

Essais *indoor* de bruit de passage des véhicules routiers : Développement et homologation

Louis-Ferdinand Pardo
UTAC CERAM
Autodrome de Linas-Monlhéry
BP 20 212
91380 Monlhéry CEDEX
E-mail : louis-ferdinand.pardo@utacceram.com

Le trafic routier est la source de bruit la plus répandue en Europe et celle qui expose le plus grand nombre de personnes à des niveaux sonores excessifs. La réglementation européenne sur le bruit émis par les véhicules date de 1970 et a connu de nombreuses évolutions notamment concernant les méthodes et les seuils autorisés. Actuellement, les méthodes de mesure normalisées du niveau sonore extérieur d'un véhicule reposent sur des mesures au passage. D'autres méthodes d'analyse, développées en interne par chaque industriel pour la mise au point des véhicules, ambitionnent d'être normalisées. C'est le cas de la mesure du bruit de passage en chambre sourde dite méthode « indoor ».

L'objet de cet article consiste à présenter le contexte, les défis et bénéfices de cette méthode, illustré par les études réalisées sur le nouveau moyen d'essai indoor de l'UTAC CERAM. L'article abordera aussi les opportunités d'expertise pour améliorer le processus de développement d'expérimental en allant jusqu'aux essais virtuels.

Évolutions réglementaires

Le potentiel de réduction du bruit global par le traitement des véhicules et des pneumatiques est déjà engagé et maîtrisé par de nombreuses actions et échéances réglementaires :

- Les niveaux sonores des pneumatiques sont traités par leur homologation imposée par les règlements GRS CE/661/2009 et UN.R117. Ces textes ont prescrit des réductions des limites de 2 à 4 dB en 2016. Par ailleurs, un étiquetage obligatoire des pneumatiques est défini par le règlement CE/1222/2009.
- Les niveaux sonores des 4 roues (et plus) sont traités par leur homologation, selon les règlements CE/540/2014 et UN.R51. Ces textes exigent des réductions des limites de 3 à 4 dB d'ici 2026. Par ailleurs, il est mentionné la volonté de procéder à un étiquetage (*labelling*) des véhicules, à l'équivalent de celui des pneumatiques [1].

L'ensemble de ces évolutions réglementaires propose de nouvelles méthodes de mesure plus adaptées et un schéma de réduction des limites sur 10 ans comprenant

une large couverture de l'ensemble des composantes du bruit routier. À noter que les véhicules électriques et hybrides sont, quant à eux, désormais aussi concernés par un seuil de bruit minimum, dans le règlement UN.R138.

Méthodes d'essai du bruit de passage

Les essais sur le bruit extérieur des véhicules sont principalement réalisés sur piste. Toutes les procédures relatives au bruit des véhicules et des pneumatiques reposent sur le même principe : le relevé du niveau sonore durant le passage d'un véhicule sur une piste, suivant un cycle standard. Ces procédures spécifient les méthodes de mesurage du niveau sonore émis en mouvement ou à l'arrêt par les véhicules à moteur ayant 2, 3, 4 roues et plus, ainsi que les machines agricoles, les silencieux de remplacement et les pneumatiques.

Méthodes outdoor [2]

Ces essais sont réalisés sur une piste dont les caractéristiques sont décrites dans la norme ISO 10844.

Les microphones sont placés à 7,5 m de la ligne CC', sur la ligne PP', et à 1,2 m au-dessus du sol. Le passage du véhicule se fait sur le long de la ligne CC' entre les lignes AA' et BB' (voir figure 1). Les conditions de passage varient suivant la norme applicable :

- en pleine accélération ;
- à vitesse stabilisée ;
- en roue libre, moteur coupé.

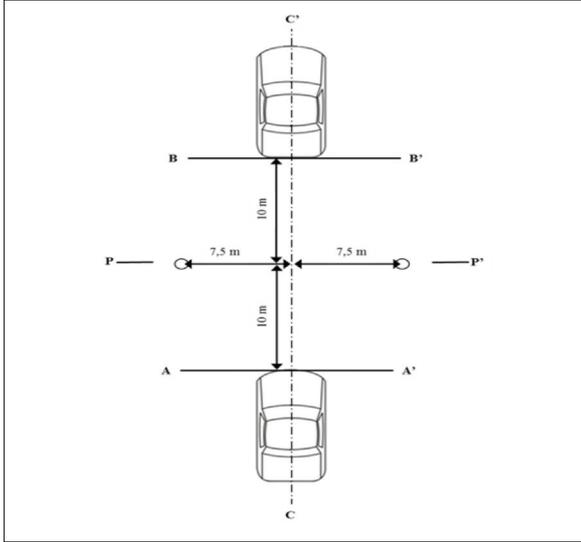


Fig. 1 : Piste d'essai pour les mesures du niveau sonore au passage des véhicules

Les mesures habituellement relevées sont le niveau sonore acoustique en dB (A) avec relevé du niveau maximum, de la vitesse et du régime (figure 2).

