

# L'acoustique des véhicules routiers

## Bernard Favre

Renault Trucks  
Service TER E80 110  
1, avenue Henri Germain  
69800 Saint Priest  
Tél. : 04 72 96 45 84  
Fax : 04 72 96 61 89  
E-mail : bernard.favre@renault-trucks.com

## Etienne Parizet

INSA-LVA  
Bâtiment Antoine de Saint-Exupéry  
25 bis, avenue Jean Capelle  
69621 Villeurbanne CEDEX  
Tél. : 04 72 43 81 21  
Fax : 04 72 43 87 12  
E-mail : parizet@lva-insa-lyon.fr

## Résumé

Cet article retrace l'évolution des tendances principales de l'acoustique des véhicules routiers (bruit extérieur et qualité acoustique des habitacles) au cours des années écoulées, dans le domaine de la gêne et la perception, des outils et processus de conception, des technologies. Des éléments de perspective pour les années futures sont également évoqués. On met en évidence que les progrès très significatifs de l'acoustique des véhicules accompagnent l'évolution du produit automobile lui-même. Cette évolution devant se poursuivre à l'avenir, l'acoustique devra poursuivre sa mutation vers une approche globale intégrant tous les acteurs intervenant dans la conception, la fabrication, l'utilisation et l'exploitation des véhicules (et leur environnement, par exemple les chaussées routières).

## Summary

In this paper, we discuss the trends regarding road vehicle acoustics (exterior noise and in-cab acoustical quality) during the last decade(s). Topics concern annoyance and perception, engineering tools and processes, technologies. Some material regards foresight and future perspectives in the next years. We point out that very significant progress in the last years in vehicle acoustics are connected to modifications of the product features and technologies. Since the vehicle technologies will still strongly change in the future, road vehicle acoustics will still move towards global approach by integrating all the stakeholders in the vehicle design, manufacturing, use, and management (and their environment, such as road surfaces).

**D**

epuis le premier numéro d'Acoustique & Techniques (il y a dix ans), les progrès en acoustique automobile ont été très significatifs. Même s'ils ne sont pas toujours spectaculaires en termes de perception, et du fait que l'acoustique de l'ingénieur est une acoustique linéaire (qui s'exprime en énergie et puissance) quand celle du psychosociologue est celle du logarithme (en décibels), la recherche de solutions moins bruyantes et qualitativement plus agréables a été permanente, et on a obtenu de beaux succès.

Cependant, ceux-ci sont à placer dans une perspective à plus long terme, tant dans le passé (les dernières décades) que dans l'avenir. En effet, les progrès en la matière s'inscrivent dans la permanence de l'effort, dans la durée, et nécessitent une approche multidimensionnelle où les technologies de l'acoustique progressent en même temps que l'évolution technique des produits (véhicules, pneumatiques et chaussées), que celle des méthodes et outils de conception et d'industrialisation, et que des attentes de la société, reflétées par les normes, standards et réglementations.

Ces progrès ont résulté de deux exigences principales :

- la volonté d'améliorer le confort acoustique à l'intérieur des véhicules, les constructeurs considérant cela comme un élément concurrentiel important,
  - une réglementation qui s'est mis en place pour le bruit extérieur (riverains) et a imposé des seuils de plus en plus bas.
- Le premier point a sans doute été le plus important pour les véhicules légers et le second pour les poids lourds.

Nous donnons ici un aperçu des tendances observées au cours des dix dernières années (sur la période 1995-2005), ainsi que des évolutions à venir, sur les questions de l'acoustique externe (vis-à-vis de l'environnement), et de l'acoustique interne (vis-à-vis des usagers des véhicules).

## Le bruit extérieur

### Les sources de gêne due au bruit extérieur des véhicules routiers

Dans une étude de 1998 [1], Patricia Champelovier et Jacques Lambert ont fait une synthèse des sources dominantes de bruit et de gêne des trafics routiers

en fonction des types de voies et de zones urbaines (tableau 1). On constate que :

### L'évolution de la réglementation

Depuis leur introduction en France en 1970 dans le cadre d'une directive européenne, les valeurs réglementaires d'émission sonore des véhicules routiers mis en circulation ont été réduites de manière spectaculaire. On a gagné jusqu'à aujourd'hui 8 dB (A) pour les automobiles, et de 11 à 15 dB (A) pour les véhicules industriels (tableau 2). Cette sévèrisation progressive de la réglementation s'est traduite par une réduction réelle du bruit des véhicules commercialisés mis en circulation (figure 1).

Cependant, la réduction des niveaux réglementaires a marqué le pas au cours de la dernière décennie.

D'abord, la chasse au décibel supplémentaire est de plus en plus ardue et coûteuse. Réduire encore les niveaux au-delà des valeurs actuelles sera pénalisant d'un point

## Sources dominantes de bruit et de gêne en fonction du type de voie et de zone

Réf. : Patricia Champelovier, Jacques Lambert. Sources de bruit et de gêne en milieu urbain. Journée spécialisée INRETS, Bron – 28 mai 1998, actes n° 66, P9-19.

	Autoroute & Rociade	Route Nationale	Artérielle	Distribution & Desserte
<b>Bruit mécanique</b>	échangeurs & rampes d'accès	zone urbaine	zone urbaine	toutes voiries
<b>Bruit de roulement</b>	toutes voiries	zone péri-urbaine et rurale	zone péri-urbaine	
<b>Bruits divers</b>				toutes voiries

Tabl. 1 : Typologie des situations de bruit et de gêne des riverains de voies routières pour les bruits d'origine mécanique, les bruits de roulement, et les autres types de bruit

- Le bruit des organes mécaniques est la source dominante de bruit et de gêne dans les situations où la vitesse des véhicules est faible ou modérée, et dans les allures transitoires (en accélération et à régime moteur élevé). Il s'agit des voies en zone urbaine où la vitesse est typiquement limitée à 50 km/h, et des échangeurs et rampes d'accès de voies routières ;

- Le bruit de roulement est la source dominante de bruit et de gêne dans les situations où la vitesse est plus élevée (voies artérielles, routes et autoroutes), dans les zones périurbaines et rurales ;

- Les autres bruits liés à des comportements ou des usages divers (freins, portières, échappement libre, manutention etc.) sont aussi une source dominante de bruit et de gêne pour des riverains de voies de distribution et de desserte.

