

Véhicules électriques et hybrides : enjeux acoustiques

Marie-Agnès Pallas,
Roger Chatagnon
IFSTTAR
AME/LAE
25, avenue François Mitterrand
Case 24
69675 Bron CEDEX
E-mail : marie-agnes.pallas@ifsttar.fr

Université de Lyon
CeLyA
69622 Lyon
E-mail : roger.chatagnon@ifsttar.fr

Résumé

Dans un contexte réglementaire visant à réduire les nuisances environnementales liées au trafic routier, les véhicules électriques et hybrides bénéficient d'atouts intéressants. La réduction du bruit émis est un argument régulièrement souligné mais peu souvent quantifié. Cet article considère le cas des véhicules légers. Il analyse les niveaux de bruit émis par les véhicules électriques et hybrides sur une vaste gamme de conditions de fonctionnement et d'allures représentatives d'un usage réel de ces véhicules, en comparaison des véhicules thermiques classiques. L'intérêt d'une prise en compte spécifique de ces véhicules dans les modèles de prévision du bruit routier est évoqué. Malgré la réduction de bruit notable introduite individuellement par le véhicule électrique aux vitesses urbaines, l'impact pour la population à l'échelle d'un trafic mixte de véhicules thermiques et de véhicules en mode électrique restera limité tant que le trafic sera majoritairement constitué de véhicules thermiques.



Malgré une sensibilisation croissante des États et de la Communauté Européenne à la problématique du bruit dans l'environnement [1], la part des véhicules routiers dans l'exposition au bruit et la gêne ressentie par la population (riverains et usagers), en milieu urbain ou à proximité des grandes infrastructures, reste importante. Différentes solutions sont préconisées, incluant la réduction de l'émission de bruit et la mise en œuvre de moyens de protection de la population. En particulier, l'évolution des réglementations, visant à diminuer les valeurs limites du bruit émis, conduit progressivement à la mise sur le marché de véhicules globalement moins bruyants [2].

Les véhicules électriques et hybrides bénéficient d'une image environnementale favorable. Leur développement est motivé par leurs qualités environnementales liées à la contribution de la motorisation électrique, en premier lieu pour ce qui concerne les émissions de polluants en usage urbain. En propulsion tout électrique, le bruit émis peut être significativement réduit en fonction des conditions de fonctionnement. Cet argument acoustique est souvent mis en avant par les constructeurs ou les collectivités en soutien aux démarches engagées pour réduire les nuisances environnementales. Cependant, il convient de préciser davantage dans quelles circonstances ces véhicules apportent une réelle diminution du bruit émis, quantifier cette réduction et apprécier l'impact effectif à l'échelle du trafic.

Parallèlement aux efforts de réduction à la source de l'émission sonore des véhicules routiers, la question de la dangerosité des véhicules silencieux pour les piétons a été soulevée et l'ajout de signaux d'alerte est préconisé pour ces véhicules [2]. Des recherches spécifiques sont menées sur ce sujet, par exemple dans le projet eVader [3]. Cet aspect n'est pas abordé dans cet article.

Cet article se focalise sur les véhicules légers. Il analyse les niveaux de bruit émis par les véhicules électriques et hybrides sur une vaste gamme de conditions de fonctionnement et d'allures représentatives d'un usage réel de ces véhicules, en s'appuyant sur des campagnes expérimentales menées par l'IFSTTAR, dont certaines dans le cadre du projet FOREVER [4].

Après avoir situé la part de véhicules utilisant une propulsion électrique relativement au parc de véhicules légers en France et rappelé les caractéristiques du bruit émis par les véhicules thermiques classiques, les comportements acoustiques d'un véhicule électrique et d'un véhicule hybride seront détaillés. Un bilan des émissions de bruit de ces différentes technologies à vitesse stabilisée sera ensuite présenté et les conséquences pour les modèles de prévision actuellement disponibles seront évoquées.

Parc électromobile

La part des véhicules électriques (VE) et des véhicules hybrides (VH) dans le parc des véhicules légers en France est encore faible, mais en constante augmentation comme le montrent les figures 1 et 2. La diversification de l'offre proposée par les constructeurs, à la fois en gamme de véhicules et en technologie (électrique, électrique rechargeable, hybride essence ou diesel), associée aux mesures d'incitation financière (bonus écologique), augmente l'attractivité de ces véhicules. Les immatriculations des VE et VH enregistrées en 2012 ont présenté une très forte croissance, l'évolution restant largement positive en 2013. Ainsi, les véhicules hybrides associant un moteur électrique à un moteur thermique essence ou diesel ont représenté 2,6 % des ventes de véhicules particuliers en 2013, proportion en augmentation de 70 % par rapport à 2012 (données CCFA et AVERE-France [5,6]). Les véhicules électriques sont vendus en nombre plus limité, constituant 0,5 % du nombre d'immatriculations, proportion en croissance de 63 % par rapport à l'année précédente. À l'échelle européenne, la France a cependant une position de leader quant au nombre de véhicules légers électriques en circulation (35 % du parc électrique européen fin 2012 [7]).

