



HAL
open science

Le silence du véhicule électrique – Problèmes et solutions

Louis-Ferdinand Pardo, Nicolas Misdariis

► **To cite this version:**

Louis-Ferdinand Pardo, Nicolas Misdariis. Le silence du véhicule électrique – Problèmes et solutions. *Acoustique et Techniques*: trimestriel d'information des professionnels de l'acoustique, 2017. hal-01708880

HAL Id: hal-01708880

<https://hal.science/hal-01708880>

Submitted on 16 Feb 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Le silence du véhicule électrique – Problèmes et solutions

Louis-Ferdinand PARDO¹; Nicolas MISDARIIS²

¹UTAC CERAM, France

²STMS Ircam-CNRS-UPMC, France

RESUME

Les véhicules électriques ou hybrides représentent des objets roulant silencieux dans des environnements sonores potentiellement complexes. En tant que tels, ils peuvent à la fois être considérés comme une aubaine, vis-à-vis de la nuisance sonore, ou comme un fléau, vis-à-vis de l'expérience d'usage. Par analogie – et toutes proportions gardées, l'avènement de cette nouvelle génération de véhicules peut être comparé à l'introduction d'une nouvelle espèce dans un écosystème donné qui doit, de fait, trouver sa place au moyen de signes extérieures incarnant sa présence. Partant de là, et parce que ces véhicules silencieux (électriques, hybrides, voire les récents modèles de véhicules à moteur thermique) vont essentiellement évoluer dans des environnements sonore urbains bruyants et hétérogènes, il apparaît inévitable de s'attaquer à la problématique engendrée par ce caractère silencieux. Cette propriété principale (le silence) doit être formalisée, étudiée et résolue afin de fournir des réponses pertinentes et efficaces aux problèmes qu'elle engendre – tout au moins, pour les prochaines décennies (avant que les espèces les plus bruyantes ne disparaissent ...). Dans cette optique, l'article présente une synthèse de la thématique : en premier lieu, en décrivant le contexte d'usage (véhicules électriques et situations accidentologiques), puis, en inventoriant différentes solutions proposées (centrées conducteur ou piéton), ensuite, en argumentant une approche de type design sonore *via* des réalisations prototypes ou industrielles; et enfin, en explicitant les bases et les récents développements des travaux de normalisation effectués sur le sujet, aux niveaux national et international.

Mots-clés : Véhicules silencieux, Design sonore, Normalisation

ABSTRACT

Electric or hybrid vehicles represent moving silent objects in potentially complex environments. As such, they definitely can be considered either as a blessing, with regards to noise pollution, or a curse, with regards to user-experience. In an ecological analogy – and all things considered –, the advent of this new type of mobility artefacts can be compared to the introduction of a new species in a given ecosystem that should find its right place by means of external signs embodying its reality with regards to others. On the basis of this approach, and because these quiet vehicles (electric, hybrid or even recent quiet internal combustion engine cars) mostly tend to exist in noisy and heterogeneous urban environments, it seems inevitable to tackle issues related to their silence. This leading property (quietness) should be studied, designed and formalized in order to provide relevant and efficient answers to the main problems they adress, at least, for the next few decades (before the other noisier species finally disappear ...). Within this scope, the paper will present a synthesis of the topic: firstly, by setting out the context of use (silent vehicles and accidentologic situations); secondly, by inventorying several proposed solutions (driver or pedestrian -centered); thirdly, by argumenting the sound design approach and presenting some prototyped or industrialized solutions; and fourthly, by giving the basis and the recent developments on normative works that are undertaken at national or international levels.

Keywords: Quiet vehicles, Sound design, Standards

¹ nicolas.misdariis@ircam.fr

² louis-ferdinand.pardo@utacceram.com

1. INTRODUCTION

Le silence du véhicule électrique reste, encore de nos jours, une question ouverte du point de vue scientifique, environnemental et sociétal et s'est progressivement déplacée sur le terrain politique à la faveur des différentes législations mises en place – ou à l'étude – dans plusieurs parties du monde (Etats-Unis, Europe et Asie, notamment). Plus globalement, cette question incarne aussi, à sa manière, l'une des idées fortes que R.M. Schafer formule dans son ouvrage séminal intitulé "The Tuning of the World" (1) où il prédit un "paysage sonore synthétique dans lequel les sons naturels sont de plus en plus remplacés par des sons artificiels" (2).

A ce stade, la problématique est donc la suivante : pourquoi donner du son à un objet silencieux au risque de contribuer à l'augmentation du bruit de fond de nos villes déjà surpeuplées et saturées de sonorités en tout genre, pour la plupart non voulues (par les auditeurs) et non maîtrisées (par les acteurs) ? Pourquoi ne pas profiter d'une innovation (enfin !) silencieuse pour aller dans le sens de la réduction des nuisances sonores et de l'exposition au bruit de trafic routier supportée quotidiennement par des millions de personnes ? Et inversement, comment faire en sorte que cette nouvelle espèce de véhicules silencieux puissent être intégrée à nos eco-systèmes sonores de manière efficace et sensible (perceptible) tout en restant hautement écologique ?

Nous soutenons l'hypothèse que la réponse à ces questions non triviales réside dans une approche contrôlée mais néanmoins créative du problème, dans le cadre d'une démarche de conception (*design*) sonore intelligente et responsable qui, en intégrant les spécifications réglementaires de base, réfléchirait plus largement à la composition des paysages sonores de demain, dans la lignée de certains préceptes de Schafer tels que : "Pour comprendre ce que j'entends par design sonore, considérons le monde comme une immense composition musicale qui se déploierait sans cesse devant nous" ou bien encore "[...] le paysage sonore n'est pas un sous-produit accidentel de la société mais au contraire une création délibérée, une composition remarquable aussi bien par sa beauté que par sa laideur" (2). Cette conception sonore maîtrisée pourrait aussi être une réponse aux craintes développées dans certaines études – et dans une certaine mesure, justifiées – qui prédisent que la superposition de plusieurs sons de nature continue (associés à plusieurs véhicules électriques) pourrait aboutir à un niveau de cacophonie insupportable (3).

Pour étayer cette hypothèse, l'article s'attachera d'abord à resituer le contexte d'usage spécifique du véhicule électrique en pointant notamment les potentiels risques accidentologiques qu'il induit. Il proposera ensuite une formalisation des différents concepts proposés comme solutions ainsi qu'une présentation comparée de réalisations implémentées, de manière industrielle ou prototype. Il dressera enfin un état des lieux des travaux de normalisation en cours dans ce domaine.

2. CONTEXTE D'USAGE

L'apparent "silence" qui constitue l'un des attraits du véhicule électrique engendre du même coup des craintes pour les piétons. Ainsi, le fait d'avoir supprimé le bruit du moteur thermique à basse vitesse pourrait être la cause d'une augmentation de la dangerosité de ces véhicules silencieux et être à l'origine de situations accidentologiques inédites.