Les acteurs concernés par la réduction du bruit et de la gêne sont donc les constructeurs de véhicules et leurs équipementiers, les manufacturiers de pneumatiques, les fabricants de chaussées, et les usagers eux-mêmes.

## Niveau sonore des véhicules en conditions réglementaires

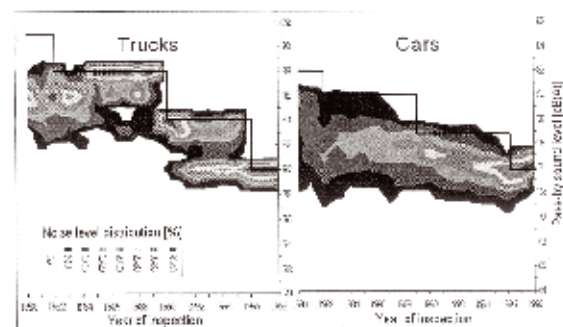


Fig. 1 : Evolution mesurée des niveaux sonores réglementaires de véhicules neufs selon l'année de mise en circulation (entre 1980 et 1998), pour deux catégories de véhicules : voitures particulières (« cars »), et poids lourds (« trucks »). Les lignes brisées indiquent les limites réglementaires [2]

## Evolution des niveaux réglementaires (dB(A))

	1970 CEE 70/157	1982 CEE 77/212 CEE 81/354 CEE 78/1015	1990 CEE 84/224 CEE 87/56	1996 CEE 92/97 CEE 97/24
<b>Voiture particulière</b>	82	80	77	74
<b>Véhicule industriel</b>	91	88	84	80
<b>Motocycle</b>		86	82	80

Tabl. 2 : Evolution dans le temps des niveaux réglementaires à l'homologation (selon les directives européennes indiquées)

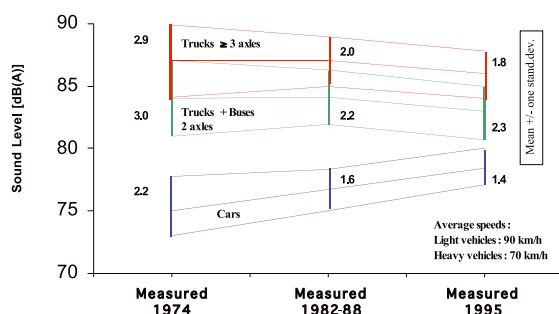
de vue technique pour les véhicules. L'acousticien sait que les premiers décibels sont les moins difficiles à gagner.

Ensuite, la performance obtenue dans les conditions de la réglementation (en pleine accélération, sans chargement des véhicules) n'entraîne pas un progrès du même ordre sur les niveaux sonores émis par les trafics, tels qu'ils sont perçus par les riverains.

On pourrait débattre largement de ce constat. Une excellente synthèse des connaissances a été publiée en 2001 par un groupe de travail animé par Ulf Sandberg [2] (voir par exemple figure 2). Elle démontre notamment que les progrès réels constatés sur l'émission de bruit mécanique (moteur, boîte, pont etc.) sont partiellement

masqués par l'émergence concomitante du bruit de contact pneu-chaussée. D'autres éléments (volume et composition des trafics, évolution des parcs de véhicules, impact des deux-roues motorisés, manque d'entretien ou usage malveillant des véhicules, etc.) ont également un rôle important.

## Niveau sonore des véhicules Emissions réelles en circulation



"The development between 1974 and 1996 of mean vehicle noise levels,  $\pm$ one standard deviation, measured at the roadside (SPB measurements). Highway conditions, dense asphalt surfaces. Indicated values are standard deviations".

**Fig. 2: Résultat de mesures (niveau moyen et écart type) sur véhicules isolés du trafic sur les périodes 1974, 1982-1988, et 1995. Vitesses moyennes: 90 km/h (voitures particulières), 70 km/h (véhicules industriels). [2]**

Ces considérations ont conduit à la redéfinition des conditions de la réglementation pour des progrès futurs, afin d'en faire un outil plus efficace d'amélioration de la qualité sonore. Les discussions, qui avaient été engagées dès la fin des années 1970 (!) (travaux français (Ministère des Transports-DSCR) et européens (ERGA Noise)), sont en train d'aboutir, avec mise en œuvre prévue autour de 2010. Les modifications des conditions d'essai ont été définies; des tests selon la nouvelle méthode sont en cours, afin de déterminer la référence actuelle au sens de la nouvelle procédure; la collecte des données est assurée par l'Office International des Constructeurs Automobiles (OICA). Elle permettra d'aider le GRB, instance de discussion sur le bruit de Genève, à proposer les nouvelles limites réglementaires au titre de cette nouvelle procédure.

D'autre part, on assiste à la mise en œuvre de réglementations sur le bruit de contact pneumatique-chaussée. Celles-ci pourraient à l'avenir s'avérer plus contraignantes pour les manufacturiers de pneumatiques, en attendant que des valeurs réglementaires soient édictées sur les caractéristiques de chaussées.

A côté de ce travail approfondi sur le bruit en circulation (« ciné-parc »), il faut signaler l'ensemble des réglementations qui concernent les autres types de bruit: bruit au ralenti, bruit de décharges pneumatiques, de ralentisseur, restrictions de trafic urbain.

La période future marquera donc une inflexion significative des tendances de la période écoulée, d'une part en traitant spécifiquement du bruit de contact pneumatique-chaussée devenu prépondérant dans la plupart des

situations de nuisance sonore, et d'autre part par la prise en compte, dans la réglementation future, d'une meilleure représentativité des conditions en circulation urbaine. On espère de cette approche plus globale une efficacité renforcée des politiques réglementaires.

## Les niveaux sonores en circulation

Le trafic routier est un ensemble de sources sonores en mouvement, chaque véhicule pouvant être représenté par une source sonore individuelle qui se déplace dans l'espace et dans le temps, et qui est dotée de ses caractéristiques spécifiques.

Les niveaux sonores en circulation ont fait l'objet de campagnes de mesure diverses.