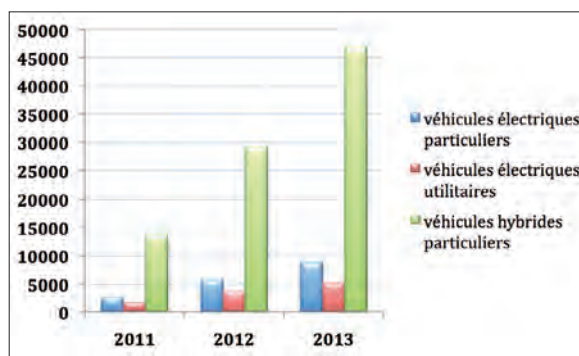


Fig. 1 : Nombre de véhicules électriques et hybrides immatriculés en France de 2011 à 2013 (données AVERE-France [5])

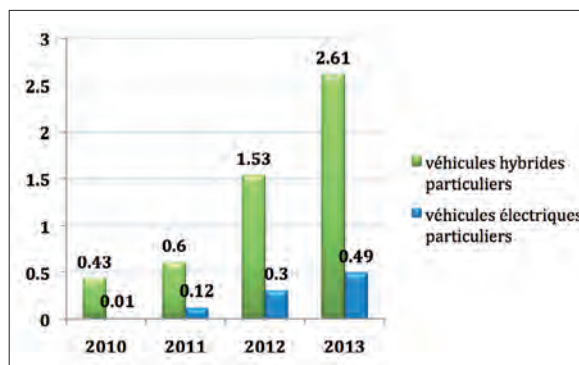


Fig. 2 : Immatriculation des véhicules particuliers hybrides et électriques en France de 2010 à 2013, en % des véhicules particuliers immatriculés pour tous types d'énergie (données CCFA [6])

Étant donné la durée de vie du parc automobile roulant, ces véhicules représentent une part encore faible des véhicules en circulation. L'usage plus volontiers urbain des véhicules électriques laisse présager une pénétration un peu plus accentuée dans les villes.

Les prévisions font état d'une poursuite de la croissance et les objectifs gouvernementaux ciblent 2 millions de véhicules « décarbonés » (électriques et électriques rechargeables) en 2020, sachant que l'équipement des infrastructures en bornes de recharge joue un rôle prépondérant pour le dynamisme de la filière électrique [8].

Émission de bruit des véhicules : une caractérisation à deux échelles

La description de l'émission de bruit au passage de véhicules est effectuée au moyen de capteurs acoustiques placés en bord de route. La procédure la plus classique utilise un ou plusieurs microphone(s) disposé(s) à 7,5 m de l'axe de la voie et à une hauteur de 1,2 m (Figure 3) dans des conditions environnementales et météorologiques spécifiées dans les normes [9,10]. L'indicateur acoustique est la valeur maximale atteinte par le niveau de pression pondéré A (LA_{max}) pendant le passage du véhicule, exprimé en niveau global ou par bande de fréquence (octave ou tiers d'octave). Pour caractériser complètement le comportement acoustique du véhicule en usage réel, toutes les allures du véhicule peuvent être explorées (vitesse constante, accélération, décélération et freinage) et, le cas échéant, les différents modes de fonctionnement.

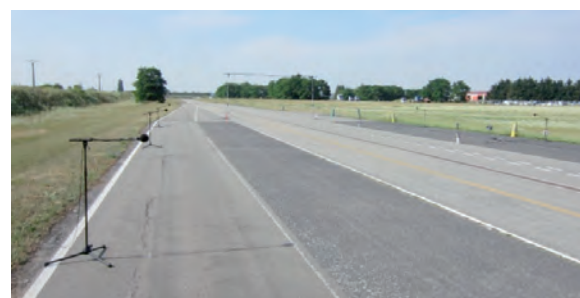


Fig. 3 : Mesure de bruit au passage par microphone à 7,5 m sur la piste IFSTTAR (Lyon)

Pour décrire le véhicule plus finement, à l'échelle de ses différentes sources, on peut utiliser une antenne microphonique. Ce dispositif, constitué d'un ensemble de microphones et associé à un algorithme de traitement d'antenne, est équivalent à un système de mesure directif focalisant l'écoute sur un point focal variable, permettant de suivre les sources sur le véhicule pendant le passage devant l'antenne. La procédure de traitement d'antenne la plus courante dans ce contexte dérive de la formation de voies (beamforming) [11]. La méthode délivre des cartographies acoustiques du véhicule, permettant de localiser et quantifier la contribution des sources de bruit principales, par bande de fréquence ou en niveau global. Elle peut être complétée par une étape de déconvolution par la réponse de l'antenne, améliorant la résolution spatiale (capacité de séparer des sources proches) du dispositif. Différentes géométries d'antenne sont utilisées dans ce contexte. L'IFSTTAR dispose en particulier d'une antenne de 57 microphones répartis sur des cercles concentriques dont les diamètres croissent de façon logarithmique, offrant une ouverture maximale de 2,56 m (Figure 4).

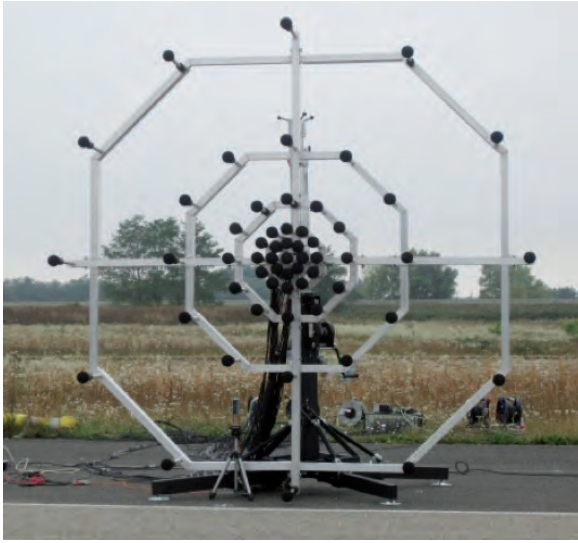


Fig. 4 : Antenne plane de 57 microphones (IFSTTAR)

Ces deux échelles de mesure – véhicule et sources – sont exploitées dans cet article. Tous les résultats présentés proviennent d'expérimentations effectuées sur les pistes de l'IFSTTAR situées dans la région lyonnaise. Le revêtement est du type BBSG 0/10. Les analyses sont réalisées par bande d'octave ou en niveau global. En complément, la vitesse instantanée du véhicule au droit des capteurs acoustiques, ainsi que l'accélération (resp. la décélération) moyenne sur la zone de test sont déterminées au moyen de cellules infrarouges, associées à des plaques réfléchissantes fixées sur le véhicule.