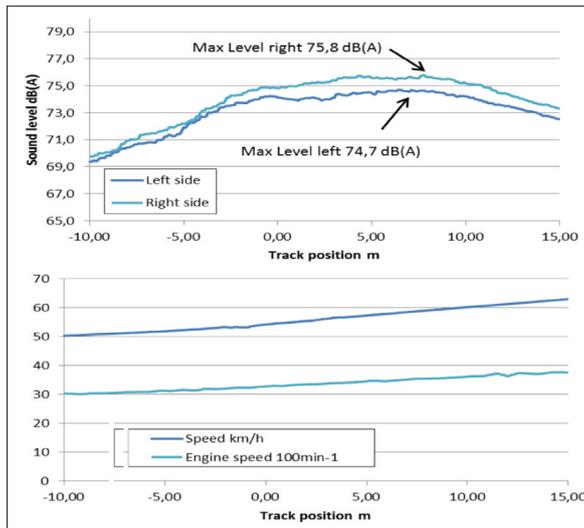


Fig. 2 : Relevés de mesures d'un véhicule au passage, en fonction de sa position piste (ligne PP' à 0 m)

Les paramètres d'essai varient pour chaque norme en fonction de la catégorie du véhicule, du type de transmission, de la puissance, de la masse, du rapport puissance sur masse, etc. les paramètres permettent de définir les vitesses et rapports de boîte cibles ainsi que les traitements des mesures et les limites.

Première méthode indoor pour l'homologation de l'audibilité des véhicules électriques [3]

Le nouveau règlement UN.R138 publié en 2016 est le premier texte réglementaire à avoir introduit des mesures réglementaires indoor. En effet, sur piste, la mesure des niveaux sonores des véhicules est très dépendante du bruit de fond. Certains véhicules présentant des niveaux sonores faibles peuvent ne pas être mesurables. Il est ainsi prévu dans le texte la possibilité de réaliser la mesure en chambre semi-anéchoïque sur bancs à rouleaux.

La méthode d'essai (outdoor comme indoor) consiste à tester le véhicule en mouvement (10 km/h, 20 km/h...). Les microphones sont positionnés sur la ligne PP' à 2 m (figure 4).

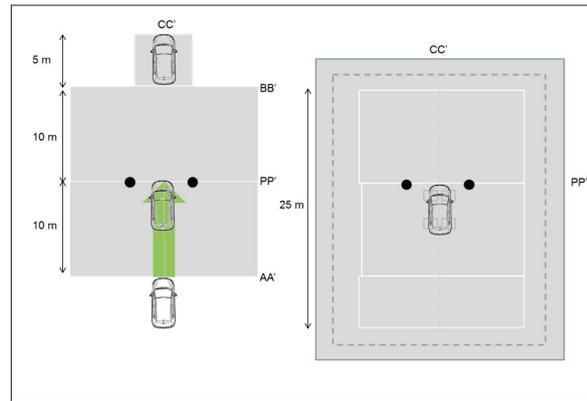


Fig. 3 : Position et mouvement « réel » outdoor (à gauche) et « virtuel » indoor (à droite)

Pour la mesure des véhicules « silencieux » suivant le règlement 138, le niveau sonore maximum pondéré A est relevé de chaque côté du véhicule soit sur piste entre AA' et PP', soit sur banc durant 5 secondes.

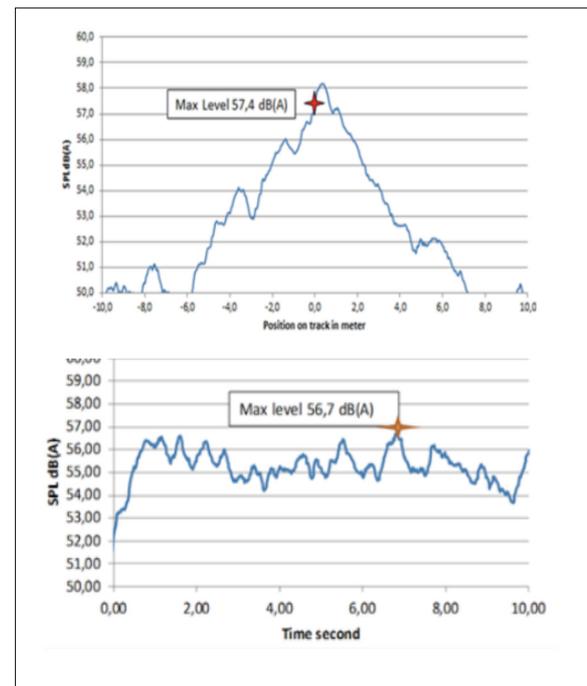


Fig. 4 : Comparaison mesure outdoor et indoor des véhicules « silencieux »

Bien que le passage ne soit pas simulé, la corrélation *indoor* est plutôt satisfaisante compte tenu de la vitesse faible, de la condition stabilisée et de la mesure *outdoor* limitée à PP'. La différence *indoor-outdoor* provient soit de la modulation du signal de sonorisation, soit du « poids » de la contribution du pneumatique.

