



Projet FOREVER : Emission sonore des véhicules légers électriques et hybrides

M.-A. Pallas^a, R. Chatagnon^a, M. Bérengier^b et M. Muirhead^c

^aIFSTTAR-AME-LAE, 25 avenue F. Mitterrand, case 24, 69675 Bron Cedex, France

^bIFSTTAR-AME-LAE, Route de Bouaye, CS4, 44344 Bouguenais Cedex, France

^cTransport Research Laboratory, Crowthorne House, Nine Mile Ride, RG40 3GA Wokingham, UK

marie-agnes.pallas@ifsttar.fr

Le projet FOREVER a pour objectif d'évaluer l'impact des véhicules électriques et hybrides sur le bruit de trafic routier du réseau national. L'amélioration des performances des batteries a permis d'accroître l'autonomie des véhicules utilisant une propulsion électrique. Les véhicules électriques, développés à l'origine pour un usage urbain, sont désormais utilisés également en dehors des villes. De même les véhicules hybrides disposent d'une autonomie étendue en mode électrique. Cet article présente des résultats concernant les bruits émis par ces véhicules, à partir de méthodes de mesures appropriées (mesures normalisées "au passage" et imagerie acoustique). Les expérimentations ont été conduites sur piste d'essai en environnement maîtrisé. Les résultats portant sur quelques véhicules légers électriques et hybrides sont présentés. Différentes conditions de fonctionnement sont analysées : vitesse constante, accélération moyenne ou forte, décélération et freinage. Ces résultats sont ensuite comparés aux lois d'émission proposées par le modèle de prévision CNOSSOS-EU préconisé pour les évaluations environnementales et les cartes stratégiques de bruit en Europe. Une méthode corrective est proposée pour les véhicules électriques afin d'intégrer dans la méthode européenne la particularité de cette nouvelle motorisation.

1 Introduction

Dans de nombreux pays, le bruit de trafic routier reste une des principales nuisances pour les riverains. Suite à la publication de la directive européenne 2002/49/EC, des efforts de prévention et de réduction du bruit routier ont été accomplis. Le développement de véhicules plus silencieux, à motorisation électrique ou hybride-électrique, offre une solution supplémentaire. Développés à l'origine pour leurs qualités en matière de réduction de la pollution de l'air, leur utilisation s'étend désormais aux zones extra-urbaines en raison de l'amélioration des performances des batteries.

Une grande part des études scientifiques traitant de l'émission de bruit des véhicules électriques (VE) et hybrides (VEH) relève d'approches perceptives, relatives notamment à la sécurité des piétons et des personnes malvoyantes. Elles s'appuient généralement sur des conditions expérimentales spécifiques, peu adaptées aux études d'impact environnemental. Par ailleurs, quelques études ou projets récents ont considéré le bruit émis par des VE et VEH dans des conditions de mesures normalisées. Parmi ceux-ci, le projet européen CityHush [2] s'est intéressé plus particulièrement aux conditions de circulation urbaines (15-50 km/h), à partir de mesures effectuées sur quelques véhicules légers. Enfin, Kaliski et al. [3] proposent des niveaux d'émission utilisables pour des véhicules électriques à vitesse constante et en accélération, à titre de valeurs REMEL¹ définissant les valeurs d'émission standard aux Etats-Unis, en se basant sur un VEH testé en mode électrique de 8 à 113 km/h.

Le projet FOREVER (Future Operational Impacts of Electric Vehicles on National European Roads), s'inscrivant dans le programme de recherche transnational du CEDR², est dédié à l'évaluation de l'impact sonore des technologies électriques et hybrides sur le réseau routier national [1]. Il inclut une étude quantitative de l'émission de bruit de ces véhicules – légers ou lourds – en conditions réelles. Le présent article caractérise l'émission d'un VE (§2.1) et d'un VEH (§2.2), via des procédures de mesures au passage normalisées, éventuellement complétées par une exploration des sources de bruit par antenne microphonique, sur une vaste gamme de conditions de circulation représentatives d'un usage réel : vitesse constante jusqu'à 110 km/h, moyenne et pleine accélération, décélération et freinage. La dernière partie considère le modèle de prévision européen CNOSSOS-EU préconisé pour les études d'impact dans le respect de la directive européenne. A ce jour, ce modèle

ne prend pas en compte les VE et VEH dans le trafic. Les mesures FOREVER ont été regroupées avec d'autres mesures déjà disponibles à l'IFSTTAR et au TRL, de façon à constituer un échantillon de véhicules plus significatif (§ 2.2). Sur cette base, une proposition de correction des niveaux d'émission CNOSSOS-EU est formulée à vitesse constante (§ 3).