2.1 Qu'est-ce qu'un Véhicule Silencieux

Les véhicules électriques et hybrides peuvent être très silencieux à faible vitesse, rendant leur détectabilité difficile pour les piétons. Le niveau sonore d'un véhicule (et la perception qui en résulte) dépendent de la vitesse et de la répartition entre le bruit de propulsion, de contact pneumatique-chaussée et, à des vitesses plus élevées, le bruit de nature aérodynamique. Pour un véhicule à combustion interne, le moteur thermique contribue fortement à la sonorité globale du véhicule, surtout à faible vitesse. La Figure 1 montre le niveau sonore au passage de trois véhicules en fonction de leur vitesse. A basse vitesse, la différence entre un véhicule thermique et un véhicule électrique peut être significative (plus de 10 dB(A)). Au-dessus de 20 à 30 km/h, le bruit de contact pneu-chaussée devient prédominant et les différences s'estompent. Cet écart à basse vitesse provient de la faible émission sonore du moteur électrique par rapport au moteur thermique.

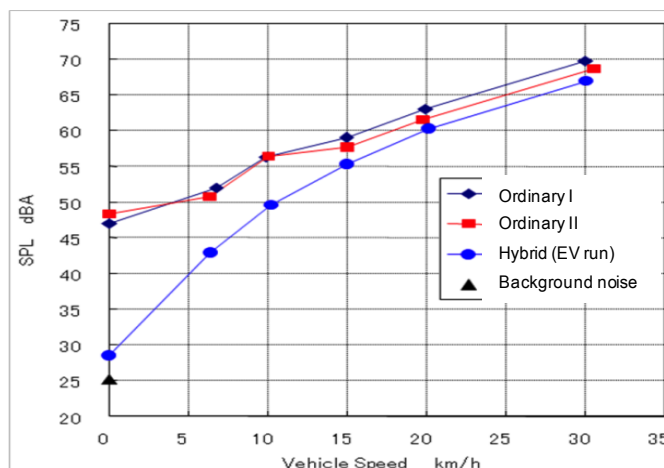


Figure 1 – Emission sonore de véhicules thermiques (Ordinary I et II) et hybride en mode électrique (21).

Partant de là, l’une des questions abordée dans cet article – et, plus largement, dans les travaux menés sur le sujet – peut se résumer ainsi : comment rendre un véhicule silencieux audible ?

2.2 Dangerosité des Véhicules Silencieux

Que ce soit à partir des études d’accidentologie ou celles comparant les distances d’audibilité des véhicules, il est possible d’établir la dangerosité des véhicules silencieux. En effet, dans certaines conditions et à basse vitesse (10 km/h), un véhicule électrique peut n’être détectable qu’à moins de 5 mètres alors que, dans les mêmes conditions, un véhicule à combustion interne peut l’être jusqu’à une distance de 50 mètres (4). Considérant l’ensemble des données recueillies, les zones cibles identifiées sont celles où les véhicules sont à l’arrêt ou roulent à faible vitesse (< 20-30 km/h). Dans ces configurations, le masquage par le bruit ambiant est un paramètre clé. Les niveaux sonores ambiants associés à ces zones sont considérés inférieurs à 55 dB (Lden). En prenant l’exemple de la Figure 2, un véhicule à combustion interne émerge clairement du bruit ambiant à 55 dB(A), alors qu’un véhicule électrique n’émerge pas.

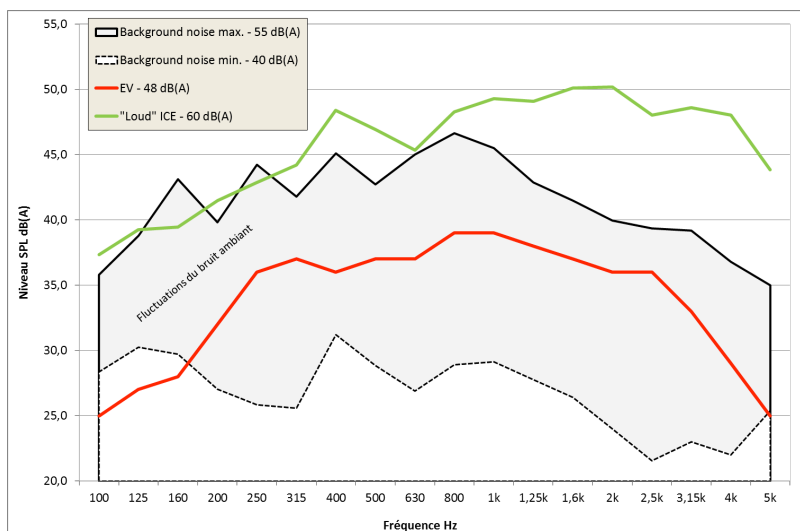


Figure 2 – Variation du spectre d’émission : bruit ambiant, véhicule thermique (vert) et électrique (rouge)

Les associations d’aveugles et de malvoyants, naturellement parmi les plus concernées, ont largement su convaincre les autorités de différents pays de prendre en compte leurs préoccupations et de légiférer sur le sujet (5). D’un autre côté, des opinions alternatives apportent aussi de solides arguments contre la sonorisation des véhicules et militent en faveur de solutions qualifiées de moins “nuisibles” pour l’environnement (6).

2.3 Situations et Données Accidentologiques

Partant de considérations acoustiques ou visuelles – et en ne ciblant pas que les véhicules électriques et hybrides, mais l'ensemble des collisions entre piétons et véhicules –, il est possible de déduire plus précisément l'aspect critique de certaines situations en termes de détectabilité. Des études perceptives récentes utilisent une typologie de cheminements ou comportements de véhicules pertinente du point de vue des usagers, notamment malvoyants. Par exemple, dans leurs protocoles expérimentaux, Ashmead et coll. (7) considèrent le passage de face (droite-gauche), mais aussi le passage latéral (gauche) et le passage latéral (gauche) + tourne à droite, simulant ainsi la position d'un piéton à une intersection en T qui doit prendre la décision de traverser à partir de la détection du flux de véhicules sur sa gauche et de la présence potentielle de véhicules tournant à droite (Figure 3).

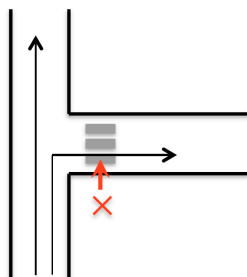


Figure 3 – Illustration des trajectoires latérale et latérale tourne-à-droite selon Ashmead et coll. (7)

Cela étant, peu de données objectives analysent et quantifient ces situations à risque. L'une des références en la matière est une étude de la NHTSA (8) qui montre que, aux Etats-Unis, le taux de collision entre piétons et véhicules électriques ou hybrides est de 0.9% alors qu'il est de 0.6% pour les véhicules thermiques. D'après l'étude, cette différence est globalement significative, d'autant plus si l'on considère des manœuvres à basse vitesse (marche avant lente, marche arrière ou sortie de parking). Cela étant, les auteurs préconisent de prendre ces résultats avec précaution du fait de la faible taille de l'échantillon analysé.