Prise en compte du bruit de fond

Dans le cas de véhicules peu bruyants, la mesure du bruit émis sur route ou sur piste d'essai peut devenir problématique, en particulier aux faibles vitesses. En effet, les normes encadrant les procédures de mesure au passage imposent un écart minimum de 10 dB(A) avec le bruit de fond pour la validation d'une mesure, en niveau global ou dans une bande de fréquence [9,10]. À moins de se trouver sur un site particulièrement protégé, le niveau du bruit de fond peut conduire à rejeter des mesures à certaines fréquences ou en niveau global, pour des véhicules « silencieux ».

La norme ISO/DIS 16254 propose des conditions plus souples. Destinée à évaluer le bruit minimum émis par les véhicules, elle s'inscrit dans une démarche sécuritaire, visant à garantir un niveau de bruit suffisant pour permettre aux autres usagers de détecter la présence et le mouvement d'un véhicule proche [2]. La procédure de mesurage préconise l'utilisation d'un terme correctif appliqué à la valeur de bruit global mesurée, lorsque l'écart avec le bruit de fond est compris entre 3 et 10 dB(A) [12]. Les valeurs sont rejetées si l'écart est inférieur à 3 dB(A). Pour une analyse par tiers d'octave, un correctif est apporté si l'écart se situe entre 6 et 10 dB(A). Dans les expérimentations présentées dans cet article, une approche analogue a été utilisée : une correction a été effectuée pour un écart compris entre 3 dB(A) et 10 dB(A) (resp. 5 dB(A) et 10 dB(A)) en niveau global (resp. par bande d'octave).

Seules les valeurs associées à des écarts inférieurs à 3 dB(A) (resp. 5 dB(A)) ont été invalidées. La présence de perturbations résiduelles par le bruit de fond reste toutefois possible.

À l'avenir, la réalisation de mesures *indoor* (en chambre semi-anéchoïque équipée d'un banc de test) pour simuler des mesures au passage *outdoor* (sur piste d'essais extérieure) pourra être une solution aux problèmes de perturbation par le bruit de fond pour ces véhicules. Si une norme de mesure est actuellement en préparation dans ce sens [13], l'équivalence des procédures *indoor/outdoor* nécessite d'être encore approfondie.

Les mesures effectuées avec l'antenne microphonique ne sont pas pénalisées par le bruit de fond, en raison des propriétés directives du système qui opère implicitement un filtrage spatial sur le bruit environnant.

Bruit des véhicules thermiques : mesure, modèle et prévision

En préambule à l'analyse du comportement acoustique des véhicules équipés de nouvelles technologies électriques et hybrides, il est pertinent d'effectuer un bref rappel de celui des véhicules thermiques. Il est bien connu que le bruit émis par un véhicule à vitesse constante résulte de deux contributions principales : d'une part, le bruit de roulement L_{roul} , fonction de la vitesse v du véhicule et dépendant des caractéristiques des pneumatiques et du revêtement de la chaussée, et d'autre part le bruit de propulsion L_{prop} , fonction du régime moteur r [14] :

$$L_{Amax}(r, v) = L_{prop}(r) \oplus L_{roul}(v) \quad (1)$$

où $\oplus$ est l'opérateur de sommation énergétique. Le bruit de propulsion et le bruit de roulement peuvent être modélisés par les lois suivantes :

$$\begin{aligned} L_{prop}(r) &= \alpha_p \log_{10} \left(\frac{r}{r_{ref}} \right) + L_{p0} \\ L_{roul}(v) &= \alpha_r \log_{10} \left(\frac{v}{v_{ref}} \right) + L_{r0} \end{aligned} \quad (2)$$

r_{ref} et v_{ref} sont respectivement le régime moteur et la vitesse de référence (par exemple $r_{ref} = 1000$ tr/min et $v_{ref} = 70$ km/h).

Exemple d'un petit véhicule léger

Le cas présenté concerne un petit véhicule thermique (classe « supermini » selon EuroNCAP) à motorisation essence. Les résultats de mesures de bruit au passage à vitesse constante varient fortement en fonction du rapport de boîte engagé aux vitesses faibles (Figure 5a, page suivante) où le bruit de propulsion est prédominant. En revanche, le choix du rapport de boîte a peu d'effet aux vitesses élevées où le bruit de roulement prédomine. Le bruit de propulsion et le bruit de roulement définis dans les équations (1) et (2) sont identifiés à partir des mesures. Le bruit total émis par le véhicule peut ensuite être reconstitué pour une stratégie réaliste de changement de rapport, adaptée aux caractéristiques du moteur (Figure 5b, page suivante).