2 Emission de bruit des VE et VEH

Le bruit émis par les véhicules à motorisation thermique classique résulte de deux composantes : le bruit de propulsion, lié au fonctionnement du groupe moto-propulseur et dépendant principalement du régime moteur, et le bruit de roulement associé au contact pneumatique-chaussée qui dépend de la vitesse du véhicule. Il est bien connu que, pour les véhicules thermiques, le bruit de propulsion prédomine principalement aux vitesses faibles et en accélération, alors que le bruit de roulement est la source principale aux vitesses élevées [4, 5]. Classiquement, ces composantes sont évaluées en mesurant le bruit maximum L_{Amax} au passage du véhicule à 7.5 m de l'axe de la voie et à une hauteur de 1.2 m, en niveau global ou par bande de fréquence [6, 7]. Sur la base d'un grand nombre de véhicules thermiques, des modèles d'émission impliquant ces deux composantes ont été définis en association avec des procédures nationales ou internationales de prévision du bruit dans l'environnement. La méthode CNOSSOS-EU [8], préconisée à l'échelle européenne, sera utilisée ici en tant que référence pour apprécier les spécificités acoustiques des VE et des VEH.

2.1 Caractérisation de l'émission d'un VE

Le parc roulant des VE légers est constitué pour une part importante de très petits véhicules (type "supermini"). L'offre des constructeurs s'étend actuellement aussi vers des petites voitures familiales et la part des petits utilitaires est également significative. Ce paragraphe décrit l'émission de bruit d'un véhicule électrique de la classe supermini³, à vitesse constante, en accélération, décélération et freinage. Ce véhicule n'a pas de boîte de vitesse et peut atteindre une vitesse de 130 km/h. Il est équipé de pneumatiques écologiques. Il convient de noter que, comme sur la plupart des VE et des VEH, le moteur électrique est sollicité pendant les phases de décélération et de freinage via le système de récupération d'énergie cinétique.

3. selon la classification EuroNCAP

1. Reference Energy Mean Emission Levels

2. CEDR : Conférence Européenne des Directeurs des Routes

2.1.1 Dispositif expérimental et procédure d'analyse

Les mesures se sont déroulées sur une piste d'essai de l'IFSTTAR, disposant d'un revêtement BBSG 0/10. Le dispositif expérimental était similaire à ceux spécifiés dans les normes couramment employées en mesure de bruit routier [6], les conditions météorologiques étant conformes aux exigences normatives. Six microphones espacés de 10 m étaient disposés par paire de part et d'autre de la piste, à 7.5 m de l'axe de la voie et à 1.2 m de hauteur (Figure 1). Des cellules infrarouges, associées à des plaques réfléchissantes placées sur le véhicule, ont permis de déterminer la vitesse instantanée du véhicule au droit de chaque paire de microphones, ainsi que l'accélération moyenne sur la zone de test.

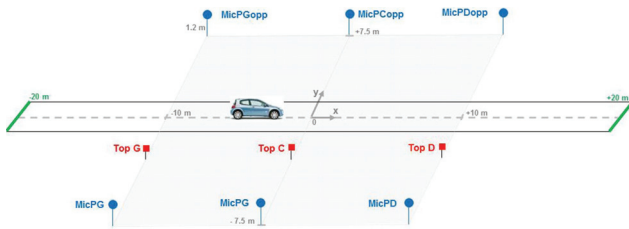


FIGURE 1 – Site de mesure et microphones à 7.5 m

Le niveau de bruit maximum pondéré A sur chaque microphone (L_{Amax}) est déterminé pour chaque passage du véhicule, en niveau global et par bande d'octave de 63 Hz à 8 000 Hz.

Les normes de mesure de bruit routier imposent d'exclure les valeurs mesurées lorsque l'écart avec le bruit de fond est inférieur à 10 dB, en niveau global ou par bande de fréquence. Cependant, cette exigence est très restrictive dans le cas des véhicules peu bruyants, notamment dans certaines bandes de fréquence, même dans un environnement sonore relativement calme. Nous avons donc choisi de nous inspirer des recommandations formulées dans les normes établies pour la détermination du bruit minimum émis par les véhicules routiers [9, 10]. Des termes correctifs ont été appliqués aux valeurs globales mesurées lorsque la différence entre le bruit de fond moyen et le signal était comprise entre 3 et 10 dB. Si cet écart était inférieur à 3 dB, la mesure a été écartée. En bande d'octave, une correction a été introduite pour un écart compris entre 5 et 10 dB et les mesures ont été supprimées pour un écart inférieur à 5 dB. Les plus faibles valeurs mesurées peuvent cependant rester entachées d'une contribution résiduelle du bruit.

2.1.2 Comportement à vitesse constante

A vitesse constante, des passages ont été effectués de 17 à 102 km/h. Les valeurs de niveau de bruit global sont peu dispersées et suivent une évolution linéaire avec le logarithme de la vitesse (courbe noire sur la figure 2) :

$$L_{Amax}(v) = 70.1 + 35.0 \log\left(\frac{v}{70}\right) \text{ dB(A)} \quad (1)$$

où v est la vitesse en km/h. Un doublement de la vitesse entraîne une augmentation du bruit global de 10.5 dB(A). Ceci inclut à la fois les contributions du bruit de roulement et du bruit de propulsion. En l'absence de boîte de vitesse sur le véhicule, le bruit de propulsion est directement dépendant de la vitesse du véhicule, tout comme le bruit de roulement : sans information supplémentaire, les deux contributions ne

peuvent pas être séparées par les simples mesures au passage par microphone. En bande d'octave, la perturbation par le bruit de fond réduit le jeu de données disponibles aux très basses et très hautes fréquences. L'évolution reste également linéaire de 500 à 4 000 Hz avec des pentes variables, mais n'est pas linéaire aux basses fréquences.