Une autre étude réalisée par le TRL (9) donnent cependant des résultats légèrement contradictoires. Elle montre que la proportion d'accidents impliquant des véhicules électriques ou hybrides est plus faible que pour les véhicules à combustion, que ce soit au total ou spécialement avec les piétons. L'étude relève toutefois que ces véhicules ont aussi un usage différent notamment limité à l'urbain, ce qui pourrait réduire la proportion total d'accidents les concernant. Elle indique également que les données sont trop réduites pour permettre une interprétation pertinente concernant la localisation ou les manœuvres associées aux accidents impliquant les piétons ainsi que le risque pour les aveugles.

Par ailleurs, d'autres instituts comme le JASIC au Japon ou le SWOV aux Pays-Bas ont mené leur propres analyses accidentologiques et arrivent également à la conclusion suivante : à ce jour, même si l'on observe une tendance à l'augmentation des accidents entre piétons et véhicules électriques, il est néanmoins difficile de la mettre clairement en évidence compte tenu du faible pourcentage de ce nouveau type de véhicules dans la flotte globale (10) mais aussi du fait que la plupart des accidents arrivent à faible vitesse et engendrent des préjudices mineurs donc difficiles à comptabiliser (absence de constat d'accident ou de rapport de police) (11).

3. DIFFERENTES SOLUTIONS

Les solutions étudiées depuis plusieurs années pour répondre au problème de la dangerosité des véhicules électriques relèvent de deux approches conceptuelles distinctes. La première approche, "centrée-conducteur", délègue au responsable du véhicule la gestion du risque et la faculté à signifier sa présence dans son environnement notamment grâce à son attention, sa vigilance, et aidé le cas échéant par des systèmes d'assistance à la conduite. La seconde approche, "centrée-piéton", considère quant à elle que le piéton – ou plus généralement la personne évoluant au voisinage du véhicule – doit pouvoir à tout moment capter et analyser l'environnement dans lequel il se trouve afin de prendre les bonnes décisions (p. ex., d'orientation ou de navigation); cette approche nécessitant donc que tout élément de l'environnement puisse être naturellement perceptible – et donc, en particulier, audible.

Suivant un autre point de vue, le même problème peut être analysé à partir de la terminologie de Sandberg, c'est-à-dire en termes "acoustiques / non-acoustiques" (12). Cette catégorisation demeure relativement orthogonale aux concepts précédents et permet de formaliser le problème dans un espace à deux dimensions. On peut, en effet, imaginer un dispositif centré-conducteur non-acoustique (p. ex., une formation à la conduite) aussi bien qu'acoustique (un avertisseur ponctuel, de type sonnette) et, par ailleurs, imaginer un dispositif centré-piéton non-acoustique (un système d'informations tactiles relayé par des terminaux mobiles de type smartphones) autant qu'acoustique (une signature sonore conçue à dessein et s'adaptant, le cas échéant, aux conditions de l'environnement extérieur – bruit de fond, jour/nuit, météo, etc.).

3.1 Approche conducteur

3.1.1 Formation conducteur

Les conducteurs de véhicules électriques peuvent être sensibilisés en amont de leur expérience de conduite grâce à des informations de différentes natures :

- la discrétion et la difficulté de détection de leur véhicule pour les piétons,
- le danger que représente ce type de véhicule pour les aveugles et malvoyants,
- la responsabilité du conducteur à prévenir les situations à risque.

Il s'agit ici d'une solution de type comportemental que préconise notamment Sandberg (12) et qu'ont instruite Cocron et coll. (13) et Hoogeveen (14) lors d'expériences à grande échelle.

L'expérience de Cocron et coll. (13) a impliqué une flotte de 40 véhicules électriques (sans sonorité ajoutée) et leurs usagers, sur une période de 6 mois. Elle s'est intéressée au rôle que jouent les véhicules silencieux dans l'expérience-utilisateur du conducteur et au rapport entre automobiles et piétons. Elle a été menée au moyen d'un questionnaire rempli par chaque conducteur au début, à mi-parcours et à la fin du test. Seulement quelques incidents mineurs ont été recensés au cours de l'expérience. L'un de ses principaux résultats est que la plupart des conducteurs affirment avoir appris à conduire ce type de véhicules, en apprenant rapidement les situations potentiellement dangereuses, en redoublant d'attention dans les phases de parking ou de manœuvre à faible vitesse, et en adoptant de manière systématique une attitude d'anticipation lors de la conduite. Ce résultat milite notamment en faveur d'un permis de conduire spécifique pour les véhicules silencieux.

Hoogeveen (14) a, quant à lui, mis en ligne un questionnaire dédié aux usagers de véhicules électriques dans le but d'explorer les questions suivantes : "quel type de son un véhicule électrique devrait-il produire ?", "Existe-t'il des situations potentiellement dangereuses vis-à-vis du véhicule électrique ?", "Quelles modifications de comportement adoptez-vous en conduisant un véhicule électrique ?", "Avez-vous des suggestions pour améliorer la sécurité autour du véhicule électrique ?". Les principales conclusions sont que 1/3 des participants au questionnaire (36%) estime que le véhicule électrique n'induit pas de dangers particuliers mais que 2/3 des participants (69%) change de comportement de conduite lorsqu'il passe d'un véhicule thermique à un véhicule électrique. Les résultats montrent aussi le besoin d'un changement de comportement des autres usagers de la route, notamment les piétons qui devraient davantage traverser les rues en "regardant plutôt qu'en écoutant". Finalement, si un son devait être ajouté au véhicule électrique, une majorité des participants préférerait un simple "son d'alerte" plutôt qu'un "son de véhicule", l'alerte étant jugée suffisante et moins intrusive du point de vue environnemental.

3.1.2 Avertisseurs urbains

Les véhicules routiers sont équipés d'avertisseurs réglementaires communément appelés "klaxons" et définis dans le règlement UN ECE28 [UNECE – *Audible warning devices and of motor vehicles with regards to their audible signals*]. Ils sont utilisés dans les situations de danger immédiat et ne peuvent donc pas être employés comme de simples dispositifs d'avertissement à l'attention des piétons : trop bruyants, ils auraient pour effet direct, d'une part, d'augmenter le niveau de bruit ambiant ainsi que la gêne induite, et d'autre part, de ne pas faire réagir correctement les piétons.