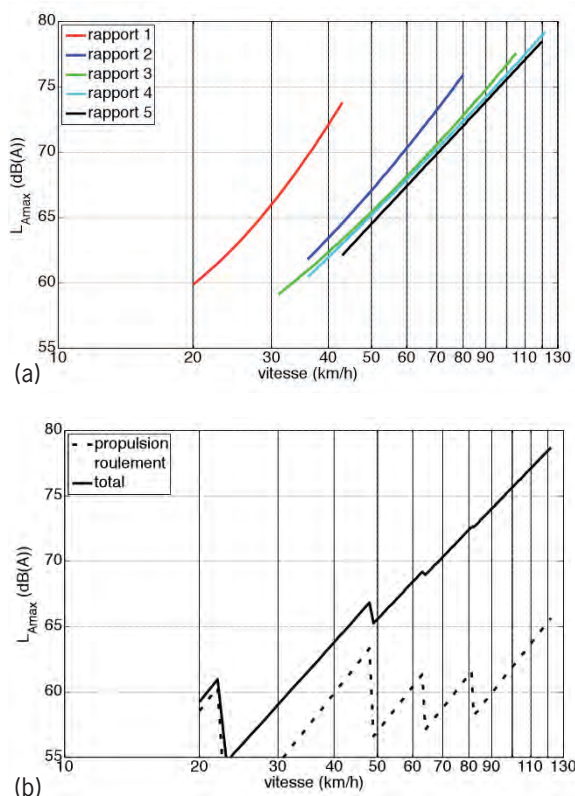


Fig. 5 : Émission de bruit au passage d'un petit véhicule thermique à essence à vitesse constante, niveaux de bruit max. à 7,5 m. (a) Régressions sur les mesures par rapport de boîte. (b) Lois d'émission (propulsion et roulement) du véhicule et bruit total

Émission de bruit des véhicules thermiques

Pour permettre une comparaison ultérieure des véhicules suivant les types d'énergie, on considère ici un panel de douze véhicules légers à moteur thermique, essence ou diesel, couvrant toute la gamme de la petite citadine au monospace, mesurés dans les mêmes conditions sur le même site IFSTTAR. La figure 6 schématise la dispersion des niveaux de bruit à vitesse constante, de l'ordre de 8 dB(A) à faible vitesse et de 5 dB(A) aux vitesses élevées.

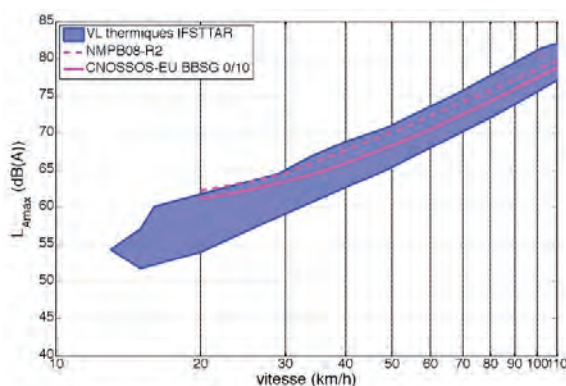


Fig. 6 : Représentation schématique de l'enveloppe incluant les lois du bruit total de douze véhicules légers à moteur thermique mesurés sur le site IFSTTAR – modèle de prévision NMPB08 (revêtement R2, âge 5 ans) – modèle CNOSSOS-EU corrigé pour un revêtement BBSG 0/10¹

Modèles de prévision

Des méthodes de prévision ont été développées pour uniformiser les procédures utilisées dans les études d'impact ou l'élaboration de cartes de bruit stratégiques, comme la NMPB08 en France ou CNOSSOS-EU en Europe. Pour le bruit routier, elles précisent les lois mathématiques décrivant l'émission de bruit d'un véhicule thermique moyen du parc roulant de véhicules légers, au moyen d'une composante de bruit de roulement et d'une composante de bruit de propulsion, en fonction de la vitesse. Elles seront utilisées ici à titre de comparaison pour apprécier les spécificités des technologies électriques et hybrides.

Méthode NMPB08

La NMPB08 [15] spécifie l'émission de bruit en niveau global. Le bruit de roulement suit une évolution similaire à l'expression donnée dans l'équation (2), le revêtement BBSG 0/10 correspondant à la classe de revêtements R2. Contrairement à (2), le bruit de propulsion dépend de la vitesse v et suit une loi analogue à celle du bruit de roulement, les coefficients a_p et $L_p(v_{ref})$ étant spécifiés pour trois intervalles de vitesse contigus (équation (3)). La distribution fréquentielle est identique à toutes les vitesses, donnée en tiers d'octave dans [15].

$$L_{prop}(v) = a_p \log_{10} \left(\frac{v}{v_{ref}} \right) + L_p(v_{ref}), \quad (3)$$

par intervalle de vitesse.

Méthode CNOSSOS-EU

La méthode européenne CNOSSOS-EU [16] décrit l'émission de bruit d'un véhicule léger par des lois spécifiées par bande d'octave, dans des conditions de référence correspondant à un revêtement dense équivalent à une moyenne de BBSG 0/11 et SMA 0/11. Si pour chaque octave le bruit de roulement suit une loi identique à l'expression (2), le bruit de propulsion est en revanche exprimé par :

$$L_{prop,i}(v) = A_{p,i} + B_{p,i} \frac{v - v_{ref}}{v_{ref}}, \quad \text{pour l'octave } i \quad (4)$$

Une correction par bande d'octave est introduite ici sur le bruit de roulement, de façon à proposer une composante plus représentative du revêtement BBSG 0/10 : elle est déterminée par différence des spectres délivrés par la base de données de bruit de roulement DEUFRABASE [17] pour les revêtements SMA 0/11 et BBSG 0/10. Elle est supposée indépendante de la vitesse.