2.1.3 Comportement aux autres allures

Deux types d'accélération ont été testées : accélération forte (pédale d'accélérateur complètement enfoncée) et moyenne (position intermédiaire de la pédale). Pour ces allures, soit le véhicule démarrait 10 m avant le premier microphone, soit il arrivait à vitesse constante et commençait à accélérer 10 m avant ce même microphone. Dans les deux cas, l'accélération est d'autant plus forte que la vitesse initiale est faible. En raison de la capacité d'accélération élevée du véhicule à basse vitesse en pleine accélération, les niveaux de bruit mesurés ne sont disponibles que pour des vitesses instantanées supérieures à 30 km/h.

Le bruit maximum émis dépend bien évidemment de l'importance de l'accélération. Dans les deux cas testés, la dispersion des valeurs mesurées est faible, et le bruit global varie linéairement avec le logarithme de la vitesse instantanée du véhicule. Avec une forte accélération, le bruit augmente de façon significative dans l'octave 500 Hz.

En décélération (resp. au freinage), le véhicule arrivait à vitesse constante et la pédale d'accélérateur était relâchée (resp. la pédale de frein était sollicitée) 10 m avant le premier microphone. Pour ces deux configurations, le système de récupération d'énergie cinétique (KERS) est activé pour recharger les batteries, sollicitant le moteur électrique. La simple décélération ne modifie pas le bruit de façon significative. En revanche, la situation de freinage augmente clairement le bruit émis à toutes les vitesses, ce qui était nettement audible en bordure de la zone de test. Cet accroissement se produit dans toutes les octaves en dessous de 30-40 km/h. La méthode de mesure par microphone ne permet pas de séparer les contributions respectives des freins et du KERS.

La figure 2 regroupe les régressions déterminées pour les cinq allures testées. Les augmentations de bruit les plus significatives se produisent au freinage ou lors d'une forte accélération. Le tableau 1 donne les variations de bruit relativement aux passages à vitesse constante pour quelques valeurs de vitesse.

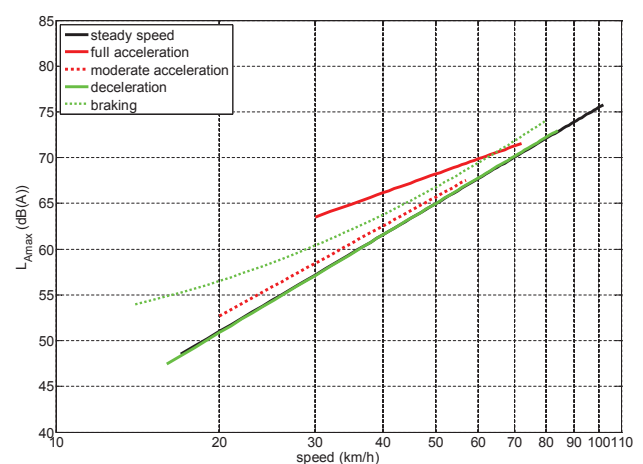


FIGURE 2 – Niveau global maximum du bruit au passage du véhicule électrique aux différentes allures à 7.5 m

TABLEAU 1 – Différence entre les L_{Amax} en dB(A) à différentes allures et les passages à vitesse constante, pour le VE à 7.5 m

| Référence : vitesse constante | Vitesse instantanée | | |
|-------------------------------|---------------------|---------|---------|
| | 20 km/h | 30 km/h | 50 km/h |
| accélération modérée | +1.7 | +1.3 | +0.7 |
| accélération forte | | +6.3 | +3.2 |
| décélération | -0.2 | -0.1 | 0 |
| freinage | +5.5 | +3.2 | +1.8 |

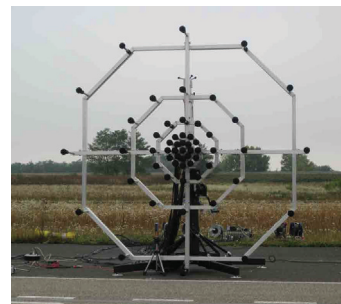


FIGURE 3 – Antenne composée de 57 microphones

2.2 Caractérisation de l'émission d'un VEH

La part des véhicules hybrides dans le parc automobile en circulation s'accroît, et concerne souvent des segments de véhicules de taille supérieure aux véhicules électriques. Ils sont équipés d'un moteur thermique et d'un moteur électrique et peuvent généralement fonctionner temporairement en mode tout électrique. L'amélioration des capacités des batteries autorise pour certains véhicules une autonomie électrique de plusieurs dizaines de kilomètres. Il existe différentes technologies d'hybridation, avec un effet probable sur le bruit de propulsion en fonctionnement hybride.