Cela étant, certains véhicules de transport en commun (bus, tramway), sont équipés d'un second type d'avertisseur urbain. Emis à des niveaux moins forts et généralement à base de sons de cloches, ces "avertisseurs doux" – tel que décrit et préconisé par Sandberg et coll. (6) – permettent au conducteur d'avertir un piéton de la présence de son véhicule sans le surprendre ni l'agresser.

Ainsi, en étant monté sur un véhicule silencieux et actionné ponctuellement par le conducteur, ce dispositif pourrait remplacer l'avertisseur réglementaire dans de nombreuses situations n'induisant pas de danger immédiat et réduire les nuisances sonores en ville tout en assurant au véhicule électrique, et à son conducteur, un moyen de signaler sa présence.

3.1.3 Assistance à la conduite

Un nombre croissant de véhicules est actuellement équipé de systèmes d'assistance à la conduite de type ADAS [Advanced Driver-Assistance Systems]. Parmi eux, les systèmes d'assistance au freinage (ABS, AEB) combinés à une détection de piétons constituent des solutions opérationnelles pour réduire le risque accidentologique du véhicule électrique. Ces dispositifs peuvent prévenir le conducteur lorsqu'un obstacle se trouve dans – ou proche de – la trajectoire du véhicule et faire office de dispositif de sécurité secondaire en gérant le freinage. Ils font désormais partie des évaluations EuroNCAP et sont aussi développés dans l'objectif de la conduite autonome, thématique émergente dans le domaine des nouvelles mobilités.

Combinés à une attention renforcée du conducteur et à des systèmes d'avertisseur manuels (cf. sect. 3.1.2), les dispositifs d'assistance à la conduite constituent un complément de réponse. C'est notamment ce que préconise Sandberg (12) en arguant qu'il existe de nombreuses solutions non acoustiques pour résoudre le problème de discrétion des véhicules silencieux et qu'il serait plus bénéfique de contribuer à la réduction du bruit produit par les véhicules plutôt qu'à favoriser l'ajout d'une sonorisation additionnelle qui aurait, à terme, pour effet d'augmenter le bruit de fond ambiant des villes. Mais c'est également ce type de dispositif, et notamment la détection de piétons, qui est exploitée dans des solutions centrées-piéton afin d'adresser au mieux la signature sonore émise par le véhicule électrique (cf. le projet eVADER – sect. 4.1).

3.2 Approche piéton

3.2.1 Systèmes distribués et coopératifs

Des solutions, basées sur le développement des Technologies de l'Information et de la Communication (TIC), tendent à rendre les véhicules silencieux "intelligents" (*smart*) et donc capables de dialoguer avec des unités de communication nomades dont presque tout le monde dispose à ce jour (*smartphones*). La généralisation attendue des possibilités de communication entre véhicules, usagers des routes et infrastructures permettra ainsi au véhicule de mieux appréhender son environnement grâce à des moyens de prévention personnalisés à chaque situation. A moyen terme, il est technologiquement tout à fait envisageable que le véhicule fournisse au piéton se situant dans son voisinage – sur son téléphone mobile –, une information sur sa présence ou son comportement. Cependant, ces technologies nécessitent encore des développements, autant du côté fonctionnalité que du côté communication ; elles ne peuvent donc pas être envisagées dans l'immédiat.

De manière prospective, c'est, par exemple, la solution imaginée par Owen (15) en proposant un paradigme d'encodage des données de trafic en informations vibratoires. L'application est développée sur téléphone mobile et utilise des protocoles de communication sans fil pour recevoir des informations provenant des véhicules. Le principe d'encodage est basé sur la modulation d'amplitude d'une impulsion en fonction de la présence et la vitesse d'un véhicule ; chaque véhicule ayant sa propre signature vibratoire. Le principe, testé expérimentalement, s'avère davantage pertinent pour informer de la présence plutôt que la vitesse. Cette approche nécessite cependant d'être améliorée et, le cas échéant, complétée par un système audio – et non plus simplement haptique – pour transmettre les informations.

3.2.2 Sonification des véhicules et design sonore

Face à la réduction du bruit dû aux motorisations électriques, la solution la plus logique peut être finalement de maintenir artificiellement un son permettant au véhicule d'exister dans le paysage sonore et au piéton de retrouver une information utile à sa navigation. Cette configuration qui recrée une situation d'émission sonore similaire à celle du moteur thermique mais cette fois-ci avec un son conçu, contrôlé et innovant – donc pas forcément sur le modèle du son de moteur traditionnel –, peut répondre à toutes les exigences environnementales liées à ce contexte inédit.

Cette sonification du véhicule électrique représente un cas d'étude, tant conceptuel que pratique, emblématique pour la discipline du design sonore dont l'objectif est ici de remplacer le silence par du son sur la base d'un cahier des charges fonctionnel et ergonomique, ainsi que de considérations esthétiques potentiellement importantes en termes d'image de marque et d'identité sonore. Cette démarche répond à des enjeux primordiaux tels que la sécurité, l'ergonomie, l'environnement et l'écologie sonores tout en restant fondamentalement attachée à l'idée que design sonore n'est en aucun cas synonyme de surenchère et pollution sonore.

Ce dernier point mérite d'être rappelé dans la mesure où il est souvent utilisé par les opposants aux solutions acoustiques pour le véhicule silencieux (cf. section 3.1) et où il permet d'éclairer la véritable valeur ajoutée d'une approche en design sonore du problème. En effet, il ne s'agit en aucun

cas de rajouter "simplement" du son par rapport au bruit ambiant dans lequel évoluerait le véhicule mais bel et bien d'analyser son environnement pour trouver des solutions autant acoustiques (p. ex., utilisation de fréquences spécifiques), perceptives ou cognitives (p. ex., exploitation de phénomènes de masquage ou de mécanismes d'apprentissage) que techniques (p. ex., utilisation de processus adaptatifs) pour aboutir à une solution compatible avec le concept d'écologie sonore mais répondant néanmoins aux impératifs de signalétique élémentaire. Et en réaffirmant à nouveau que l'objectif du design sonore est de générer du confort sonore plutôt que de la nuisance.

4. EXEMPLES DE REALISATION

En termes de réalisations, il s'agit de répondre à deux enjeux potentiellement contradictoires : fournir un niveau de détectabilité élevé tout en assurant un impact minimum sur l'environnement sonore. De plus, du point de vue de l'utilisateur à l'intérieur du véhicule, il est également nécessaire de prendre en compte la transmission d'informations au conducteur tout en ne perturbant pas l'activité de conduite. Ces différentes contraintes conduisent idéalement à la définition d'une signature sonore pour le véhicule électrique qui soit efficace, pertinente et acceptable. Dans les sous-sections suivantes, nous présentons succinctement et comparons deux approches de conception distinctes. La première peut-être considérée comme analytique et résulte globalement d'une démarche inductive : à partir de règles basiques de l'acoustique / psychoacoustique, elle exploite des paramètres de signal simples et conduit à des solutions sonores paramétriques. La seconde approche peut être considérée, en revanche, comme synthétique et résulte globalement d'une démarche "abductive" (16, 17) : à partir de sources d'inspiration standards mais aussi non conventionnelles, elle exploite de la matière sonore complexe et conduit à des solutions sonores composites, potentiellement plus innovantes.