On peut signaler en particulier en France les travaux menés par l'INRETS, le LCPC, le SETRA, le CERTU et le LRPC Strasbourg [3] pour la réactualisation des données d'émission du Guide du Bruit des Transports Terrestres [4], dont les valeurs initiales avaient été établies dans la décennie 1970 à 1980 [5]. Ces données anciennes servent toujours de référence. En particulier, elles servent aux études d'impact pour les implantations d'infrastructures et d'urbanisme, alors qu'on sait qu'elles sont à actualiser car les performances acoustiques des véhicules ont évolué.

Ces travaux récents ont permis d'engager la révision des abaques d'émission sonore pour préparer le Nouveau Guide du Bruit [6]. La structure de ces abaques sera précisée pour mieux tenir compte des différentes classes de trafic (urbain ou routier, stabilisé ou pulsé, composition en type de véhicules: véhicules légers, poids lourds, autobus), ainsi que des caractéristiques des voies (déclivité, revêtement). Il est admis que trois classes principales de revêtements sont à prendre en compte.

On peut déduire de l'ensemble de ces résultats les conclusions suivantes:

- Les efforts réalisés sous l'effet de la réglementation permettent de constater en vingt ans une diminution du bruit des véhicules en conditions réelles d'utilisation, à vitesse modérée. Il s'agit des allures (véhicules en accélération, en montée, zone 30...) pour lesquelles c'est le bruit mécanique qui domine. Les progrès sont typiquement de l'ordre de 5 dB (A) (voitures) et jusqu'à 8 dB (A) camions pour des moyennes de parc, entre les années 1970-1980 d'une part, et 1990-2000 d'autre part.

- À vitesse plus élevée, les différences en vingt ans s'estompent, et le bruit, qui est dominé par le bruit de roulement, est directement lié au type de revêtement. On s'oriente vers une typologie en trois classes, dont les moyennes énergétiques sont distantes d'environ 4 dB (A) de l'une à l'autre (soit une amplitude de 9 dB (A) de la classe la moins bruyante à la classe la plus bruyante).

## La réduction du bruit des véhicules

Un véhicule est assimilable en première approximation à une source ponctuelle, omnidirectionnelle, à très large spectre en fréquence, centré sur les octaves 500 Hz et

1 000 Hz. Le spectre comporte aussi des composantes fines en basse fréquence (octaves 32 Hz à 125 Hz). Son niveau de puissance acoustique  $L_w$  (en dB (A), en dB par bande de fréquence, etc...) varie de façon complexe en fonction des paramètres de construction (conception, fabrication, entretien), et des paramètres d'utilisation: régime moteur, charge moteur, vitesse et accélération véhicule.

Cette source sonore globale est décomposable en sources de bruit élémentaires, celles qui sont liées au groupe motopropulseur (ou bruit mécanique), et celles qui sont liées au bruit de contact pneu-chaussée (ou bruit de roulement) (tableau 3). Chaque source élémentaire est à son tour une juxtaposition de sources de bruit « plus élémentaires ».

### Système acoustique du bloc moteur

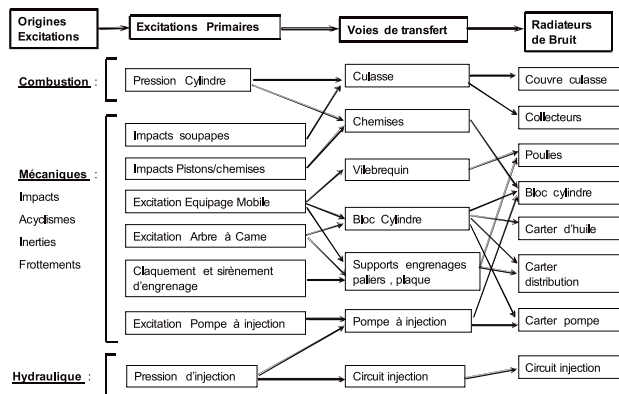


Fig. 3: Analyse de la source élémentaire « bloc-moteur » (doc. Renault Trucks)

### Des sources de bruit élémentaire multiples

- Sources liées au groupe moto-propulseur (GMP) « Bruit mécanique »
  - Bouches d'admission, d'échappement
  - Système d'échappement (tubulure, pots)
  - Bloc moteur
  - Accessoires moteur (pompe d'injection, alternateur...)
  - Boîte de vitesses
  - Transmissions, ponts, roues
  - Ventilateur
  - Ecrans, capots, structures rayonnantes

$$L_w = \alpha \log \eta + \beta$$

$L_w$  : niveau de puissance acoustique

$\eta$  : régime moteur

$\alpha, \beta$  : paramètres

$\alpha$  : typiquement 30 à 50

- Sources liées au roulement et contact pneu - chaussée. « Bruit de roulement »

$$L_w = \alpha \log v + \beta$$

$L_w$  : niveau de puissance acoustique

$v$  : vitesse du véhicule

$\alpha, \beta$  : paramètres

$\alpha$  : typiquement 40

- Sources liées à l'écoulement de l'air et son interaction avec la structure du véhicule « Bruit aérodynamique »

- Sources diverses :

- Décharges pneumatiques
- Freins
- Portières
- Chargement
- Groupes frigorifiques (pour la charge transportée) ...

Tabl. 3: Liste des diverses sources élémentaires d'un véhicule routier

Ces sources peuvent être acoustiquement et/ou mécaniquement couplées. Le travail de réduction de bruit peut se faire sur la cause de l'excitation, sur son transfert, ou sur son rayonnement. La figure 3 donne l'exemple du bloc-moteur, la figure 4 celui d'un véhicule avec l'ensemble de ses sources de bruit mécanique principales.