L'émission de bruit d'un véhicule à hybridation parallèle, classé comme "grande familiale"⁴, a été étudiée. Son moteur thermique est couplé à une boîte pilotée à 6 rapports, la transmission depuis le moteur électrique s'effectue sans boîte de vitesse. Parmi les différents modes de fonctionnement possibles, les cas suivants ont été mesurés : le mode électrique, et deux modes hybrides (nommés ici Hybrid1 et Hybrid2) qui diffèrent par la gestion du superviseur. Le type de pneumatiques montés sur le véhicule relève d'une gamme sport.

2.2.1 Dispositif expérimental et procédure d'analyse

Le véhicule hybride a été testé sur le même site et dans des conditions similaires à celles présentées au § 2.1.1 pour le véhicule électrique. Le même principe de correction du bruit de fond a été appliqué sur les mesures à 7.5 m. A vitesse constante en mode hybride, le régime du moteur thermique et le rapport de boîte correspondant ont été relevés. Outre les microphones à 7.5 m, une antenne microphonique a été utilisée pour caractériser les sources de bruit.

L'antenne microphonique est composée de 57 microphones disposés sur plusieurs cercles concentriques. Le traitement d'antenne associé repose sur le principe de la formation de voies (*beamforming*), avec une résolution spatiale constante sur une large bande de fréquences. Il est également adapté au contexte de sources mobiles et complété par une déconvolution réduisant les effets limitatifs de la réponse spatiale du dispositif. Le diamètre de l'antenne est de 2.56 m et la distance de mesure entre l'antenne (disposée en bord de piste) et le côté du véhicule est de l'ordre de 2.7 m. Cette distance est contrôlée à chaque passage de façon à ajuster la distance de focalisation lors de l'analyse. Entre autres résultats, ce processus délivre des cartographies acoustiques du véhicule, ainsi qu'une estimation de la contribution des sources principales. La gamme d'analyse des sources de bruit s'étend jusqu'à 6.4 kHz.

4. selon la classification EuroNCAP

2.2.2 Niveaux de bruit à 7.5 m

Les mesures à vitesse constante ont été effectuées sur différentes gammes de vitesses : de 17 à 45 km/h en mode électrique, de 15 à 114 km/h pour l'ensemble des deux modes hybrides.

Lorsque le moteur thermique fonctionne, le bruit émis dépend du régime moteur et du rapport de boîte engagé. L'évolution du niveau de bruit avec la vitesse présente donc des légères discontinuités aux vitesses où se produit un changement de rapport (Figure 4). Les changements de rapports ne sont audibles que jusqu'à 40 km/h (rapport 4) en niveau global et jusqu'à 60 km/h (rapport 5) dans les bandes d'octave où le bruit de propulsion est significatif. En mode hybride, le niveau de bruit résulte des contributions du bruit de propulsion, qui dépend de $\log(\text{regime})$, et du bruit de roulement qui dépend linéairement du $\log(\text{vitesse})$.

En mode électrique, le bruit croît linéairement avec $\log(\text{vitesse})$, en niveau global et par bande d'octave, sur toute la gamme de vitesses. Dans ce mode, le niveau de pression maximum à 7.5 m suit la loi :

$$L_{Amax}(v) = 75.1 + 38.9 \log\left(\frac{v}{70}\right) \text{ dB(A)} \quad (2)$$

où v est la vitesse du véhicule dans l'intervalle [17-45] km/h. Ainsi dans ce mode, un doublement de la vitesse implique une augmentation du bruit de 11.7 dB(A).

En accélération, le moteur thermique se met en route quelle que soit la vitesse initiale : tous les passages mesurés ont donc lieu en mode hybride. Régime moteur et rapport de boîte n'ont pas pu être renseignés à cette allure : le seul paramètre utilisable est la vitesse du véhicule. Les passages en pleine accélération sur ce véhicule puissant impliquent des valeurs d'accélération (et de régimes moteurs) élevés, jugés peu représentatifs d'un usage courant et ne sont pas indiqués ici.

En décélération et au freinage, la vitesse initiale du véhicule se situait entre 50 et 90 km/h : le véhicule arrivait systématiquement en mode hybride. Tant qu'il restait en mode hybride, le régime du moteur thermique était faible. En dessous d'une vitesse instantanée de 50 km/h, le véhicule basculait généralement en mode électrique. Pour ces deux allures, le système de récupération d'énergie cinétique est activé. Sur les gammes de vitesses testées, la décélération génère des niveaux de bruit comparables à ceux des passages à vitesse constante en mode hybride, tandis que le freinage produit des niveaux de bruit équivalents à ceux d'une accélération moyenne (Figure 4). Le tableau 2 compare les niveaux de bruit globaux dans les différentes allures et modes de fonctionnement, relativement au mode hybride à vitesse constante. Pour les vitesses où les deux modes

hybrides étaient disponibles, la référence est le niveau le plus élevé.