4.1 Approche analytique

De précédentes études sur le son – et le silence – des véhicules électriques ont contribué à identifier différents paramètres de signal intervenant dans une éventuelle signature sonore ainsi que leurs influences respectives sur la détectabilité et le désagrément induits. Parmi ces travaux, le projet eVADER dont l'une des tâches spécifiques a consisté à proposer la conception de stimuli expérimentaux construits à partir de paramètres acoustiques et de principes issus de la perception et de la cognition sonore. La conception paramétrique des ces sons d'alerte a donc été entreprise sur la base d'une importante revue bibliographique rassemblant, entre autres, des connaissances fondamentales sur les mécanismes physiologiques (sensibilité, masquage), les principes d'analyse de scènes auditives (groupement, ségrégation), la notion cognitive de saillance ou, plus généralement, les différentes stratégies de construction des alarmes sonores (18). Ces données d'entrée formelles ont conduit à prendre en compte, dans le projet eVADER³, trois paramètres de base : la complexité harmonique, la fréquence et l'amplitude de modulation (19).

Une seconde étude relative à cette thématique a été menée au sein du projet Métason⁴. Son objectif était de définir, pour une signature sonore donnée, le contenu sémantique et les variables acoustiques pertinents pour un contrôle perceptif et interactif d'un moteur de synthèse sonore. Par exemple, l'une des problématiques posée était : doit-on simplement informer le piéton qu'un véhicule arrive ou bien cette signalétique doit-elle spécifier aussi que le véhicule en question accélère ou ralentit ? Les expériences menées dans Métason ont conclu à la pertinence de paramètres tels que la fréquence fondamentale (*pitch*) ou le niveau sonore (*loudness*) (20).

D'autres études ont considéré quant à elle, d'autres paramètres comme la position de pics spectraux, la fréquence de modulation et, à nouveau, la fréquence fondamentale (21), ou bien ont décomposé les descripteurs acoustiques prépondérant pour la détectabilité dans un espace spectro-temporel à 2 dimensions : morphologies temporelles continues / modulées / impulsives pour l'une des dimensions, et contenu spectral harmonique / inharmonique / bruité, pour l'autre (22).

4.2 Approche synthétique

Il y a quelques années (2009-2012), ce même sujet a été abordé dans le cadre d'une collaboration industrielle entre un constructeur automobile (Renault) et une équipe de recherche (Ircam / PdS) associée à un compositeur/designer sonore (Andrea Cera). La démarche scientifique et créative qui a sous-tendu ce travail a particulièrement mis en lumière la question de l'inspiration. En effet, étant donné une situation de

³ <http://evader-project.eu>

⁴ <http://www.agence-nationale-recherche.fr/?Project=ANR-10-CORD-0003>

quasi- “page blanche” au début du projet (très peu de travaux réalisés précédemment), le classique état-de l’art a été complété par des sources d’inspiration moins conventionnelles telles que l’étude de l’imaginaire cinématographique sur le sujet – ou comment les designers sonores du cinéma ont-ils traité la question ?

Mais en premier lieu, et malgré un faible volume d’études publiées sur le sujet au commencement du projet, une recherche bibliographique a été néanmoins conduite. Elle a permis, entre autres, de prendre en compte deux études conjointes. La première a produit des descriptions verbales de sonorités typiques potentiellement associables au véhicule électrique : musique, sifflements, bips, klaxons, cliquetis, sons d’échappement ou de moteur (23). La seconde est partie de ces catégories sonores et a mené un test d’acceptabilité au moyen d’un support audio-visuel et d’une procédure à base d’échelles sémantiques. Les résultats placent les sons de moteur (groupés avec des bourdonnements et du bruit blanc) aux plus forts niveaux de préférence et d’acceptabilité, alors que les klaxons (groupés avec les sirènes et le sifflements) recueillent les plus faibles valeurs sur ces deux échelles (24).

En complément, donc, une partie des sources d’inspiration a été puisée dans l’analyse de séquences cinématographiques impliquant des véhicules futuristes, en faisant l’hypothèse que les attentes des usagers sur la nature des sons de véhicules électriques – et donc leur acceptabilité – pourraient être forgées par le travail de design sonore réalisé pour les films de science-fiction. Ainsi, des éléments spécifiques ont été extraits et étudiés, comme : le son de réacteur supersonique de la Lola T70 dans THX 1138 (25), les légers drones des voitures rétro-futuristes de Gattaca (26) ou bien les bourdonnements des véhicules nouvelle génération de Retour vers le Futur II. Les principales conclusions sont que, pour ces nouvelles formes de motorisation, les designers sonores ont eu tendance à se détacher de la réalité et à se tourner vers des sonorités de type basse continue (drone) ou sons filés possédant des qualités timbrales en rapport avec les formes et les performances du véhicule considéré. En résumé, l’imaginaire cinématographique favorise davantage les couches sonores continues plutôt que l’émergence ponctuelle d’éléments singuliers. Cela étant, ces conclusions doivent être prises avec précaution étant donné la nature caricaturale et éphémère des cas de figure cinématographiques qui contraste fortement avec la présence ubiquitaire et quasi-permanente des sons de voiture dans notre environnement quotidien.

4.3 Bien-fondé du design sonore

Cela étant, dans le cadre du projet eVADER, l’intersection entre les deux études précédentes a donné lieu à une comparaison objective des deux approches démontrant, dans une certaine mesure, le bien-fondé et la légitimité d’une démarche maîtrisée en design sonore dans un contexte aussi complexe que celui du véhicule électrique.

En effet, l’une des expériences du projet eVADER a consisté à évaluer l’approche paramétrique mise en oeuvre pour la conception de sons d’alerte (cf. §4.1). Cette évaluation a été conduite au moyen de tests d’écoute *in-situ* en considérant de deux principaux critères : “détectabilité”, mesurée par un protocole de temps de réaction, et “désagrément”, jugé sur une échelle sémantique (28, 19). Les données recueillies à l’issue de ce test ont permis de positionner les stimuli conçus à base de règles formelles, dans un espace à 2 dimensions : détectabilité/ désagrément (Figure 4).