Pour insonoriser les véhicules, il suffisait au départ d'agir sur la source principale (l'échappement). Mais depuis les années 1980, d'autres sources sont devenues également dominantes, et il a fallu développer une

### Sources de bruit extérieur

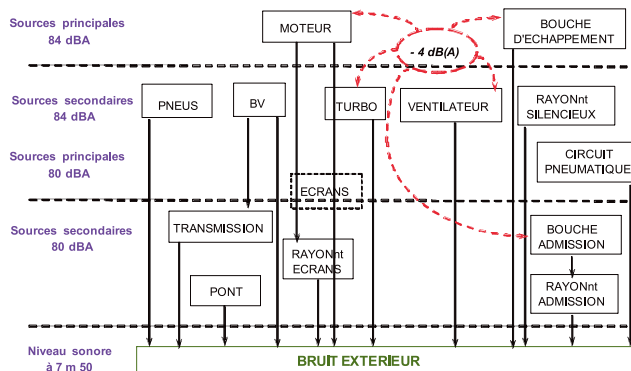


Fig. 4: Positionnement de diverses sources élémentaires par rapport à un critère à satisfaire (doc. Renault Trucks)

démarche « concevoir silencieux » qui est désormais largement pratiquée dans l'industrie automobile, même si des travaux sont encore à poursuivre dans certains domaines, qu'il s'agisse des outils ou des technologies. Ce processus concerne le cycle de développement (cycle « en V »), l'élaboration de cahier des charges acoustiques et de cahier des charges techniques, le travail au niveau des composants, des systèmes véhicule, de la synthèse véhicule, les traitements acoustiques (préventif, curatif), la modélisation et la simulation pour la compréhension des systèmes en basse fréquence, en moyenne et haute fréquence, le recalage et la caractérisation expérimentale par métrologie et traitement du signal, pour l'identification des systèmes acoustiques, enfin le choix et l'optimisation des concepts d'architecture et de systèmes.

Cette démarche aboutit à hiérarchiser les sources les plus émergentes, intervenir sur l'excitation (pression cylindre, géométrie, tolérance géométrique, masse, raideur, état de surface), traiter les transferts et les rayonnements (par l'isolement, l'amortissement, l'absorption), éventuellement supprimer les sources.

La figure 5 illustre certains résultats obtenus sur diverses sources dans le cas d'un véhicule industriel. Le travail sur les sources sonores individuelles s'accompagne par une démarche de conception globale d'encapsulage [7]. On évoque aussi l'intérêt des techniques d'acoustique active [8].

## Actions d'insonorisation (exemples)

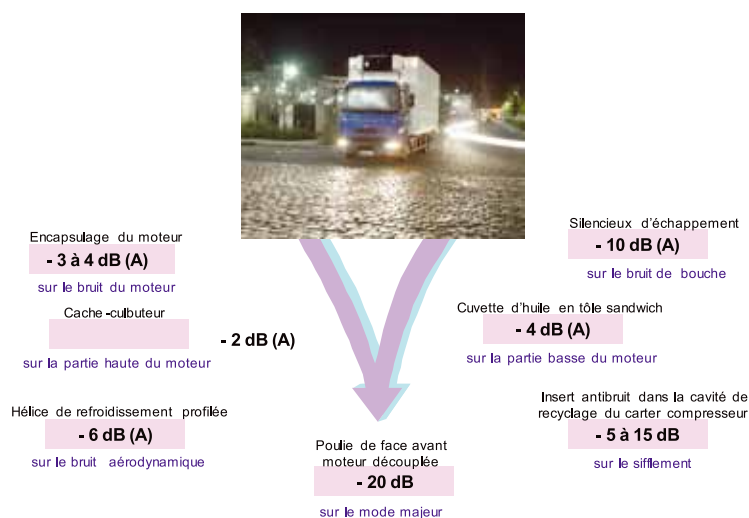


Fig. 5: Actions d'insonorisation (doc. Renault Trucks)

## Orientations pour les deux prochaines décennies

Le bruit d'origine mécanique demeure un élément essentiel de la gêne du bruit des véhicules routiers, mais il faut différencier les véhicules selon leur catégorie, leur âge, et leur état d'entretien. Comme pour les émissions gazeuses, les émissions sonores excessives en bruit mécanique sont dues pour l'essentiel à des véhicules anciens et/ou mal entretenus et/ou mal utilisés, pour lesquels l'incidence de la réglementation actuelle n'a aucun effet. Les exceptions concernent certains véhicules spéciaux (chantier, deux-roues motorisés et véhicules 4.4 « sportifs » etc. dont les émissions sonores réelles ne sont pas au niveau de ceux qu'autoriserait la panoplie des outils et technologies connus à ce jour, s'ils étaient appliqués)

Pour les véhicules de conception récente, le bruit mécanique est donc largement circonscrit pour la plupart des catégories de véhicules. Le bruit de roulement devient la source prédominante, même dans les conditions d'homologation à vitesse modérée. Sur ces types de véhicules, tout effort ultérieur de réduction du bruit mécanique sera très difficile dans les contraintes actuelles techniques et économiques. Toutes les sources de bruit (moteur, échappement, admission...) interviennent désormais de manière presque équivalente dans le bilan acoustique. Toutes sont à traiter pour descendre les niveaux ou réduire les dispersions, et les sources réputées secondaires viennent s'ajouter à la liste des sources principales.

On poursuivra donc les travaux de réduction du bruit sur les véhicules grâce à la démarche « concevoir silencieux » qui sera généralisée à l'ensemble des composants et organes constituant le véhicule. Les outils sont désormais puissants et bien maîtrisés en Basse Fréquence, ils nécessitent une infrastructure et une organisation spécifiques et spécialisés. L'analyse modale, le traitement du signal, l'intensimétrie et l'holographie, les calculs par éléments finis ou SEA, font désormais partie de la panoplie des techniques récentes largement utilisées. Ils seront généralisés chez les constructeurs et équipementiers, grâce à une politique de formation-dissémination concernant tous les secteurs de ces entreprises (concepteurs et industriels).

On complétera cette démarche par l'adjonction de technologies acoustiques spécifiques, en appui et en intégration multifonctionnelle: matériaux pour isoler, absorber, amortir de manière plus efficace; techniques de contrôle actif du bruit (par exemple, silencieux d'échappement). L'évolution des technologies des matériaux et de la mécatronique pourra aboutir à des solutions nouvelles, mais il n'y a pas pour l'instant de rupture à escompter. On estime à 1 % du prix du véhicule le surcoût du dB gagné, et il augmente extrêmement vite. On aboutit à des impossibilités économiques, et techniques. Au-delà de quelques dB, il faut remettre en cause la fonction du véhicule, en dégrader les performances.