Émission de bruit d'un véhicule léger électrique

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 supermini (classement EuroNCAP) 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 dits 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.

Comportement à vitesse constante

À 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 ² :

$$L_{Amax}(v) = 70,1 + 35,0 \log\left(\frac{v}{70}\right) \text{ dB(A)} \quad (5)$$

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 à partir des simples mesures au passage par microphone. En comparant l'émission de bruit de ce véhicule électrique avec celle du petit véhicule thermique présenté dans le chapitre : Exemple d'un petit véhicule léger page 19, on remarque que le bruit total du VE est très proche de la composante de bruit de roulement du véhicule thermique (sachant qu'ils sont équipés de pneumatiques différents). La réduction de bruit apportée par ce véhicule électrique atteint 8 dB(A) aux faibles vitesses en comparaison du véhicule thermique au rapport 1, est inférieure à 2,5 dB(A) au rapport 2 et négligeable aux vitesses et rapports supérieurs (soit au-delà de 50 km/h).

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.

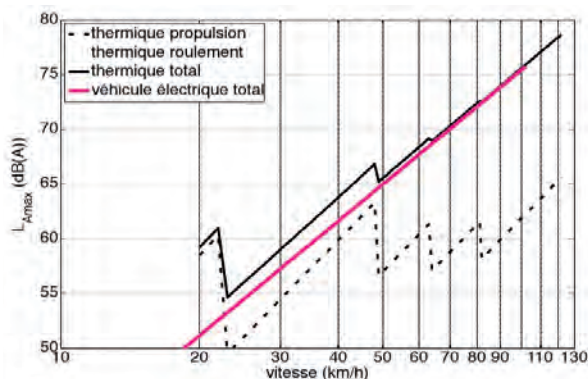


Fig. 7 : Niveau de bruit à 7,5 m au passage du véhicule électrique à vitesse constante, comparé à la loi d'émission d'un véhicule thermique à moteur essence

Comportement aux autres allures

Deux types d'accélération ont été testés : accélération forte (pédale d'accélérateur complètement enfoncée) et moyenne (position intermédiaire de la pédale). 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 types d'accélération 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 arrive à vitesse constante et la pédale d'accélérateur est relâchée (resp. la pédale de frein est 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. 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 8 regroupe les régressions sur les mesures 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 de ce véhicule à vitesse constante pour quelques valeurs de vitesse.

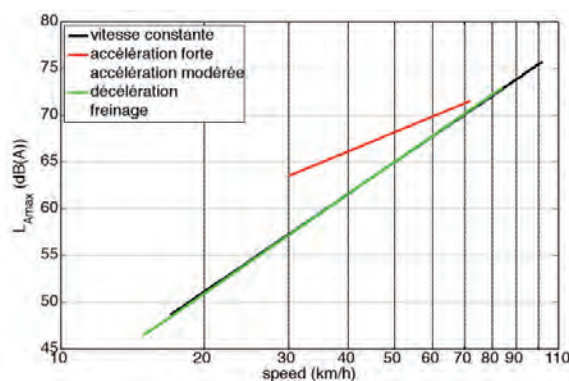


Fig. 8 : Niveau de bruit maximum à 7,5 m au passage du véhicule électrique à différentes allures

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

Tabl. 1 : Différence en dB(A) entre les L_{Amax} à différentes allures et les passages à vitesse constante, pour le véhicule électrique à 7,5 m

1 - Le revêtement de la piste IFSTTAR est ancien, peu circulé et ne présente pas de défauts de surface. Le modèle CNOSSOS-EU est donné dans les conditions de référence d'un revêtement d'âge 2 à 7 ans : les termes correctifs en fonction de l'âge ne sont pas encore publiés. Pour se situer dans des conditions similaires, la NMPB08 est racée pour un âge intermédiaire de 5 ans.
2 - Dans cet article, on utilise $v_{ref} = 70$ km/h, comme la méthode CNOSSOS-EU. La méthode NMPB08 utilise $v_{ref} = 90$ km/h.

Émission de bruit d'un véhicule léger hybride

La part des véhicules hybrides dans le parc automobile en circulation 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 » (classement EuroNCAP) a été étudiée. Son moteur thermique est couplé à une boîte pilotée à six 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.

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.

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 global à 7,5 m suit la loi :

$$L_{Amax}(v) = 75.1 + 38.9 \log\left(\frac{v}{70}\right) \quad \text{dB(A)} \quad (6)$$

où v est la vitesse en km/h 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). Lorsque le moteur thermique fonctionne (modes hybrides), 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. Lors d'une séparation des contributions telle que donnée en (1), la composante liée au régime moteur concerne la propulsion associée au moteur thermique, alors que celle liée à la seule vitesse du véhicule inclut la contribution du moteur électrique en plus du bruit de roulement.

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 pouvant impliquer 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 9). 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.

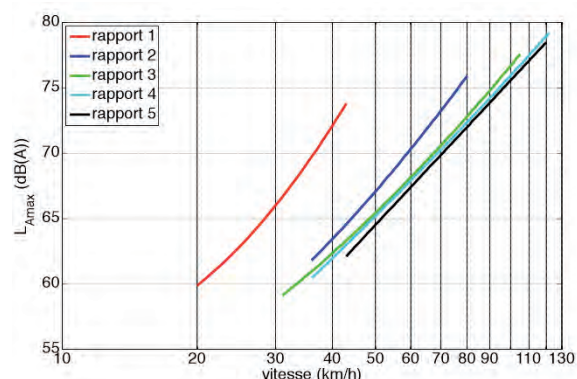


Fig. 9 : Niveau de bruit maximum à 7,5 m au passage du véhicule hybride à différentes allures et dans différents modes de fonctionnement

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

Tabl. 2 : Différence en dB(A) entre les L_{Amax} à différentes allures et les passages à vitesse constante en mode hybride, à 7,5 m du véhicule

Contribution des sources de bruit

À vitesse constante, la répartition des sources de bruit du véhicule hybride dépend du mode de propulsion, en particulier aux faibles vitesses. Étant 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.