Mais, dans une dernière étape de l’expérience – et du projet dans son ensemble – (29), ce corpus de stimuli de base a été complété par l’ajout de la signature sonore spécialement conçue dans le cadre de l’approche synthétique présentée au paragraphe précédent (§4.2) – et nommée “*brand sound*” dans le rapport correspondant (29) et sur la Figure 4. L’un des principaux résultats de cet ultime test est que le *brand sound* semble être mieux – ou tout du moins aussi bien – placé que la plupart des stimuli de base, de sorte qu’il fait indéniablement partie de la zone optimale de l’espace en termes de détection et d’agrément (voir Figure 4 pour illustration).

En résumé, ce résultat objectif démontre principalement deux choses: d’une part, que des sons (correctement) conçus par des approches de type design sonore supportent la comparaison avec des ‘stimuli de laboratoire’, c’est-à-dire des sons conçus uniquement à partir de règles formelles; et d’autre part, que le processus de design sonore – c’est-à-dire l’intégration d’une composante créative dans une démarche technico-scientifique – est susceptible d’apporter une forme d’innovation qui, dans le cas du son du véhicule électrique, reste compatible avec les impératifs de fonctionnalité et d’acceptabilité.

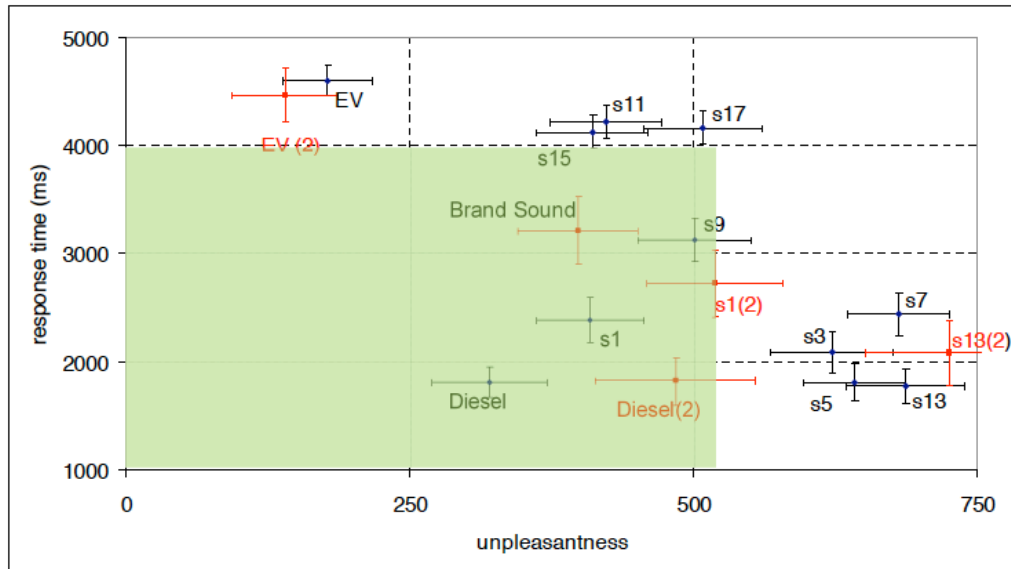


Figure 4 – Espace Détectabilité vs. Désagrément obtenu à la suite d’expériences perceptives. Les points noirs (•) indiquent les résultats d’une 1^{ère} expérience impliquant seulement des stimuli de base. Les points rouges (•) indiquent les résultats d’une 2^{nde} expérience incluant le “brand sound”. La zone verte représente le “meilleur compromis entre détectabilité et désagrément” (29 – Figure 13, avec l’accord de l’auteur).

5. DEVELOPPEMENT DE LA REGLEMENTATION

Ajouter du son à un véhicule électrique entraîne de nombreuses questions dans la mesure où piétons et conducteurs (ou passagers) s’attendent avant tout à ce qu’il soit silencieux. Ainsi, le niveau sonore dans l’habitacle et à l’extérieur du véhicule est une composante importante à prendre en compte pour l’acceptabilité des signatures sonores et la gêne qu’elles peuvent potentiellement induire. Il est donc important et nécessaire de réduire le niveau sonore globale du véhicule mais tout en assurant quand même une sécurité suffisante pour les piétons.

5.1 Les réglementations à travers le monde

Le Japon est sans doute le premier pays à avoir considéré et traité l’amélioration de la détectabilité des véhicules silencieux. En effet, c’est dans ce pays que l’on a vu émerger des dispositifs émettant des alertes parfois très exotiques (par exemple, un “bip bip” suivi de “Excuse me. Car is coming!” ou une mélodie de dessin animé) mais aussi qu’un guide a déjà été mis en place et son application recommandée pour tout dispositif monté sur véhicule.

Les États-Unis ont aussi été précurseurs en portant la problématique au niveau national et en publiant le “Pedestrian Safety Enhancement Act of 2010” dont la réglementation FMVSS 141 [Minimum Sound Requirements for Hybrid and Electric Vehicles] a été publiée en 2017.

S’appuyant sur le guide Japonais, les Nations-Unis ont introduit en 2012 un guide similaire d’application volontaire R.E.3 [UNECE Résolution d’ensemble sur la construction des véhicules], repris ensuite par l’Union Européenne dans un règlement (540/2014/CE) [Règlement (UE) n° 540/2014 du Parlement européen et du Conseil du 16 avril 2014 concernant le niveau sonore des véhicules à moteur et des systèmes de silencieux de remplacement]. Puis en 2016, les Nations-Unis ont publié une réglementation transcrivant ces recommandations en spécifications nécessitant la réalisation d’essais pour l’homologation des véhicules. L’Union Européenne a introduit en 2017 ces mêmes critères dans le règlement 540/2014/CE en rendant obligatoire le montage de dispositif de sonorisation pour tous véhicules électriques ou hybrides à partir de 2019.

D’autres pays, tels que la Chine, Taiwan et la Corée envisagent aussi de légiférer en se basant sur la réglementation des Nations-Unis.

5.2 Le guide d’application volontaire

Le guide d’application fournit les principes directeurs élaborés à l’intention des constructeurs pour l’installation sur les véhicules d’un système de sonorisation :

- le son doit être généré automatiquement à partir de la mise en mouvement du véhicule jusqu'à ce qu'il atteigne une vitesse d'au moins 20 km/h, ainsi que lors de la marche arrière,
- le son émis doit être continu et indiquer clairement les conditions de fonctionnement du véhicule (par exemple, variation automatique du niveau sonore ou d'autres caractéristiques en fonction de la vitesse du véhicule). Certaines sonorités sont à proscrire telles que les signaux d'alarme (sirène, trompe, carillon, cloche et signaux des véhicules des services d'urgence), les mélodies, les sons émis par des animaux, des insectes ou tout autre son engendrant une confusion d'identification du véhicule ou de son comportement (vitesse, accélération, ...),
- un véhicule peut être pourvu d'une possibilité de pause ou d'atténuation du son. Dans ce cas, certaines précautions ergonomiques doivent être prises comme, par exemple, l'accessibilité de la fonction, le retour visuel ou la stratégie de réactivation,
- le niveau sonore émis ne doit pas dépasser celui d'un véhicule à moteur thermique.