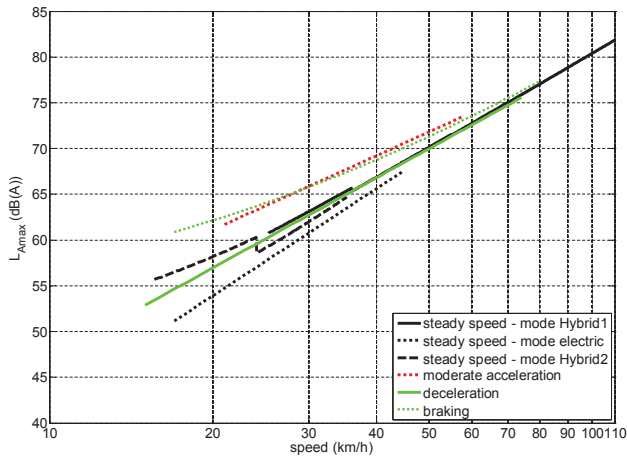


FIGURE 4 – Niveau global maximum du bruit à 7.5 m au passage du véhicule hybride aux différentes allures

TABLEAU 2 – Différence entre les L_{Amax} en dB(A) à différentes allures et les passages à vitesse constante en mode hybride, à 7.5 m du véhicule

| Référence : mode hybride à vitesse constante | Vitesse instantanée | | | |
|--|---------------------|---------|---------|---------|
| | 20 km/h | 30 km/h | 40 km/h | 50 km/h |
| mode électrique à vitesse constante | -4.3 | -2.3 | -1.2 | |
| accélération moyenne | | +2.8 | +2.7 | +1.7 |
| décélération | -1.2 | -0.4 | 0 | -0.2 |
| freinage | +4.0 | +2.7 | +1.9 | +1.2 |

2.2.3 Analyse des sources de bruit

A vitesse constante, la répartition des sources de bruit du véhicule hybride dépend du mode de propulsion, en particulier aux faibles vitesses. Etant donné que le moteur thermique se trouve à proximité de l'essieu avant et que le moteur électrique se trouve vers l'essieu arrière, les contributions respectives des deux types de propulsion peuvent être identifiées, sous réserve que les différences de bruit de roulement des deux essieux puissent être considérées comme négligeables.

A vitesse constante faible en mode électrique, le bruit émis au voisinage de l'essieu arrière (bruit de roulement + bruit de propulsion électrique) excède de 1-2 dB(A) celui émis vers l'essieu avant (bruit de roulement seul), comme le montre la figure 5. Dans les modes hybrides, la contribution en provenance de la zone de l'essieu avant prédomine nettement avec le fonctionnement du moteur thermique.

La contribution des deux zones sources principales est évaluée pour chaque passage et l'évolution moyenne du niveau global en fonction de la vitesse du véhicule est déterminée. On peut noter le faible écart entre les deux zones essieu en mode électrique, et la prédominance de la zone avant jusqu'à 40 km/h en mode hybride (Figure 6). L'effet des changements de rapport n'est pas apparu de façon significative sur les mesures de l'antenne.

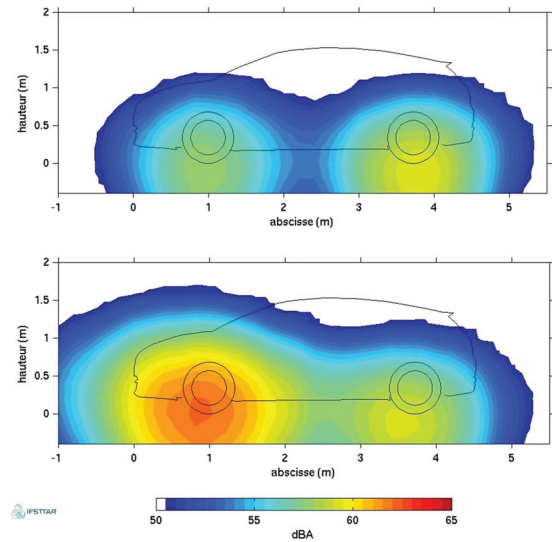


FIGURE 5 – Cartographie acoustique du VEH à 23 km/h en mode électrique (*haut*) et en mode hybride (*bas*) – Niveaux globaux en dB(A) à 2.7 m du côté du véhicule

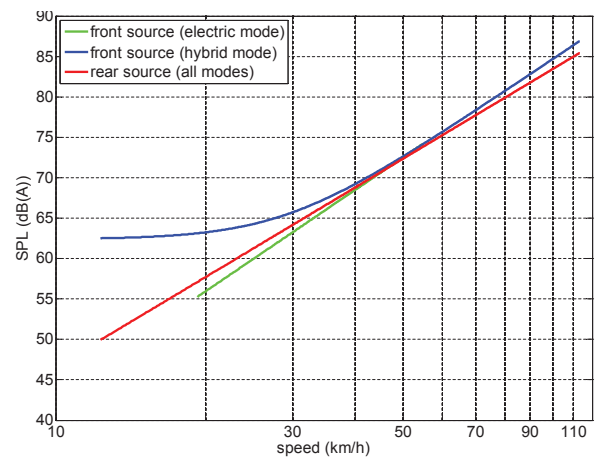


FIGURE 6 – Contribution moyenne des zones sources de l'essieu avant et de l'essieu arrière du véhicule hybride à vitesse constante – Niveaux globaux en dB(A) à 2.7 m

Pour des vitesses voisines de 30 km/h, la figure 7 illustre, en référence à un passage à vitesse constante, d'une part l'accroissement conséquent de la zone essieu avant propulsée par le moteur thermique en accélération, et d'autre part au freinage la contribution de l'essieu arrière où se situe le moteur électrique sollicité pour la récupération d'énergie.