À 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 10, page suivante. Dans les modes hybrides, la contribution en provenance de la zone de l'essieu avant prédomine nettement avec le fonctionnement du moteur thermique.

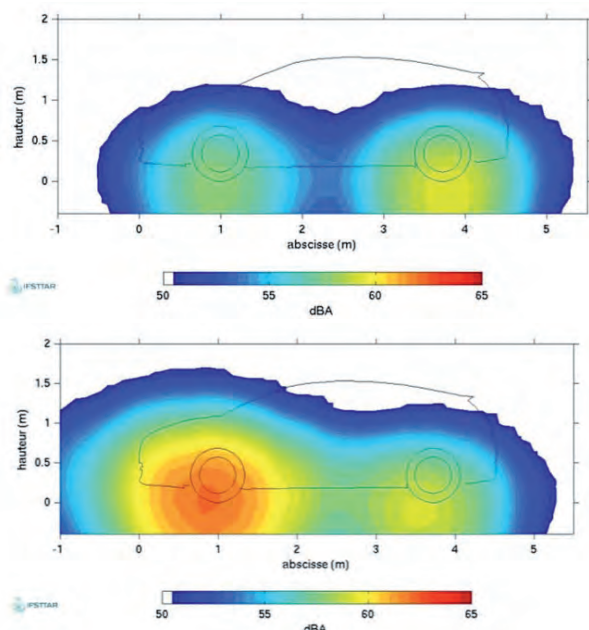


Fig. 10 : Cartographie acoustique du VEH à 23 km/h en mode électrique (a) et en mode hybride (b) – Niveaux globaux en dB(A) à 2,7 m du côté du véhicule

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 11). L'effet des changements de rapport n'est pas apparu de façon significative sur les mesures de l'antenne.

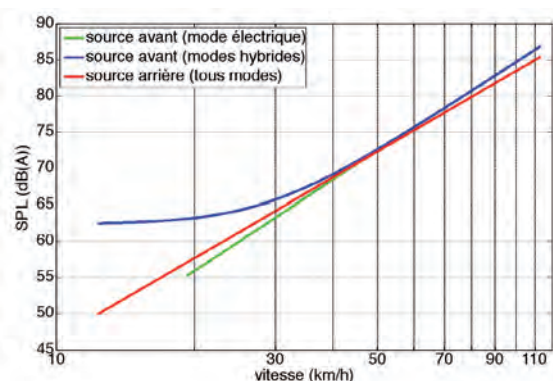


Fig. 11 : Contribution moyenne des zones sources de l'essieu avant et de l'essieu arrière du véhicule hybride à vitesse constante – Niveaux globaux en dB(A) à 2,7 m

Pour des vitesses voisines de 30 km/h, la figure 12 illustre, en référence à un passage à vitesse constante (Figure 12a), d'une part l'accroissement conséquent de la zone essieu avant propulsée par le moteur thermique en accélération (Figure 12b), et d'autre part au freinage la contribution de l'essieu arrière où se situe le moteur électrique sollicité pour la récupération d'énergie (Figure 12c).

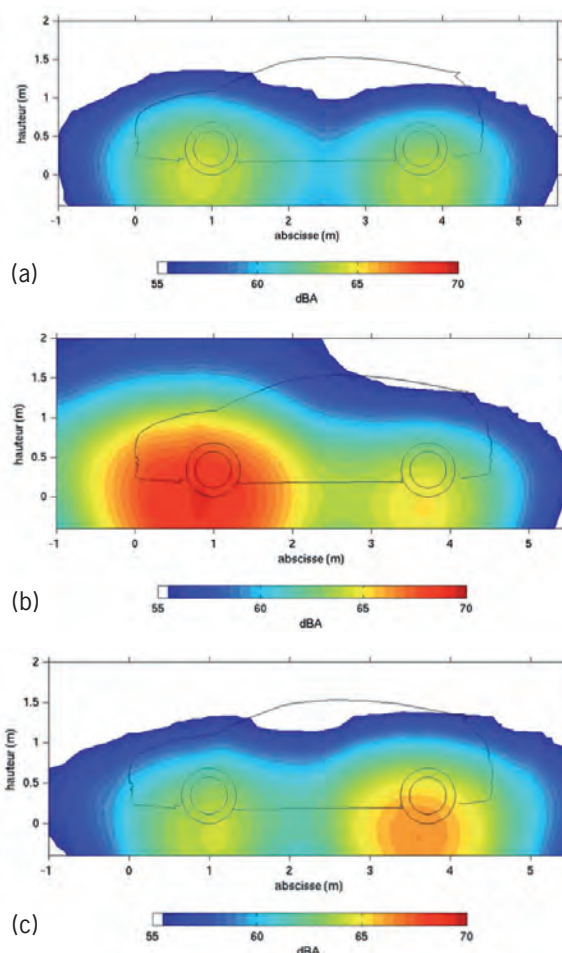


Fig. 12 : Cartographies acoustiques du véhicule hybride à 30 km/h, à vitesse constante (a) et en accélération modérée (b) en mode hybride, et au freinage en mode électrique. (c) Niveaux globaux en dB(A) à 2,7 m du côté du véhicule

Thermiques, hybrides ou électriques : quelles différences ?