On introduira et/ou on généralisera, sur certains véhicules à vocation urbaine, des systèmes énergétiques à pollution perçue réduite. L'émission sonore sera concernée, avec amélioration significative du bruit mécanique: véhicules au gaz naturel (ainsi les autobus au gaz ont une émission sonore de - 2 à - 4 dB (A) par rapport à l'équivalent Diesel, avec un surcoût d'environ 20 %), véhicules hybrides, véhicules électriques avec générateurs embarqués (pile à combustible sur le long terme?). On introduira aussi des véhicules bi mode, avec un mode routier conventionnel, et un mode urbain (plus silencieux, mais avec dégradation des performances dynamiques) permettant l'accès à des zones particulièrement sensibles (par exemple livraisons nocturnes en centre ville)

Pour le bruit de contact pneu-chaussée, la prise de conscience assez récente de son importance devrait faciliter l'introduction de solutions moins bruyantes, qu'il s'agisse des pneumatiques (pour lesquels des percées technologiques nouvelles, touchant tant la structure que la bande de roulement, laissent entrevoir un potentiel intéressant) que pour les revêtements, dont certaines formulations s'avèrent particulièrement prometteuses (pour réduire le bruit de roulement, mais aussi absorber le bruit mécanique...).

On verra même apparaître des revêtements préfabriqués pour certains usages urbains spécifiques, qui pourraient être dotés de performances acoustiques favorables. On aimerait sur cette question que les autorités publiques assument davantage d'initiatives (ou de pertinence) dans



le choix judicieux des revêtements pour l'acoustique urbaine (comme d'éviter de généraliser les pavés dans les centres sensibles...).

Le bruit lié aux comportements indécents ou aux sources aléatoires (portières, chargement, mauvais entretien ou « bricolage » des véhicules), qui n'est pas abordable par la réglementation technique, constitue un aspect particulièrement nuisible du bruit des véhicules.

D'une manière générale, nous croyons au développement d'une approche globale, ce qui pourrait constituer un virage par rapport aux décennies écoulées, avec le développement d'une politique portant sur les véhicules, les infrastructures, l'exploitation, l'usage, les comportements, les zones à protéger. Par exemple, l'effet récent de la dynamique suscitée en France en matière de sécurité routière, qui a conduit à réduire les accidents notamment par le respect des vitesses, a eu certainement un impact positif sur les émissions sonores (ainsi que sur la consommation de carburant).

## Le bruit intérieur

### Progrès des méthodologies

#### Analyse de voies de transfert

Les méthodes d'analyse de voies de transfert sont désormais utilisées assez couramment pour déterminer les efforts injectés à une structure. Ces méthodes ne sont certes pas nouvelles, mais l'essor des systèmes d'acquisition multivoies embarquables a permis leur généralisation. Rappelons que leur principe est, par exemple dans le cas de bruit intérieur dû au moteur, d'évaluer la contribution des différents points d'entrée d'effort sur la caisse (jonction entre celle-ci et le groupe motopropulseur ou des éléments qui lui sont directement rattachés), en mesurant d'une part les transferts vibroacoustiques entre ces points d'entrée et des microphones dans l'habitacle, et d'autre part les efforts injectés dans la caisse en ces points. Cette détermination d'effort est la partie la plus délicate car elle doit se faire par l'intermédiaire de méthodes inverses : des mesures de vibrations en un grand nombre de points, accompagnées d'une connaissance (par calcul ou expérience) du comportement dynamique de la structure, permettent d'identifier ces efforts.

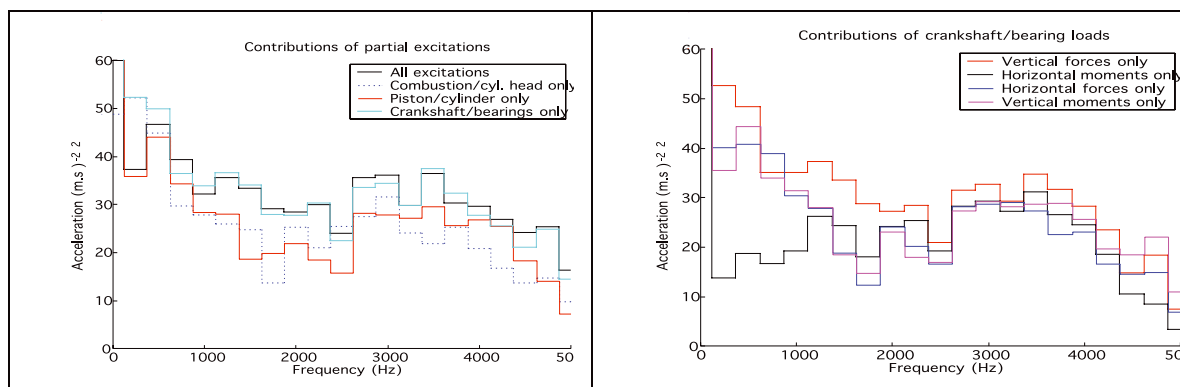


Fig. 6 : Analyse de contributions sur un moteur

L'expérience sur ces méthodes inverses s'est considérablement développée : le choix des points où mesurer les vibrations, qui va influencer fortement le bon conditionnement de la matrice de transferts vibratoires qui devra être inversée, de même que les techniques de régularisation de cette matrice, sont dorénavant mieux maîtrisés. Il est ainsi possible de mettre ces méthodes en œuvre sur des cas complexes tel qu'un moteur ; la figure 6 montre, à gauche, un exemple de détermination de contributions de différentes sources sur les accélérations vibratoires mesurées sur une face d'un moteur (côté distribution) diesel. Dans ce cas, les sources principales sont les paliers de vilebrequin. L'analyse plus poussée (à droite de la figure) révèle que ce sont plutôt les efforts verticaux sur ces paliers qui contribuent le plus aux vibrations de la face moteur [9].