5.3 Exigences réglementaires

Plusieurs critères sont nécessaires pour apporter la réponse au problème posé. Pour ce faire, le véhicule doit être détectable, reconnaissable et localisable tout en générant une nuisance sonore faible. Les principaux critères pertinents pris en compte sont le contenu et le niveau fréquentiel ainsi que la modulation et la variation spectrale avec la vitesse. Ces exigences réglementaires sont déclinées sur les deux réglementations : UN-ECE R138 et FMVSS 141.

5.3.1 Contenu fréquentiel et niveau sonore

Pour l'UN-ECE R138, la détectabilité est assurée par l'émergence :

- d'au moins deux bandes en 1/3 d'octave entre 160 et 5000 Hz, dont l'une est au moins inférieure à 1600 Hz. Des niveaux minimums sont requis pour ces 2 bandes de fréquences ainsi que des niveaux globaux sur l'ensemble du spectre.

Pour le FMVSS 141, la détectabilité est assurée par l'émergence :

- soit d'au moins 4 bandes en 1/3 d'octave non-adjacentes réparties sur au moins 9 bandes entre 315 et 5000 Hz. Des niveaux minimums sont requis pour ces 4 bandes de fréquences,

- soit d'au moins 2 bandes en 1/3 d'octave dont l'une est comprise entre 315 et 800 Hz et l'autre entre 1000 et 3150 Hz. Des niveaux minimums sont requis pour ces 2 bandes de fréquences ainsi que pour la somme de ces 2 bandes.

Ces seuils minimums sont requis pour la marche avant jusqu'à 20 km/h pour UN-ECE R138 et jusqu'à 30 km/h + marche arrière, pour FMVSS 141 (Figure 5)

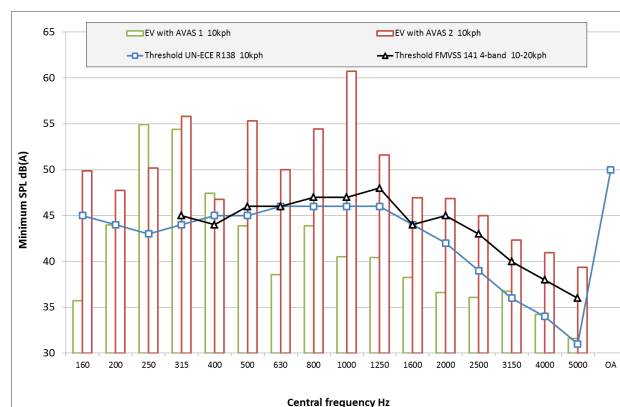


Figure 5 – Seuils de niveaux sonores minimums FMVSS 141 / UN-ECE R138 et spectres d'émission de deux véhicules avec sonorisation à 10 km/h

5.3.2 Bruit à l'arrêt

Certaines parties le jugent comme étant un élément fondamental de sécurité alors que d'autres considèrent que le véhicule à l'arrêt ne présente pas de danger ; le bruit émis pouvant même éventuellement masquer le bruit d'un autre véhicule en mouvement ou prêt à partir. Il engendrerait ainsi une nuisance sonore inutile à la fois pour les riverains et pour les occupants du véhicule. Cette spécification est obligatoire pour la réglementation FMVSS 141 alors qu'elle n'est qu'optionnelle pour l'UN-ECE R138.

5.3.3 Variation de la fréquence

La variation du son en fonction de la fréquence est typique d'un véhicule routier. Elle permet d'éviter les confusions avec d'autres types de sons. De plus, la variation de la fréquence avec la vitesse du véhicule permet de détecter facilement les phases transitoires de fonctionnement du véhicule (accélération ou décélération). Pour la UN-ECE R138, le taux de variation doit être supérieur ou égale à 0.8% par km/h entre 5 et 20 km/h.

5.3.4 Considérations sur les nuisances sonores potentielles

Enfin, un niveau sonore maximum est défini pour l'UN-ECE R138 car il y a toujours un risque de voir émerger des véhicules avec des niveaux sonores élevés même s'il est peu probable que les constructeurs développent des solutions avec de forts niveaux sonores qui pourraient avoir un impact négatif sur la gêne ressentie dans l'habitacle.

5.4 Méthode de mesure

Quelle que soit la réglementation (UN-ECE R138 ou FMVSS 141), la méthode d'essai est similaire et basée sur la norme ISO 16254 [*Acoustics – Measurement of minimum noise emitted by road vehicles*, 2016]. Cette norme décrit les protocoles de mesure du niveau sonore minimum (global et en 1/3 d'octave) ainsi que de la variation du son avec la fréquence.

5.4.1 Méthode d'essai du niveau sonore

Les essais sont réalisés sur une piste dont les caractéristiques sont décrites dans la norme ISO 10844 [*Acoustics – Specification of test tracks for measuring noise emitted by road vehicles and their tyres*]. Les microphones sont placés sur la ligne PP' à 2 m de la ligne CC' (au lieu de 7,5 m habituellement) et à 1,2 m au-dessus du sol. Le passage du véhicule s'effectue le long de la ligne CC' entre les lignes AA' et BB' (Figure 6a). Le niveau sonore maximum pondéré A est relevé de chaque côté du véhicule, soit sur piste entre AA' et PP', soit sur banc d'essai durant 5 secondes.



Figure 6a (Gauche) – Piste d'essai pour mesure du niveau sonore (Montlhéry, France).

Figure 6b (Droite) – Mesure dans la nouvelle installation *indoor* de l'UTAC CERAM (Montlhéry, France).

Le nouveau règlement UN.R138 publié en 2016 est le premier texte réglementaire à avoir introduit des mesures réglementaires en intérieur. 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 être difficilement mesurables. Il est ainsi prévu dans le texte la possibilité de réaliser aussi la mesure en chambre-semi anéchoïque sur bancs à rouleaux (Figure 6b).

5.4.2 Méthode d'essai de la variation du son avec la vitesse

Pour les véhicules en mouvement, il est spécifié plusieurs méthodes de mesure de la variation du signal avec la vitesse. Le principe consiste à identifier l'une des fréquences évoluant avec la vitesse puis à la mesurer pour différentes vitesses. Un taux de variation en Hz/(km/h) est ainsi calculé. Cette mesure peut être réalisée sur piste durant des essais de niveau sonore, mais elle est délicate car le traitement spectral est peu précis. Les mesures en intérieur sont davantage appropriées pour obtenir un résultat précis (Figure 7).