Ce paragraphe compare les comportements acoustiques à vitesse constante, en niveau global, de véhicules légers équipés de différentes technologies de motorisation. Il s'appuie sur un ensemble de mesures effectuées par l'IFSTTAR sur le même site de revêtement BBSG 0/10, à savoir :

- Douze véhicules à moteur thermique, essence ou diesel (cf. Chapitre : Émission de bruit des véhicules thermiques, page 20)
- Deux véhicules en mode hybride (un hybride parallèle et un hybride série-parallèle)
- Six véhicules en mode électrique (incluant les deux hybrides en fonctionnement tout électrique)

Certains échantillons de véhicules étant en quantité limitée, les tendances présentées doivent être considérées comme indicatives. Plutôt que des statistiques par technologie, on choisit de représenter l'étendue des lois d'émission (Figure 13). Les véhicules hybrides en fonctionnement hybride se comportent globalement comme les véhicules thermiques sur l'ensemble de la gamme de vitesses,

ce qui est prévisible en raison du fonctionnement du moteur thermique dans ce mode. Aux faibles vitesses, la réduction de bruit global des véhicules en propulsion électrique est dans l'ensemble très significative, même si l'on peut remarquer que certains véhicules thermiques (typiquement des petits véhicules à motorisation essence) ne sont guère plus bruyants que les véhicules électriques. Le comportement global moins bruyant des véhicules électriques reste valable aux vitesses élevées, sachant que ce sont essentiellement des petits véhicules, équipés de pneumatiques de faibles dimensions, induisant de ce fait une contribution plus modérée du bruit de roulement.

Il apparaît clairement que les modèles de prévision, établis pour des véhicules thermiques, sont peu performants pour représenter l'émission de bruit des véhicules électriques au-dessous de 40-50 km/h. Par ailleurs même s'il est faible, le bruit de propulsion ne peut pas être considéré comme négligeable devant le bruit de roulement à basse vitesse, en particulier dans certaines bandes de fréquence. Dans le projet FOREVER, une proposition de termes correctifs a été formulée pour la prise en compte des véhicules électriques dans la méthode CNOSSOS-EU [18,19].

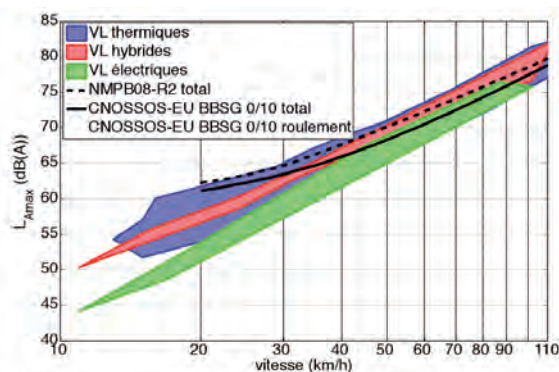


Fig. 13 : Niveau global maximum du bruit à 7,5 m pour l'ensemble des thermiques, hybrides et électriques à vitesse constante

Impact à l'échelle du trafic

Si la réduction de bruit au passage d'un véhicule électrique peut être directement appréciable par un riverain qui entend passer successivement un véhicule thermique classique et un véhicule en propulsion électrique dans des conditions de vitesse urbaine, qu'en est-il à l'échelle d'un trafic ?

Soit un trafic de référence composé de 100 % de véhicules légers thermiques. Considérons un trafic de véhicules légers composé d'une proportion n_{elec} de véhicules électriques et de n_{therm} véhicules thermiques, avec $n_{elec} + n_{therm} = 1$. Si on note $\Delta_{elec/therm}$ la différence de bruit émis par un véhicule électrique par rapport à un véhicule thermique dans une condition de circulation donnée, il se produira au niveau du bruit de trafic une différence de niveau de bruit Δ_{trafic} donnée par :

$$\Delta_{trafic} = 10 \log(n_{elec} 10^{\Delta_{elec/therm}} + n_{therm}) \quad (7)$$

Le tableau 3 illustre les gains obtenus dans les conditions d'un trafic composé de 25 % de véhicules en propulsion électrique et 75 % de véhicules thermiques, puis 50 % de véhicules électriques, dans le cas d'une réduction unitaire de 8 dB(A) (resp. 4 dB(A)). On voit ainsi qu'un impact significatif sur le bruit de trafic nécessite la présence d'une proportion importante de véhicules à propulsion électrique. Si les conditions de trafic mixte illustrées ici sont encore fictives à ce jour, elles seront probablement rencontrées dans un premier temps dans les centres-villes restreignant l'accès des véhicules les plus polluants, et favorisant ainsi l'usage de véhicules électriques et hybrides.

Composition du trafic	$\Delta_{elec/therm} = -8 \text{ dB(A)}$	$\Delta_{elec/therm} = -4 \text{ dB(A)}$
25% élec. + 75% therm.	-1,0 dB(A)	-0,7 dB(A)
50% élec. + 50% therm.	-2,4 dB(A)	-1,6 dB(A)

Tabl. 3 : Écart de niveau de bruit global d'un trafic mixte de véhicules légers électriques + thermiques en fonction de la réduction de bruit $\Delta_{elec/therm}$ d'un véhicule électrique, en référence à un trafic de 100 % véhicules thermiques.