#### Simulation

Les domaines de validité des calculs vibratoires et acoustiques ont été étendus, en partie bien sûr grâce aux progrès de l'informatique, mais aussi grâce à une meilleure connaissance des phénomènes. Par exemple, l'expérience accumulée permet de mieux modéliser les multiples jonctions présentes dans un système complexe : points de soudure, joints de colle, liaisons vissées, etc. Il est ainsi possible de représenter le comportement vibratoire d'un moteur jusqu'à une fréquence de **plusieurs KHz** (figure 7), avec suffisamment de précision pour utiliser ce modèle dans un calcul inverse. Par ailleurs,

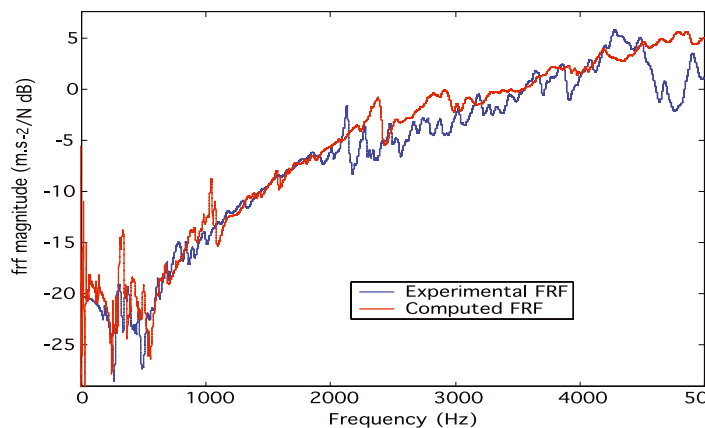


Fig. 7 : Comparaison calcul-mesure d'une fonction de transfert sur un moteur complet [10]

les techniques de condensation de modèles offrent maintenant des solutions pour représenter de la façon la plus économique les modèles complexes que sont nécessairement ceux d'une carrosserie de véhicule.

Pour les fréquences plus élevées, les méthodes énergétiques, dont la SEA est le représentant le mieux implanté dans le monde industriel, sont indispensables. Cependant, la SEA doit encore progresser dans deux domaines :

- La détermination des sous-systèmes, qui, pour que la méthode soit valide, doivent être faiblement couplés, est difficile dans une structure aussi complexe qu'une automobile. Les différents éléments ne sont pas aussi clairement délimités que dans un cas d'école composé de poutres et plaques et les couplages sont souvent forts. Certaines méthodes automatiques ont récemment été proposées [11], mais elles ne sont pas encore industrielles.
- Le calcul des coefficients de couplage entre ces sous-systèmes reste délicat. Une technique permet ici de progresser. Elle consiste, en considérant les sous-systèmes par paires, à calculer tout d'abord les modes locaux de chacun des éléments d'une paire, l'un des sous-systèmes étant considéré libre et l'autre bloqué. Ceci permet d'obtenir les puissances échangées par chaque couple de modes des sous-systèmes puis le coefficient de perte par couplage au sens de la SEA [12]. Cette démarche est en cours d'industrialisation.

#### Perception acoustique

Depuis une quinzaine d'année, les mannequins acoustiques (dispositifs reproduisant un torse, une tête et les pavillons auditifs et équipés de microphones à l'entrée de chaque conduit auditif) ont colonisé les services acoustiques des constructeurs et équipementiers. Il est maintenant admis qu'il peut être utile d'enregistrer fidèlement du bruit, afin de l'écouter en laboratoire et de chercher, par plusieurs essais de filtrage numérique, la meilleure voie pour améliorer la qualité de ce bruit. L'ensemble « mannequin – logiciel d'analyse perceptive », qui était autrefois réservé aux services de recherche, semble maintenant faire partie de la panoplie d'outils classiques de la mise au point acoustique.

Dans ce domaine, de nombreux progrès restent cependant à faire :

- des évaluations perceptives à plus grande échelle (utilisant des jurys représentatifs de la clientèle) pourraient être menées de façon plus régulière lors du développement d'un véhicule ou d'un composant, d'autant plus que la connaissance sur les méthodes de test devant être employées est maintenant disponible ;
- les critères d'évaluation perceptive (parfois appelés, à tort pour certains d'entre eux, « critères psychoacoustiques ») nécessitent des améliorations, car certaines dimensions sonores importantes sont encore mal décrites. Ceci est notamment le cas pour la rugosité, souvent présente (la juxtaposition de fréquences proches créant une modulation d'amplitude rapide, source de rugosité), en général source de gêne pour les auditeurs et pour laquelle les indicateurs actuels fonctionnent mal. De plus, ces indicateurs sont nombreux, implémentés dans les différents logiciels avec des variantes, ce qui rend toute comparaison impossible.
- le lien entre les enseignements d'une étude perceptive et les conclusions opérationnelles (comment modifier le produit pour orienter le bruit vers cette cible perceptive?) est encore insuffisant. Or ce lien est évidemment indispensable pour tirer tout le profit des études perceptives. Les méthodes de simulation sonore doivent donc encore fortement progresser, car la précision à atteindre pour obtenir, par simulation, un bruit paraissant réaliste à l'écoute et non plus simplement à l'observation de son contenu spectral est très grande.

#### Progrès des technologies

Depuis une dizaine d'années, certaines technologies se sont considérablement généralisées, le délai entre leur introduction sur le marché et leur généralisation étant de plus en plus court.

Citons en tout premier lieu **l'injection diesel common-rail**. L'introduction de l'injection directe (le carburant se mélangeant à l'air dans la chambre de combustion même et non plus, comme auparavant, dans une préchambre située en amont) a permis, au début des années 90, une diminution très forte de la consommation des moteurs diesels. Cependant, les systèmes d'injection eux-mêmes n'ayant pas significativement évolué, ce gain en consommation s'accompagnait d'une dégradation acoustique très forte, due à l'augmentation des pressions de combustion et de leur pente de variation. Le dispositif common-rail a permis de faire considérablement progresser la prestation acoustique. Le principe de ce



Fig. 8 : à gauche, schéma du dispositif général « common-rail », montrant la pompe haute pression, le réservoir haute pression, les injecteurs et le calculateur (doc. Bosch) ; à droite, coupe d'un injecteur (doc. Siemens)

dispositif (figure 8) est de maintenir dans une sorte de réservoir une quantité de carburant à très haute pression (plus de 1800 bars dans les systèmes automobiles récents), fournie par une pompe. Les injecteurs, autrefois constitués de ressort dont le tarage assurait l'injection du gas-oil, sont maintenant équipés d'actuateurs commandés électriquement, permettant de contrôler beaucoup plus finement la quantité injectée et l'instant de l'injection.