Vers l'homologation *indoor* des véhicules routiers

La nouvelle norme ISO 362-3 publiée en 2016 décrit les spécifications applicables à un banc d'essai de bruit en chambre semi-anéchoïque ainsi que le mode opératoire permettant d'obtenir des résultats comparables à ceux réalisés sur piste.

La méthode d'essai (*outdoor* comme *indoor*) consiste à tester le véhicule en mouvement. Les microphones sont positionnés à 7,5 m sur la ligne PP' sur piste ou de façon à couvrir tout ou partie du passage, en chambre (figure 5).

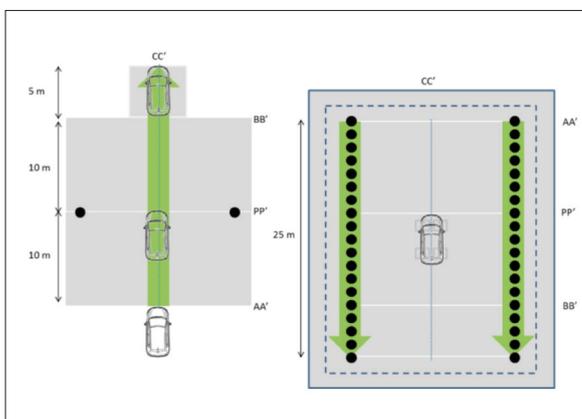


Fig. 5 : Position et mouvement réel « outdoor » (à gauche) et virtuel « indoor » (à droite)

Sur un banc à rouleaux, le passage du véhicule sur la piste est simulé par une montée en vitesse du véhicule et l'acquisition du niveau sonore sur l'ensemble des microphones ; chacun correspondant à une position « équivalente » piste du véhicule (figure 6).

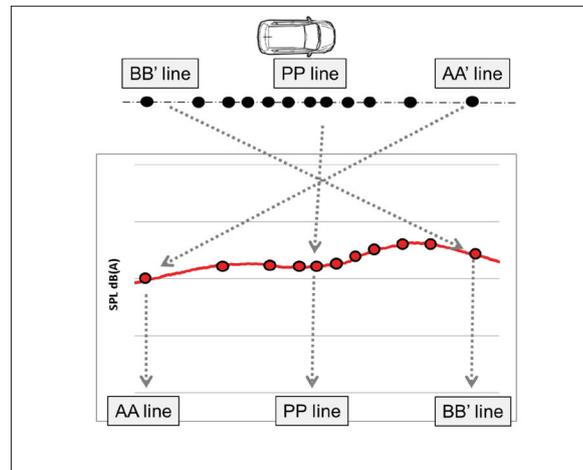


Fig. 6 : Simulation du passage du véhicule par interpolation des niveaux sonores de chaque microphone

Pour la mesure suivant la norme ISO 362-3, la simulation du niveau sonore global du véhicule n'est complète qu'en mesurant le bruit de roulement séparément sur piste (en roue libre et/ou sous couple, avec un véhicule dit « silencieux », c'est-à-dire complètement encapsulé ou électrique). Celui-ci est alors recombinaison par calcul avec le bruit de propulsion estimé *indoor*. Cela requiert l'utilisation de pneus lisses (« slick ») et d'une surface de rouleaux lisse.