2.2.4 Bilan de l'émission sonore des VE et des VEH

De façon à faire émerger des tendances moyennes sur le comportement sonore des véhicules électriques et hybrides, les mesures effectuées dans le cadre du projet ont été regroupées avec les données déjà disponibles à l'IFSTTAR et au TRL, pour les véhicules de la catégorie I de CNOSSOS-EU (PTAC inférieur à 3.5 t). Le modèle CNOSSOS-EU spécifie les données d'émission typiques d'un véhicule thermique à vitesse constante de 20 à 130 km/h, par bande d'octave de 125 à 4000 Hz⁵, au travers d'une composante de bruit de propulsion et d'une composante de bruit de roulement. Ces données sont établies pour un revêtement de référence de type SMA 0/11 (Stone

5. Des valeurs indicatives sont également fournies à 63 Hz et 8 000 Hz.

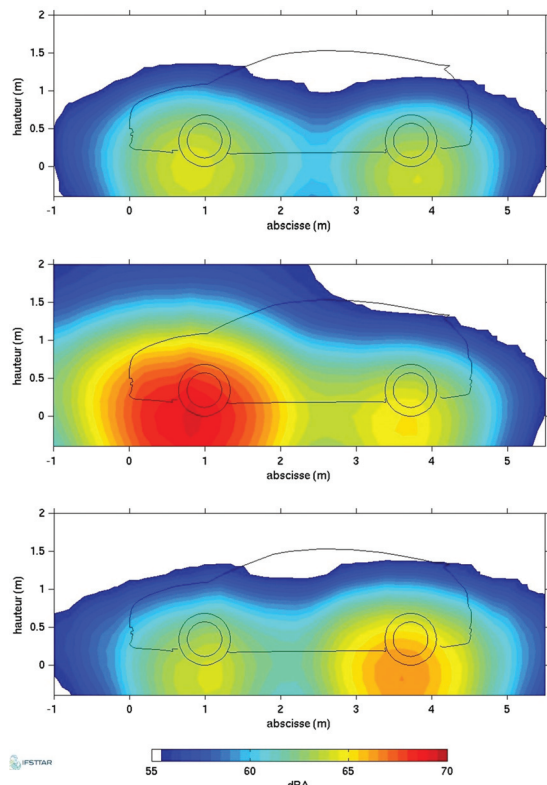


FIGURE 7 – Cartographies acoustiques du VEH à 30 km/h, à vitesse constante (*haut*) et en accélération moyenne (*milieu*) en mode hybride, et au freinage en mode électrique (*bas*) – Niveaux globaux en dB(A) à 2.7 m du côté du véhicule

Mastic Asphalt). Seuls les résultats globaux, calculés à partir des octaves, sont illustrés dans le présent article.

Tous les véhicules IFSTTAR ont été testés sur le même revêtement BBSG 0/10 et des gammes de vitesse variables. Ceux du TRL l'ont été sur un revêtement SMA 0/14 entre 20 et 50 km/h. Ces revêtements, ainsi que la référence de CNOSSOS, sont des surfaces denses. Acoustiquement, ils diffèrent donc entre eux uniquement par la composante de bruit de roulement. En première approximation d'après la base de données franco-allemande DEUFRABASE [11], le bruit de roulement sur une surface comparable à celle du TRL (resp. sur la surface de référence de CNOSSOS) pourrait être de l'ordre de 2 dB(A) supérieur (resp. 2.8 dB(A) supérieur) au revêtement de l'IFSTTAR, pour un véhicule léger à 90 km/h. Dans ce qui suit, aucun correctif n'a été introduit en lien avec les différences de revêtements.

Le jeu de données disponibles contient au total 8 véhicules en mode électrique (incluant le cas échéant les véhicules hybrides en fonctionnement tout électrique) et 3 en mode hybride. On considère ici uniquement les passages à vitesse constante, mesurés à 7.5 m. Des comparaisons sont effectuées avec le modèle d'émission préconisé dans la méthode CNOSSOS-EU actuelle (Figure 8).