Cette plus grande liberté dans le choix des lois d'injection a permis d'affiner le principe de l'injection pilote. Une petite quantité injectée bien avant le point de compression maximal initie la combustion, de sorte que, lorsque l'injection principale a lieu, la combustion motrice est plus régulière. On arrive ainsi à limiter le taux d'augmentation de la pression interne dans le cylindre (facteur  $dP/dt$ ) que l'on sait à l'origine du bruit de claquement diesel. Le graphe supérieur de la figure 9 illustre l'effet de cette

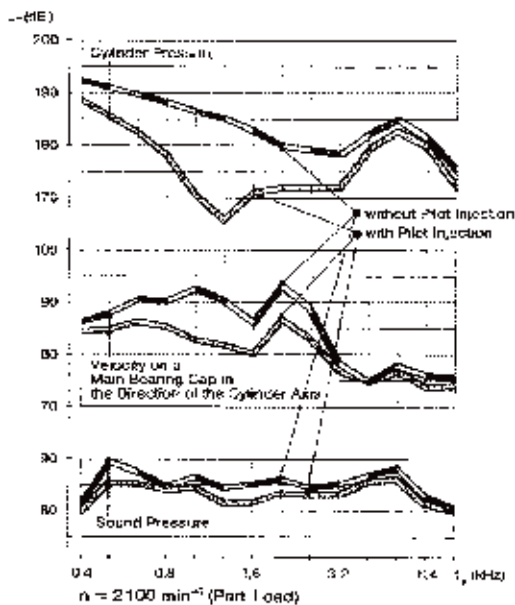


Fig. 9 : Effet de la pré-injection sur le contenu fréquentiel de la pression de combustion, des vibrations mesurées sur un palier du vilebrequin et du bruit extérieur [13]

pré-injection sur le spectre de la pression de combustion : elle diminue fortement l'énergie du signal dans la bande de 1000 à 4000 Hz. Ceci entraîne, dans une moindre mesure, une réduction des vibrations sur les paliers du vilebrequin (au milieu) et, enfin, une diminution du bruit extérieur (graphe inférieur).

L'ingénieur de mise au point moteur dispose ainsi de plus de liberté pour optimiser le difficile compromis entre les performances du moteur, sa consommation, ses émissions polluantes (dont la réglementation est constamment plus sévère) et son bruit. Les prochaines évolutions des réglementations d'émission des moteurs vont néanmoins rendre ce compromis encore plus difficile et nécessiteront peut-être de nouvelles évolutions techniques profondes.

Un exemple de technologie introduite dans le véhicule pour des raisons uniquement acoustiques est le **double volant amortisseur (DVA) ou volant bi-masse**. Son principe est de remplacer le volant moteur (disque à forte inertie fixé au vilebrequin et dont la fonction est de régulariser, par cette inertie, la rotation du vilebrequin), par deux volants (l'inertie du volant moteur a été séparée en deux parties) reliés par des ressorts (figure 10).

On obtient ainsi, au-delà de la fréquence de résonance du système, une très forte atténuation de l'acyclisme moteur en aval du DVA. Or, cet acyclisme a tendance à fortement augmenter avec les pressions de combustion des moteurs diesels ; il peut induire deux problèmes acoustiques majeurs :

- le bourdonnement (son très basse fréquence, lié aux explosions, dont la fréquence est deux fois celle de rotation du moteur, dans le cas classique d'un moteur à quatre cylindres) à bas régime. Les pressions de combustion étant alors très fortes, l'acyclisme chemine jusqu'aux centres des roues et induit des efforts longitudinaux dans la caisse, aux points d'attaches du train avant ;
- le grailonnement de boîte de vitesses, c'est-à-dire le bruit de chocs entre les pignons de celle-ci. Ce bruit donne une impression de mauvaise qualité de la voiture, voire peut faire croire que des éléments ont cassé.

Le double volant amortisseur résout ces deux problèmes ; il est donc en cours de généralisation sur les moteurs diesels de moyenne et forte cylindrée, malgré son surcoût.

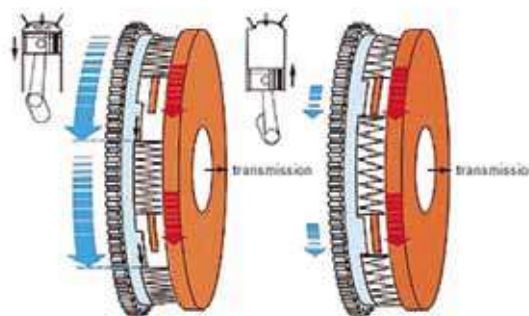


Fig. 10 : Vue et schéma de fonctionnement d'un double volant amortisseur



## Progress des processus de développement

Le confort acoustique est une prestation de plus en plus importante pour le client. S'il ne fait pas encore partie, dans la plupart des cas, des motifs d'achats, il intervient dans l'appréciation de leur véhicule par les clients, exprimée dans les enquêtes que les constructeurs mènent quelques mois après l'achat.

L'acoustique, autrefois secondaire devant l'agrément de conduite ou la tenue de route de la voiture, fait donc maintenant partie des prestations guidant le développement depuis les premières idées jusqu'à la sortie série. Des spécialistes acousticiens sont désormais impliqués dès le départ dans les équipes projets; ils assurent l'interface entre les différents corps de métier en s'assurant que les choix pris par l'équipe projet permettront l'atteinte d'un bon niveau de confort. Ils expliquent également aux développeurs les conséquences, sur le bruit, des solutions envisagées, afin que ceux-ci intègrent l'habitude d'envisager eux-mêmes ces conséquences, et qu'ils dessinent les pièces de la meilleure façon possible. Ceci permet de réduire le recours aux solutions d'amélioration du véhicule en toute fin de projet, lorsque le système est presque figé, solutions qui sont peu efficaces et chères.

Un autre élément fondamental du processus de développement est le déploiement des cahiers des charges, qui consiste à distribuer les efforts permettant une bonne prestation acoustique aux différents éléments

du véhicule. Par exemple, pour le bruit moteur, dans un premier niveau de déploiement, le groupe motopropulseur et la caisse doivent atteindre leurs propres objectifs; puis cette démarche se décline aux différents organes du groupe motopropulseur, etc. L'objectif de ce déploiement est d'atteindre le meilleur niveau de prestation au moindre coût, en recherchant l'optimum global du système. Cette méthode n'est pas nouvelle; mais les progrès dans la connaissance des phénomènes physiques et les techniques de modélisation ont renforcé son efficacité.

Enfin, on cherche de plus en plus à tester la conformité des différents organes du véhicule sur des bancs spécifiques, ce qui permet d'améliorer ces organes avant même de pouvoir disposer d'un prototype complet. Ceci a entraîné une forte amélioration des moyens d'essai: chambre anéchoïque pour moteur, banc d'acyclisme permettant de tester et améliorer les boîtes de vitesses, banc de mesure de vibrations de lignes d'échappement, etc.