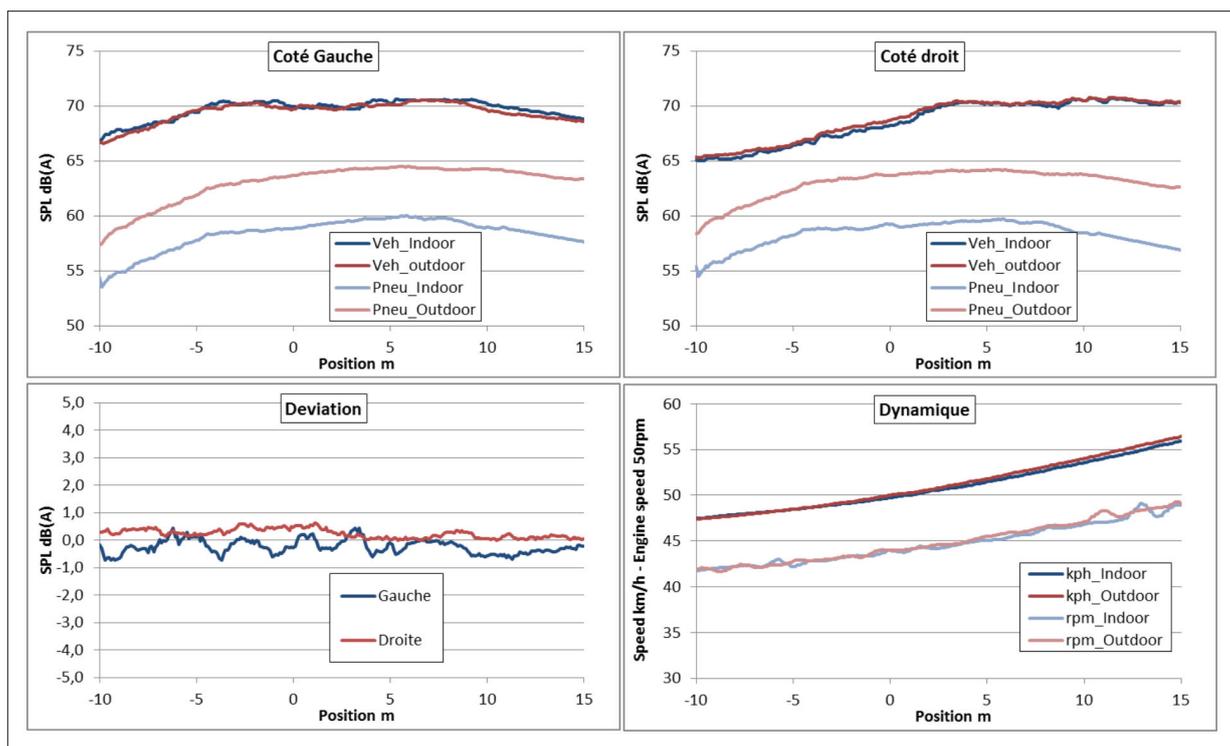


Fig. 7 : Comparaison entre mesures *outdoor* et *indoor*

La performance du banc et de la méthode est validée par déviation entre *indoor* et *outdoor*. La corrélation, jugée satisfaisante pour une déviation du niveau sonore inférieure ou égale à 1 dB, a été entre autres démontrée dans [4], voir figure 8.

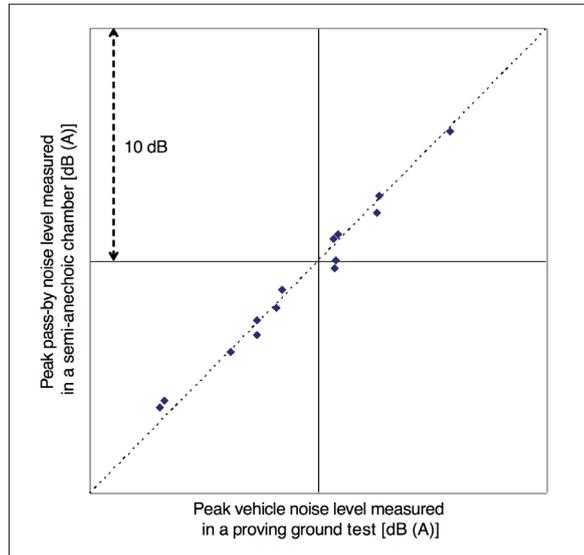


Fig. 8 : Comparaison entre les niveaux sonores *outdoor* et *indoor*

Des travaux de recherche sont en cours pour élaborer une méthode alternative permettant de mesurer le véhicule complet *indoor*, soit en utilisant des coques placées sur les rouleaux et reproduisant la surface ISO, soit en définissant une fonction de transfert entre le bruit de contact du pneumatique sur piste et sur rouleaux lisses. Ces travaux ont pour objectif de progresser autant que possible vers l'estimation complète *indoor*.

Les défis des essais *indoor*

En développant sa nouvelle installation *indoor*, l'UTAC CERAM et ses partenaires ont eu à relever plusieurs défis et développer les méthodes et outils permettant la « simulation » *indoor* du bruit extérieur.

Le champ libre

Le champ libre est évident pour une surface extérieure ne contenant aucun objet volumineux réfléchissant dans un rayon de 50 m. Ça l'est moins en chambre semi-anechoïque, surtout proche des parois. La mise au point de la nouvelle installation *indoor* a permis :

- de définir une méthode de qualification adaptée en se basant sur la norme ISO 26101 relative à la qualification du champ libre,
- d'obtenir une salle présentant une décroissance conforme jusqu'à 63 Hz sur la ligne microphonique alors que la fréquence de coupure « théorique » est de 92 Hz.

