc.).

Ce type de modèle permet de définir, dès le stade de l'avant-projet, des allocations en termes de puissance de source, de transfert par les parois, et de faire le suivi des niveaux acoustiques internes au fil de l'avancement du projet.

La branche montante est dédiée aux contrôles : d'abord sur les éléments pris séparément, puis sur les niveaux acoustiques globaux. Ces vérifications sont essentiellement effectuées de manière expérimentale.



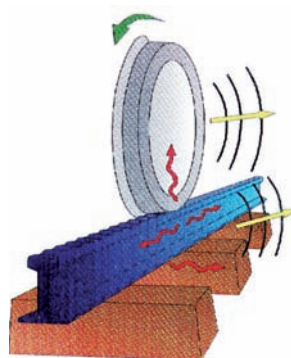
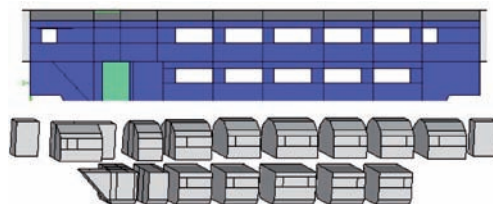
Un exemple de modèle utilisé pour la conception silencieuse : modèle SEA pour le bruit aérien à l'intérieur du TGV Duplex

Les modèles de synthèse acoustique doivent permettre le calcul de la contribution acoustique des sources acoustiques externes à l'intérieur du matériel roulant sur une large bande de fréquences (100-5000 Hz).

Différents choix sont possibles :

- formulation analytique (rustique mais robuste),
- modèle éléments finis (précis mais lourds de mise en œuvre au-delà de 800 Hz),
- modélisation SEA (méthode statistique adaptée au bruit aérien en moyennes et hautes fréquences),
- etc.

L'étude du bruit aérien à l'intérieur du TGV Duplex a été menée avec un modèle de type SEA.



Représentation schématique de la source « Bruit de roulement »

La source du bruit de roulement ferroviaire réside dans les irrégularités de surface microscopiques situées d'une part sur la bande de roulement de la roue, et d'autre part sur la tête du rail.

Ces irrégularités, également appelées rugosités, forcent alors un déplacement imposé au système (roue + voie) au niveau du point de contact : à la manière de l'aiguille d'un gramophone ou d'un électrophone, la roue « lit » les irrégularités de surface.

La roue et la voie entrent alors en vibration et une partie de ces vibrations est dissipée sous forme de rayonnement acoustique.