Dans le même ordre d'idée, la mise au point de la soufflerie anéchoïque S2A, partagée entre le CNAM, Renault et PSA et inaugurée à la fin 2003, facilite la réduction du bruit d'origine aérodynamique.

## Conclusion

Ces éléments démontrent que les sciences et techniques de l'acoustique connaissent avec l'automobile un terrain d'application permanent, qui n'a pas cessé de s'exercer

## "Road Map" Bruit extérieur des Véhicules Routiers

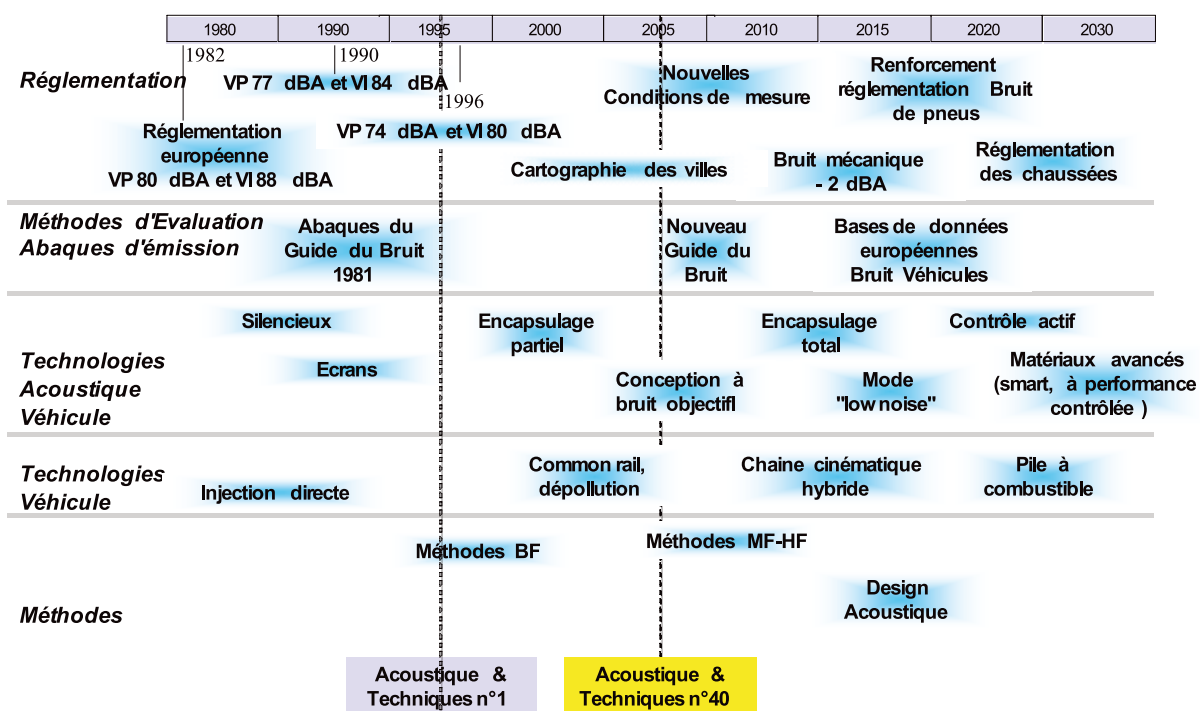


Fig. 11 : Evolution des tendances passées et futures en acoustique automobile (bruit extérieur)

au cours des années écoulées et qui s'exercera encore à l'avenir. La revue Acoustique et Techniques en a été le témoin depuis 1995.

La figure 11 est un résumé des tendances passées pour le bruit extérieur, et de leur projection dans le futur. Elle illustre que l'évolution de la technique acoustique va de pair avec celle de la technique automobile, et avec celle des démarches normatives et réglementaires pour améliorer la qualité au bénéfice de la société. On peut imaginer d'autres pistes possibles pour la prochaine décennie, et l'avenir nous l'apprendra.

## Références bibliographiques

[1] Champelovier P., Lambert J., « Sources de bruit et de gêne en milieu urbain », Journée spécialisée INRETS, Bron, 28 Mai 1998, Actes n° 66, p 9-19

[2] Sandberg U., « Noise emissions of road vehicles, effect of regulations, final report », INCE, July 2001

[3] Lelong J., Bérengier M., « Émission acoustique des transports terrestres- Constitution d'une base de données nationale- Rapport final », INRETS-LTE, Avril 2001

[4] «Le Guide du Bruit des Transports Terrestres- Prévion des niveaux sonores »- Ministère de l'Environnement et du cadre de Vie-Ministère des Transports, Novembre 1980

[5] Favre B., « Abaques d'émission sonore des véhicules routiers », Rapport IRT-CERNE, 1979

[6] «La Nouvelle Méthode de Prévion du Bruit de Trafic » (en preparation)

[7] «Méthodologie d'aide au dimensionnement de l'encapsulation du moteur d'un véhicule"- Rapport final » Renault-RVI-IAM/LAUM-LVA/INSA Lyon-CSTB-Vibratec, Avril 2002

[8] «Silencieux actif à volet oscillant (Réduction du bruit par contrôle actif des pulsations de débit de basse fréquence générées dans une ligne d'échappement) »- Rapport Renault-RVI-LEA-CRMT-Technofirst, 2002

[9] Sauvage O., Ouisse X., Savalle C., Aubry D., Jezequel L., « Modélisation du comportement vibratoire d'un Groupe MotoPropulseur en moyennes et hautes fréquences », Journée Renault-SFA, Juin 2002

[10] Leclere Q., Pézerat C., Laulagnet B., Polac L., « Application of indirect measurement techniques to an operating diesel engine », ISMA

[11] Totaro N., Guyader J.L., « SEA structuring using cluster analysis ; the RIM Index » à paraître dans Journal of Sound and Vibration

[12] Maxit L., Guyader J.L. , « Estimation of SEA coupling loss factors using a dual formulation and FEM modal information, Part I: theory » et « Part II: Numerical applications », Journal of Sound and Vibration (2001), 239(5), pp 907-930 et pp 931-948

[13] Flotho A., Spessert B., « Development methods for low noise diesel engines » SAE 87 2249