Le sonomètre

La mesure sonométrique, évidente sur piste, l'est moins lorsqu'il faut procéder à la recombinaison des signaux d'une ligne microphonique. Ainsi, la conformité ne peut être déterminée par les moyens habituels.

La mise au point de la nouvelle installation *indoor* a permis :

- d'établir une équivalence de conformité à la norme sonomètre,
- de valider les sonomètres virtuels.

La dynamique Véhicule

Le banc doit permettre de reproduire la dynamique *outdoor* avec une précision suffisante. Celle-ci est jugée satisfaisante lorsque la déviation est inférieure à 2 %. La figure 9 montre que la nouvelle installation *indoor* permet une reproduction très fidèle de la dynamique.

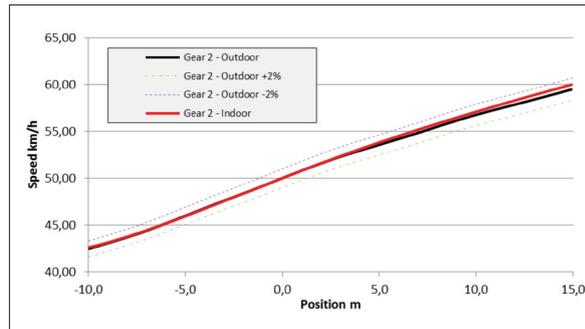


Fig. 9 : Validation de la dynamique

La vitesse *indoor* du véhicule sur le nouveau banc (en rouge) dévie de moins de 1 % de la vitesse *outdoor* (en noir).

La simulation de l'environnement Piste

Pour simuler complètement la piste d'essai, une salle devrait être approximativement de 30 m de long et 20 m de large. De telles installations existent, mais sont rares. Toutefois, les essais réalisés sur plusieurs installations ont montré une bonne corrélation *indoor/outdoor* même pour celles présentant des écarts par rapport aux recommandations de la norme ISO 362-3 (longueur de la salle, fréquence de coupure...). Avec les nouvelles technologies de traitement du signal typiquement disponibles sur le marché, il est aujourd'hui possible :

- d'extrapoler des mesures pour une évaluation complète de l'évolution du niveau sonore sur des positions non disponibles dans la salle.
- d'affecter des coefficients de correction pour corriger des déviations d'anechoïcité (notamment pour réduire la fréquence de coupure de la salle), aligner les pistes ou corriger en température.

Cela permettra de mettre l'environnement *indoor* au plus près de celui de la piste en utilisant le cas échéant des mesures en champ proche par l'utilisation des méthodes TPA (utilisant les mesures de fonctions de transfert). Ces approches sont d'ailleurs partie intégrante des essais virtuels visant à créer des prototypes virtuels autant que des environnements virtuels.

Bénéfices des essais *indoor*

Dans le contexte contraignant de réduction du temps de conception des véhicules et de sévérité accrue des contraintes réglementaires en bruit extérieur, la mesure

du bruit de passage *indoor* est un outil fondamental pour analyser les sources d'émission sonore des véhicules en phase de développement, notamment lors du cycle d'homologation, et pour la mise au point. Cette méthode apporte de nombreux bénéfices.

Bruit de fond

Le bruit de fond, de plus en plus contraignant en raison de la réduction des limites de niveaux sonores réglementaires, est largement réduit et maîtrisé en *indoor*. Il passe de plus 45 dB (A) ou plus à moins 30 dB (A) avec une variabilité significativement réduite (moins de 1 ou 2 dB). C'est d'autant plus primordial pour les essais liés à l'audibilité des véhicules électriques.

Par ailleurs, les analyses des contributions des sources (notamment les mesures des transferts) ne sont réellement pertinentes qu'en *indoor* pour des raisons de bruit de fond.

En réalisant les essais sur banc permettant de maîtriser parfaitement les conditions de passage, les incertitudes (U) de répétabilité sont largement réduites (figure 10).

De plus, en s'affranchissant complètement des conditions extérieures par la maîtrise de la température, les incertitudes de reproductibilité sont aussi significativement réduites (figure 11).

Ainsi, en contrôlant mieux la variabilité des conditions d'essai, on fiabilise les essais pour les comparaisons de solutions et les prévisions. Cela offre une maîtrise inespérée des risques sur les projets.