En moyenne pour les VE, les mesures TRL sont un peu plus bruyantes que celles de l'IFSTTAR : ces écarts se révèlent particulièrement dans les octaves 500 Hz et 1000 Hz. A toutes les vitesses, la différence entre le véhicule le plus bruyant et le moins bruyant est de 4.5 dB(A). Au delà de possibles différences entre véhicules, la rugosité et le type de revêtement peuvent contribuer à ces écarts, comme mentionné plus haut. En supposant que le bruit de roulement prédomine aux moyennes et hautes vitesses, il y a

compatibilité entre CNOSSOS et les deux séries de mesures pour cette composante, en niveau global uniquement. En revanche, il est clair que la prévision de CNOSSOS-EU dans sa version complète actuelle surestimerait le bruit global pour ce groupe de véhicules électriques, en raison de la composante de bruit de propulsion à vitesse faible (voire moyenne). Une adaptation de CNOSSOS-EU est donc souhaitable pour représenter les véhicules électriques dans la méthode de prévision.

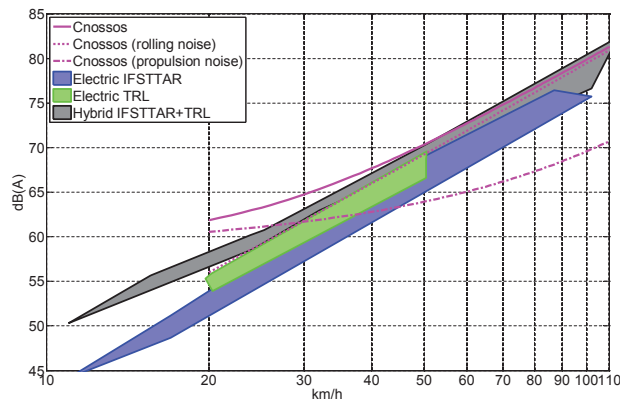


FIGURE 8 – Niveau global maximum du bruit à 7.5 m pour l'ensemble des VE et des VEH à vitesse constante

Très peu de données sont disponibles pour les véhicules hybrides. Il est donc délicat de dégager des tendances et les commentaires sont donnés ici à titre indicatif. Aux vitesses élevées, l'un des véhicules présente une évolution différente des deux autres, qui peut être due aux caractéristiques des pneumatiques. Pour les deux autres véhicules à ces mêmes vitesses, le bruit de roulement du modèle CNOSSOS-EU délivre une prévision acceptable. Cependant, CNOSSOS-EU surestime le bruit total aux faibles vitesses, notamment au travers de la contribution du bruit de propulsion.

3 Adaptation de CNOSSOS-EU pour les VE

L'adaptation du modèle CNOSSOS aux VE offre deux alternatives :

- à partir du modèle existant pour la catégorie 1 : préciser un terme correctif (constant, fonction de la vitesse ou d'un autre paramètre) à appliquer à l'une et/ou l'autre composante de bruit,
- définir explicitement les paramètres d'émission pour une nouvelle catégorie de véhicules (catégorie 5), actuellement laissée ouverte par les concepteurs de CNOSSOS-EU pour des besoins futurs.

Etant donné que le comportement du bruit de propulsion des VE n'a pas pu être clairement isolé pour toutes les octaves et sur l'ensemble de la gamme de vitesses, et qu'il concerne souvent des valeurs très faibles par rapport au bruit de roulement (notamment aux vitesses élevées), le choix s'est porté en l'état actuel sur la première option, à savoir :

- utilisation des spécifications de la catégorie 1
- détermination d'un terme correctif constant par bande d'octave sur le bruit de propulsion

Le modèle d'émission du bruit de propulsion pour les véhicules électriques est alors donné par :

$$L_{WP,VE,i}(v) = A_{P,i} + B_{P,i} \left(\frac{v - v_{ref}}{v_{ref}} \right) + \Delta L_{WP,VE,i} \quad (3)$$

où $A_{P,i}$ et $B_{P,i}$ sont les coefficients CNOSSOS-EU actuellement disponibles pour la catégorie 1 et la vitesse $v_{ref} = 70$ km/h, et $\Delta L_{WP,VE,i}$ est le terme correctif pour l'octave i .

En attendant les conclusions des travaux menés dans le lot 3 du projet, portant sur le bruit de roulement et les pneumatiques à faible bruit, aucune correction n'est encore proposée pour le bruit de roulement.

Pour déterminer les termes correctifs pour chaque octave en s'affranchissant de la variabilité liée aux différences de revêtement entre pistes d'essai, tout en disposant d'une gamme de vitesses suffisamment large, les mesures effectuées sur le site IFSTTAR ont été retenues. Les résultats TRL ont été utilisés pour valider la cohérence de la solution obtenue. Par ailleurs, de façon à déterminer les termes correctifs toutes choses égales par ailleurs, et sur le constat que le modèle CNOSSOS-EU surévalue le bruit de propulsion des véhicules thermiques classiques mesurés sur la piste IFSTTAR, une étape préliminaire a consisté en un ajustement du modèle CNOSSOS à ce contexte. Au final, la démarche générale a suivi les étapes suivantes :

1. ajustement du bruit de propulsion pour les véhicules thermiques, à partir de mesures effectuées sur 11 véhicules thermiques, de motorisation et classe couvrant l'ensemble de la catégorie des véhicules particuliers $\rightarrow A_{P,therm,i}$
2. détermination du bruit de propulsion adapté aux VE $\rightarrow A_{P,VE,i}$
3. détermination du terme correctif :

$$\Delta L_{WP,i} = A_{P,VE,i} - A_{P,therm,i}$$

Dans les octaves où le bruit de propulsion des VE s'est révélé très faible, les termes correctifs ont arbitrairement été limités à -15 dB. Les valeurs $\Delta L_{WP,VE,i}$ obtenues sont listées dans le tableau 3, dans les conditions de référence du modèle européen. Sans modification du bruit de roulement, l'impact de l'utilisation des VE sur le bruit total est significatif en dessous de 50 km/h (Tableau 4 et figure 9).