Conclusion

Bien qu'en fort développement, les véhicules électriques et hybrides constituent une part encore faible du parc roulant de véhicules légers. Pour ce qui concerne le bruit émis au passage à vitesse stabilisée, les véhicules hybrides en mode hybride ne se distinguent pas des véhicules thermiques classiques. Les véhicules en propulsion tout électrique apportent une réduction significative du bruit émis aux basses vitesses, limitée à la gamme de vitesses urbaines. Cette réduction est faible aux basses fréquences, beaucoup plus importante aux moyennes et hautes fréquences. Ainsi, une prise en compte spécifique de ces véhicules est souhaitable dans les modèles de prévision. En lien avec la sollicitation du moteur électrique pour la récupération d'énergie dans les phases de freinage, cette allure peut introduire un accroissement du bruit non négligeable en mode électrique.

Malgré la réduction de bruit notable introduite individuellement par le véhicule électrique, l'impact pour la population à l'échelle d'un trafic mixte de véhicules thermiques et de véhicules en mode électrique ne sera effectif que lorsque la part de véhicules électromobiles sera du même ordre que celle des véhicules thermiques. Ainsi, cette situation concernera en premier lieu les zones urbaines assujetties à des restrictions d'accès aux véhicules polluants en favorisant la circulation des véhicules électromobiles.

Remerciements

Les résultats présentés ont bénéficié des contributions précieuses de Joël Lelong, Nadine Chassignol et Michel Bérengier. Certaines expérimentations ont été effectuées dans le cadre du projet FOREVER, financé par la Conférence Européenne des Directeurs des Routes (CEDR) dans son Programme de Recherche Transnationale. Les auteurs remercient les constructeurs automobiles pour la mise à disposition des véhicules.

Références bibliographiques

[1] Directive européenne 2002/49/CE du Parlement européen et du Conseil du 25 juin 2002 relative à l'évaluation et à la gestion du bruit dans l'environnement

[2] Trafic routier : les députés réduisent les émissions sonores. Communiqué de presse 20140331IPR41178 du 2 avril 2014. Parlement européen

[3] E. Parizet, Perception de signaux d'avertissement de véhicules électriques, Congrès Français d'Acoustique (CFA2014), Poitiers, France, <http://www.evader-project.eu/>, 2014

[4] <http://forever.fehrl.org/>

[5] AVERE-France, Baromètre Avere-France des ventes de véhicules électriques et hybrides – bilan 2013, <http://www.france-mobilite-electrique.org/les-ventes-de-voitures-electriques-en-france>, 291.html

[6] Comité des constructeurs français d'automobiles. Tableau de bord automobile n° 29 (2011) et n° 33 (2013)

[7] AVERE-France, Bilan des immatriculations de véhicules électriques en Europe, 30 novembre 2012, <http://www.france-mobilite-electrique.org/bilan-des-immatriculations-de-vehicules-electriques-en-europe>, 4043.html

[8] Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer, Lancement du plan national pour le développement des véhicules électriques et hybrides rechargeables, dossier de presse du 1er octobre 2009, et Avancées du plan du développement des véhicules électriques et hybrides, dossier de presse du 13 avril 2010

[9] NFS 31-119-2, Caractérisation in situ des qualités acoustiques des revêtements de chaussée-Mesurages acoustiques au passage – Partie 2 : véhicules maîtrisés, 2000

[10] ISO 362-1 :2007, Measurement of noise emitted by accelerating road vehicles-Engineering method : Part 1 : M and N catégories, 2007

[11] D.H. Johnson, D.E. Dudgeon, Array signal processing – Concepts and techniques, Prentice Hall, 1993

[12] ISO/CD 16254, Acoustics – Measurement of minimum noise emitted by road vehicles, 2013

[13] ISO/CD 362-3, Measurement of noise emitted by accelerating road vehicle – Engineering method – Part 3 : Indoor testing M and N catégories, 2013

[14] J. Lelong, Vehicle noise emission : evaluation of tyre/road- and motor-noise contributions, Proceedings INTERNOISE 1999, Fort Lauderdale, Florida, USA, 1999

[15] F. Besnard, J.-F. Hamet, J. Lelong, E. Le Duc, V. Guizard, N. Fürst, S. Doisy, Prédiction du bruit routier – 1- Calcul des émissions sonores dues au trafic routier, SETRA, 2009

[16] S. Kephelopoulou, M. Paviotti, F. Anfosso-Ledée, Common noise assessment methods in Europe (CNOSSOS-EU), JRC, 2012

[17] <http://deufrako.bast.de/>

[18] M. A. Pallas, R. Chatagnon, M. Bérengier, M. Muirhead, Projet FOREVER : Emission sonore des véhicules légers électriques et hybrides, Congrès Français d'Acoustique, Poitiers, 2014

[19] M.A. Pallas, M. Bérengier, M. Muirhead, P. Morgan, How to consider Electric and Hybrid Electric vehicles in CNOSSOS-EU predicting method ?, Forum Acusticum 2014, Krakow, 2014

Regupol® | Regufoam®

on your wavelength

Isoler des vibrations

www.bsw-
technique-de-
vibrations.
fr

Le silence dans les bâtiments près des voies ferrées

Ce bâtiment situé à proximité directe de la gare «Sternschanze» à Hambourg, Allemagne, est désolidarisé avec le produit **Regufoam®**.

BSW vous propose des solutions économiques, fiables, simples et garanties. Depuis plus de 30 ans des bâtiments sont désolidarisés avec les matériaux élastiques **Regupol®** et **Regufoam®**.

Pour en savoir plus :
BSW GmbH
Michel Palusci
tél 06 22 65 74 32
m.palusci@regupol.fr
www.bsw-technique-de-vibrations.fr


BSW

Sternschanze, Hambourg