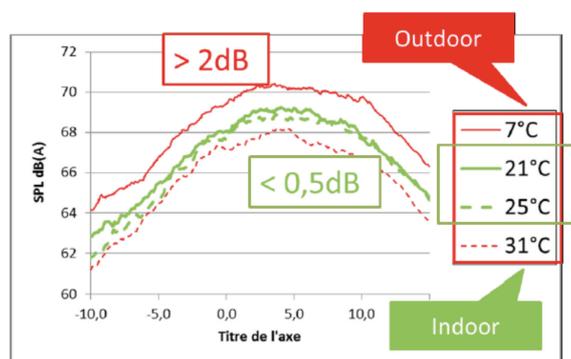


Fig. 11 : Reproductibilité des essais indoor vs outdoor

Réduction du temps d'essai

L'usage du banc *indoor* offre l'opportunité de réaliser des essais très reproductibles et 2 à 3 fois plus rapidement qu'en *outdoor*. Ainsi, lorsque le véhicule est sur le banc d'essai, l'*indoor* permet directement de réduire le temps pour obtenir une meilleure précision et cartographier complètement le niveau sonore du véhicule en un temps record. De même, la maîtrise des conditions environnementales permet de réaliser les essais par tous les temps et en toutes saisons. Outre la maîtrise du planning, le temps d'immobilisation des prototypes est significativement réduit. Il est enfin tout à fait possible de combiner les validations et cartographies du niveau sonore extérieur et intérieur pour offrir en prime, un gain de temps direct sur cette étape à différents stades du projet.

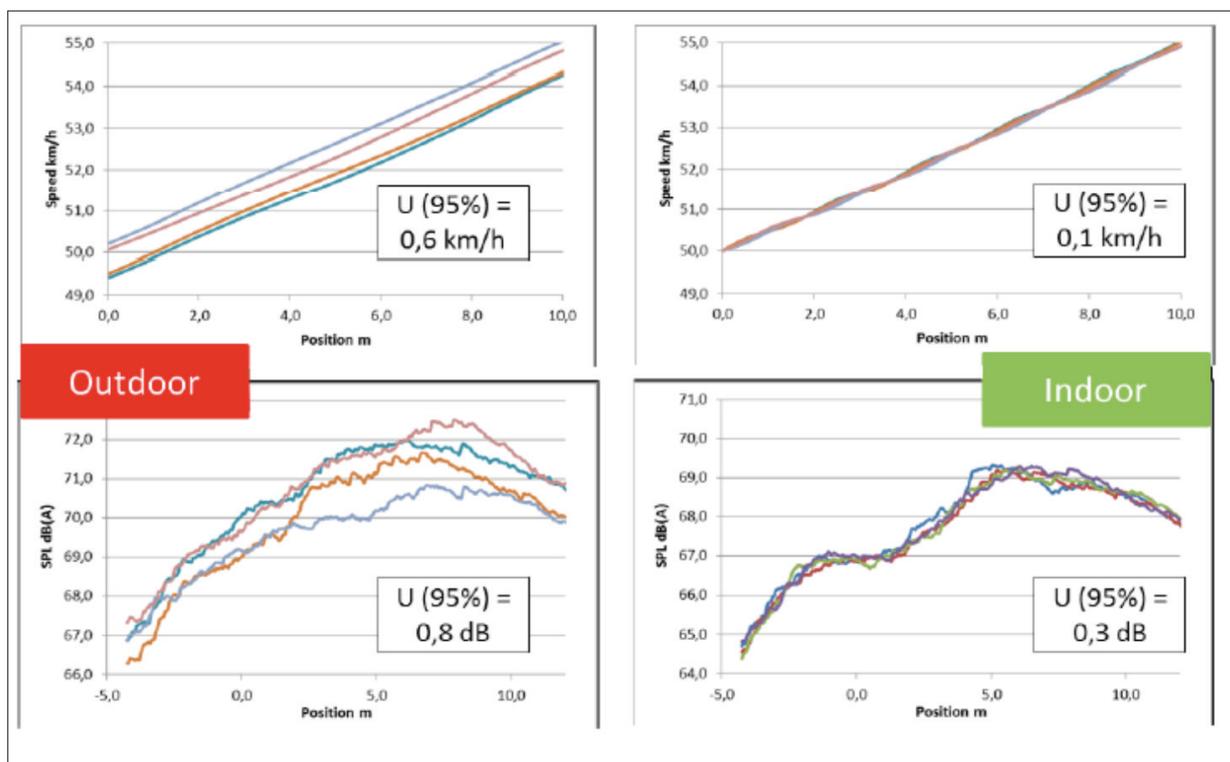


Fig. 10 : Répétabilité des essais indoor vs outdoor

Validations, analyses et prévisions

La pertinence de *indoor* vs *outdoor* est bien sûr aussi abordée du point de vue économique. Ainsi, en se basant simplement sur l'essai standard d'homologation, l'*indoor* ne peut que difficilement concurrencer l'homologation *outdoor* : investissements plus importants, installation sur le banc, essais pneumatiques à réaliser *outdoor*...