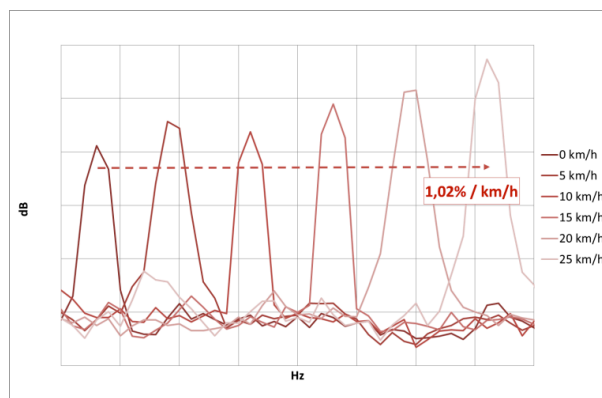


Figure 7 – Évolution du spectre de l'AVAS avec la vitesse

6. CONCLUSIONS

Dans le présent article, nous avons tenté de présenter la réalité et la complexité du problème induit par le caractère silencieux d'une nouvelle génération de véhicules électriques ou hybrides. Ces nouveaux objets discrets et mobiles intégrés dans un milieu hétérogène et bruyant se doivent d'être perçus et appréhendés par leur environnement extérieur, soit de manière autonome, soit en donnant à leur conducteur les moyens de le faire.

Nous avons également tenté de montrer que pour cette problématique, – qui, par ailleurs, se régleme progressivement au niveau national et international –, une démarche de design sonore, c'est-à-dire de conception de signaux sonores contrainte et maîtrisée s'avère être une solution pertinente et efficace autant du point de vue de la sécurité et de l'ergonomie que de celui de l'acceptabilité et de l'écologie sonore.

REFERENCES

1. Schafer RM The Soundscape, our sonic environment and the tuning of the world. 1977, Knopf, Réed. Destiny Books, 1994.
2. Schafer RM Le paysage sonore: Le monde comme musique. Éditions Wildproject (2010)
3. Genuit K. What will be the influence of e-mobility on soundscape?. In : Proceedings of Meetings on Acoustics ICA2013. ASA, 2013. p. 040053.
4. Glaeser KP. BAST, Sound detection of electric vehicles by blind or visually impaired persons, QRTV 4th informal, 2011
5. Diamond M. World Blind Union comments on Japanese guidelines. Informal document of UNECE/WP29/GRB/QRTV-04-03 (2010)
6. Sandberg U., Goubert L, Mioduszewski P. Are vehicles driven in electric mode so quiet that they need acoustic warning signals. In : 20th International Congress on Acoustics. 2010.
7. Ashmead DH, Grantham DW, Maloff ES, Hornsby B, Nakamura T, Davis TJ, Pampel F. Rushing EG. Auditory perception of motor vehicle travel paths. Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, 54(3), 437-453 (2012)
8. Hanna R. Incidence of Pedestrian and Bicyclist Crashes by Hybrid Electric Passenger Vehicles. National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) Technical Report DOT 811 204, 2009
9. Morgan PA, Morris L, Muirhead M, Walter LK, Martin J. Assessing the perceived safety risk from quiet electric and hybrid vehicles to visionimpaired pedestrians, TRL, 2011.
10. JASIC, Japan Automobile Standards Internationalization Center. Proposal for the AVAS Requirements, GTRQRTV-04-06, 2013
11. Schoon C. Aantallen verkeersongevallen opgesplitst naar motortype 2004--2008. SWOV, Leidschendam, 2009.
12. Sandberg U. Adding noise to quiet electric and hybrid vehicles: an electric issue. Acoustics Australia, 2012, vol. 40, no 3.
13. Cocron P, Bühler F, Franke T, Neumann I, Krems JF. "The silence of electric vehicles – blessing or curse". In Paper accepted to appear in Proceedings of the 90th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC. January, 2011.
14. Hoogeveen LVJ. Road traffic safety of silent electric vehicles. Master thesis, Utrecht University, The Netherlands, 2010.

15. Owen O. Quiet vehicle avoidance systems for blind and deaf-blind pedestrians. VCU Bioinformatics and Bioengineering Summer Institute, Final report, 2008.
16. Peirce CS. Abduction and induction. Philosophical writings of Peirce, 11. 1955.
17. Fann KT. Peirce's theory of abduction. Springer Science & Business Media. 2012.
18. Robart R. Parameter selection and stimuli design proposal. eVADER, WP2, Deliverable D2.1. 2012. (visité en mars 2015)
http://baerbel.szm.maschinenbau.tu-darmstadt.de/evader/delivrables/WP2/eVADER_WP2_D2.1_%2014_6_2012.pdf
19. Parizet E, Robart R, Chamard JC, Schlittenlacher, Pondrom JP, Ellermeier W, Biancardi F, Janssens K, Speed-Andrews P, Coclram J, Hatton G. Detectability and annoyance of warning sounds for electric vehicles. In : Proceedings of Meetings on Acoustics ICA2013. ASA, 2013. p. 040033.
20. Chamard JC, Roussarie V. Design of Electric or Hybrid vehicle alert sound system for pedestrian. In Acoustics 2012. 2012
21. Tabata T, Konet H, Kanuma T. Development of Nissan approaching vehicle sound for pedestrians. EVS-25 Shenzhen, China, 5(9), 2010.
22. Misdariis N, Gruson A, Susini P. Signature sonore des vehicules silencieux-Acceptabilite et Apprentissage. In Proceedings of Congres Francais d'Acoustique, Nantes, France. 2014
23. Wogalter MS, Ornan RN., Lim RW, Chipley MR. On the risk of quiet vehicles to pedestrians and drivers. In Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting. Vol. 45, No. 23, pp. 1685-1688. SAGE Publications. 2001.
24. Nyeste P, Wogalter MS. On adding sound to quiet vehicles. In Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting. Vol. 52, No. 21, pp. 1747-1750). Sage Publications. 2008.
25. Lucas G. THX 1138. film directed by George Lucas. USA: American Zoetrope, Warner Bros., 1971.
26. Niccol A. Gattaca. film directed by Andrew Niccol. USA: Columbia Pictures Corporation, 1997.
27. Back to the Future part II, film, directed by Robert Zemeckis. USA: Universal Pictures, Amblin Entertainment, U-Drive Productions, 1989.
28. Robart R. Perceptual test 1: detectability. eVADER, WP2, Deliverable D2.2. 2012. (visité en mars 2015) http://baerbel.szm.maschinenbau.tu-darmstadt.de/evader/delivrables/WP2/eVADER_WP2_D2.2_6_11_2012.pdf
29. Schmitt T. Example of warning sound suitable for Nissan, Renault and PSA. eVADER, WP6, Deliverable D6.5. 2014. (visité en mars 2015)
http://baerbel.szm.maschinenbau.tu-darmstadt.de/evader/delivrables/WP6/eVADER_WP6_D6_5_23_09_2014.pdf