TABLEAU 3 – Termes correctifs pour le bruit de propulsion des VE dans CNOSSOS

| octave i | 63 Hz | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz |
|----------------------|---------|---------|----------|--------|
| $\Delta L_{WP,VE,i}$ | -5.0 dB | -1.7 dB | -4.2 dB | -15 dB |
| octave i | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz | |
| $\Delta L_{WP,VE,i}$ | -15 dB | -15 dB | -13.8 dB | |

TABLEAU 4 – Différence entre le bruit total du modèle VE (L_{VE}) et de CNOSSOS-EU (L_{therm}), en niveau global

| vitesse (km/h) | 20 | 30 | 40 | 50 |
|------------------------------|------|------|------|------|
| $L_{VE} - L_{therm}$ (dB(A)) | -5.1 | -2.7 | -1.6 | -1.0 |
| vitesse (km/h) | 70 | 90 | 110 | |
| $L_{VE} - L_{therm}$ (dB(A)) | -0.6 | -0.5 | -0.4 | |

4 Conclusion

Dans le cadre du projet FOREVER, des mesures détaillées du bruit émis au passage de quelques véhicules électriques et hybrides ont été effectuées. Les résultats ont

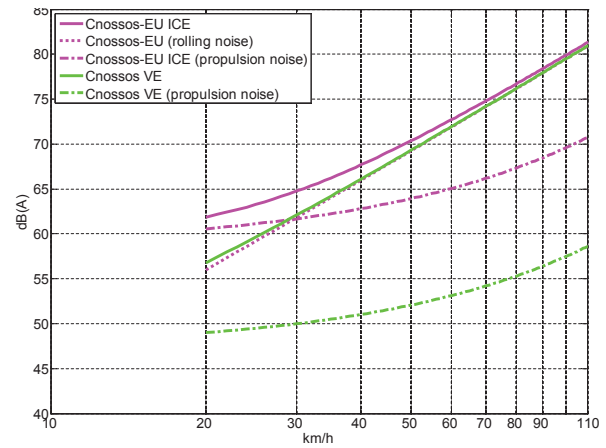


FIGURE 9 – Modèle CNOSSOS-EU et modèle proposé pour les VE à vitesse constante – Niveau de bruit max. à 7.5 m

été regroupés avec des données déjà disponibles auprès des partenaires et des valeurs correctives ont été proposées pour la prise en compte du bruit de propulsion des véhicules électriques dans le modèle européen CNOSSOS-EU. Sous réserve d'une contribution identique du bruit de roulement, les effets sur le bruit global ne sont significatifs qu'en dessous de 50 km/h. Pour les véhicules hybrides, les différences constatées avec les véhicules thermiques ne justifient pas d'introduire de correction dans CNOSSOS-EU.

Remerciements

Le projet FOREVER est financé dans le cadre du Programme Transnational de Recherche Routière du CEDR. Les auteurs remercient les constructeurs automobiles pour la mise à disposition des véhicules.

Références

- [1] <http://forever.fehrl.org/>
- [2] F. Stenlund, *CityHush : Noise criteria for vehicles to enter Q-Zones*. Deliverable 3.2.2 (2011).
- [3] K. Kaliski, I. Old, L. Blomberg, Sound emissions from a plug-in electric vehicle. *Internoise 2012*, New York, USA (2012).
- [4] U. Sandberg, J. A. Ejsmont, *Tyre/Road Noise Reference Book*, INFORMEX, Sweden (2002).
- [5] J.-F. Hamet, F. Besnard, S. Doisy, J. Lelong, E. Le Duc, New vehicle noise emission for French traffic noise prediction, *Applied Acoustics* **71**, 861-869 (2010).
- [6] NF EN ISO 11819-1, Acoustics – Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise – Part 1 : Statistical Pass-By method (2002).
- [7] ISO 362-1 :2007/Cor 1 :2009, Measurement of noise emitted by accelerating road vehicles – Engineering method – Part 1 : M and N categories (2009).
- [8] S. Kephelopoulos, M. Paviotti, F. Anfosso-Lédée, *Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS-EU)*, JRC Report (2012).
- [9] SAE J2889-1, Measurement of minimum noise emitted by road vehicles (2012).
- [10] ISO/CD 16254, Acoustics - Measurement of minimum noise emitted by road vehicles (2013).
- [11] <http://deufrako.bast.de/>