Pour prendre pleinement la mesure des bénéfices de l'*indoor*, il faut considérer son potentiel stratégique sur la prestation bruit extérieur. L'homologation *indoor* n'a de sens que si elle s'inscrit pleinement dans le cycle de développement du projet : combinés à une caractérisation des contributions des sources, les essais *indoor* permettent l'alimentation et la mise au point des modèles et des spécifications. Par exemple, la mesure *outdoor* des pneumatiques, considérée comme une faiblesse de la méthode, est en réalité une opportunité pour une meilleure répartition des responsabilités : les données des essais pneumatiques peuvent être fournies par le pneumaticien et alimenter la base de données du constructeur. C'est aussi le cas de chacune des sources et des transferts dont les essais sur bancs et les modélisations pourront à terme être intégrés directement. L'*indoor* est bien la première et incontournable étape pour les essais virtuels.

Vers les essais virtuels

Opportunités des essais virtuels

En profitant de l'opportunité offerte par les méthodes d'essai standard *indoor*, des méthodes d'analyse des contributions de source ont été développées. Les analyses des chemins standards de transfert (TPA) sont utilisées par l'industrie automobile pour améliorer la caractérisation du bruit extérieur des véhicules [5]. Le bruit total est décomposé en somme vectorielle de contributions individuelles d'un ensemble donné d'apports, qui communiquent par une série de ponts. Dans la mesure où les sources ont été soigneusement séparées, la somme de ces contributions doit être comparable à la mesure directe du niveau sonore du véhicule sur le même cycle d'essai.

Ainsi, à partir d'une homologation initiale réalisée en *indoor*, combiné à une analyse de contribution des sources incluant la qualification des voies de transfert, il est possible de modifier l'un des éléments. Pour se faire, il s'agit de réinjecter dans le modèle initial la qualification de la source (pneumatique, moteur, échappement...) ou des voies de transfert à modifier. On obtient alors le niveau sonore résultant au récepteur (voir figure 12).

L'évaluation du gain sur performance acoustique sur une source ou sur transfert peut être estimée expérimentalement (sur piste, banc...) ou par calcul en réalisant par exemple un prototype de caisse virtuel par modélisation.

Ainsi, dans l'exemple illustré en figure 13, la connaissance de la contribution des sources et des voies de transferts d'un véhicule « homologué » *indoor* permet le remplacement virtuel de l'échappement d'origine pour calculer le niveau sonore durant un passage avec un nouvel échappement.

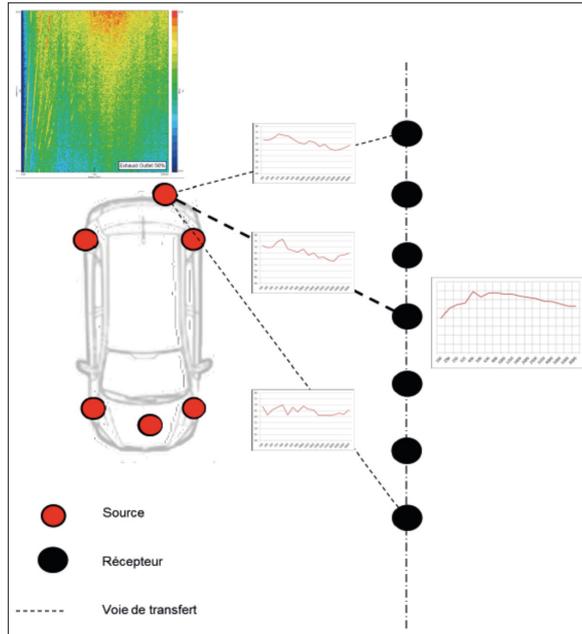


Fig. 12 : Réalisation d'un prototype virtuel à partir de données d'analyse *indoor*

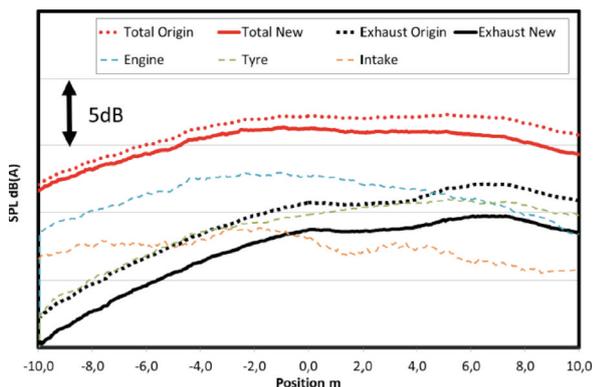


Fig. 13 : Niveau sonore et contributions des sources sonores d'un véhicule durant un passage avec échappements « origin » et « new »

Cadre et questions réglementaires sur l'*indoor*

Conséquence indirecte du scandale du diesel qui a agité depuis l'écosystème automobile, deux points retiennent particulièrement l'attention du législateur :

- la nature « virtuelle » de cet essai,
- l'homologation laboratoire vs « *real-driving* »

Pour répondre à la première préoccupation, la directive cadre 2007/46/CE donne les conditions générales imposées aux méthodes virtuelles d'essai. Celles-ci s'appuient sur la validation d'un modèle mathématique par comparaison avec les véritables conditions d'essai. La comparabilité des résultats du modèle avec les résultats de procédures d'essai conventionnelles doit être démontrée et validée par le service technique et l'autorité. Les différentes corrélations *indoor/outdoor* déjà réalisées donnent confiance en la méthode. Elles devront être complétées par une procédure de validation standard à appliquer pour chaque installation.

Pour la seconde préoccupation, *a contrario* des émissions/pollution, introduisant un essai hors cycle *outdoor* pour prévenir les détections de cycle, le cycle d'homologation niveau sonore est déjà complété par un essai hors cycle (ASEP). Cet essai a été développé pour vérifier le comportement « normal » des émissions sonores du véhicule en conditions de conduite non couvertes par l'essai d'homologation (vitesses et régimes moteurs inférieurs et supérieurs). Cet essai, à l'instar de celui du cycle d'homologation, peut être réalisé aussi bien *indoor* qu'*outdoor*, en donnant des résultats équivalents. Il conviendra toutefois de rendre cette évaluation plus robuste et de couvrir des situations plus proches de l'utilisation normale, bien que potentiellement extrême du véhicule. De plus, la prise en compte des variations liées aux conditions climatiques et aux dispersions inter-piste [6] devront être mieux prises en compte pour assurer une meilleure maîtrise des facteurs influents.

Conclusion

L'expérience de plus de 40 ans d'essais réalisés sur pistes montre que pour les émissions sonores, s'affranchir des variations d'environnement (climatiques, bruit de fond...) est un réel besoin pour une meilleure garantie du résultat. Pour ce faire, cela passe entre autres par la possibilité de réaliser des essais sur bancs en laboratoire : les essais *indoor*.

Alors qu'un premier règlement (UN138) a déjà intégré la réalisation d'essai *Indoor*, un second (UN51) se prépare à introduire la méthode complète de simulation du bruit de passage en chambre semi-anéchoïque dont les corrélations *indoor-outdoor* montrent une précision suffisante. La simulation du bruit de passage, notamment vers les essais virtuels promet de nombreux progrès qui vont stimuler le domaine. Dans le contexte contraignant de réduction du temps de conception des véhicules et de sévérité accrue des contraintes réglementaires en bruit extérieur, la possibilité d'homologuer des prototypes virtuels est plus qu'une opportunité, c'est une nécessité !

L'essai *Indoor* est un premier pas et un incontournable levier pour la prédiction des niveaux sonores des futurs projets et la réalisation de prototypes et d'homologation virtuelle. L'UTAC CERAM relève ce nouveau défi en étant le premier service technique au monde à se doter d'un tel outil.



Fig. 14 : Nouvelle salle semi-anéchoïque de l'UTAC CERAM pour les essais *indoor*

Remerciements

The authors acknowledge the contribution of their colleagues from ISO, UNECE, Renault/Nissan, PSA, IFSTTAR and SIEMENS LMS to this work.

Références bibliographiques

- [1] Pardo (L.F.), Ficheux (S.), SIA, Exterior pass-by noise regulation - Monitoring database and impact assessment, 2012
- [2] Pardo (L.F.), Anfosso Ledée (F.), Technique de l'ingénieur; Bruit des véhicules et du trafic routier - Impact et enjeux des évolutions réglementaires et normatives, 2015
- [3] Pardo (L.F.), Misdariis (N.), Technique de l'ingénieur; Système d'alerte pour véhicule électrique – Sécurité et design sonore, 2015
- [4] Development of Pass-by noise Measurement System on a Chassis Dynamometer, Daisuke ŌMorie, Yoshihiro Shirahashi and Ai; SAE 2008
- [5] Janssens (K.), Britte (L.), Pass-by noise TPA, ISMA, 2012
- [6] Pardo (L.F.), Ageron (T.), Ficheux (S.), Berthou (C.), Experimental approach for reducing uncertainties associated with road vehicle noise according to ISO 362, ACOUSTICS2008, 2008