

Rôle du contenu évocatoire des sons dans l'efficacité de la sonification extérieure de véhicules silencieux

L. Bosc^a, E. Diaz^a, V. Roussarie^a, M. Aramaki^b, J.-L. Velay^c, R. Kronland-Martinet^b,
J.-C. Chamard^a et J. Couturier^a

^aPSA Peugeot Citroën, 1, route de Gizy, 78943 Velizy Villacoublay, France

^bLaboratoire de Mécanique et d'Acoustique (LMA), 31, chemin Joseph Aiguier, 13402 Marseille Cedex 20, France

^cLaboratoire de Neurosciences Cognitives (LNC), 3, place Victor Hugo, 13331 Marseille Cedex 3, France
laure.bosc@mpsa.com

Les véhicules électriques ou hybrides circulant à faible vitesse en zones urbaines sont plus dangereux pour les vulnérables (piétons, cyclistes) que les véhicules à moteur thermique, du fait qu'ils se déplacent en silence. En réponse à ce problème sécuritaire, une réglementation pourrait, à terme, imposer un générateur de son extérieur à ce type de véhicules. La problématique principale posée est celle de l'efficacité de ces systèmes de sonification : quels sons créer et comment les contrôler pour qu'ils renseignent correctement sur l'approche d'un véhicule en mouvement. Des premiers tests ont été menés concernant la détectabilité des sons de synthèse issus d'un générateur sonore vs ceux des moteurs thermiques conduisant à des préconisations en niveau et sonie en fonction de la vitesse du véhicule. Ces tests ont révélé des différences notables de temps de détection entre les sons de synthèse du test, qui ne pouvaient pas être expliquées par les calages en niveau. L'hypothèse de l'influence des attributs timbraux et du contenu évocatoire des signaux sur l'efficacité des sons a donc été posée : à savoir si la rapidité de reconnaissance de l'événement sonore, tant sur la nature de la source que de son mouvement, pouvait jouer un rôle sur le temps de réaction du piéton. Une expérience en laboratoire a été menée auprès de 50 sujets naïfs, portant sur les dimensions perceptives liées à la source sonore, au mouvement perçu et au caractère d'agrément ou de gêne du son. Les 25 sons du corpus du test ont été sélectionnés sur la base de résultats d'un pré-test. Cette étude a permis d'établir une classification perceptive de l'espace sonore étudié sur les registres évocatoires et d'identifier des sons prototypiques de chaque classe, en préalable à d'autres tests d'efficacité à venir.

1 Introduction

Un véhicule circulant à basse vitesse prévient piétons et cyclistes de son arrivée notamment par le bruit qu'il génère. Pour les véhicules à motorisation thermique, jusqu'à 25 km/h environ, la source sonore principale est le moteur. Or, les nouvelles motorisations hybrides et électriques n'ont pas le même rayonnement acoustique, leur bruit de fonctionnement étant en dessous du seuil d'écoute. Ces véhicules se retrouvent ainsi silencieux dans leur déplacement jusqu'à ce que le bruit de roulement soit assez fort, aux environs de 25km/h [8, 11].

En conséquence, et c'est le mouvement des aveugles américains qui a le premier alerté les politiques via la NHTSA [6], le risque d'accident augmente pour les piétons et autres vulnérables urbains (cycliste, jogger, personnes âgées, aveugles, ...). En substance, la question posée se résume à « peut-on laisser sans risque des véhicules d'une tonne circuler en silence à 20 km/h ? ». Des études ont alors mis en évidence le risque en analysant les stratégies des piétons pour les traversées de rues, validant l'importance de l'écoute dans les décisions [7]. D'autres situations comme les manœuvres de parking, et notamment de marche arrière, sont également dans les situations à risque, tout comme les démarrages d'automobile aux intersections. Cette dangerosité a été montrée par des tests de détection et d'évaluation du danger à traverser, les temps de détection et d'estimation du risque obtenus étant trop élevés par rapport au temps de réaction nécessaire pour éviter le danger [2].

Afin d'y remédier, bien des solutions acoustiques sont possibles [10], les états se sont alors emparés de la question et sur le modèle japonais, ont choisi de préconiser une solution sonore, la sonification. Cette technique de synthèse sonore en temps réel diffuse à l'extérieur du véhicule un son continu dont la hauteur (pitch) évolue en fonction de la vitesse du véhicule. Le véhicule prévient donc de sa présence mais également de ses variations de vitesses. La variation du pitch, inspiré de la variation de régime des véhicules thermiques, informe sur l'accélération ou la décélération du véhicule. Cette solution est accompagnée, pour le moment, de recommandations sur les niveaux, vitesse, contenus fréquentiels et autres, et devrait déboucher sur une réglementation dans les 2 ans à venir.

Les constructeurs, qui sont associés à cette réflexion, proposent pour la plupart des solutions sonores basées sur de la synthèse par échantillon (sampling), ayant l'avantage

de posséder les 2 propriétés de bases de la sonification, le flux continu et la variation du pitch [1,4]. La partie restitution sonore est traitée actuellement dans le cadre d'un consortium de constructeurs, fournisseurs et laboratoires de recherches (projet européen EVADER). Les constructeurs ont ainsi proposés des spécifications basées sur les émissions sonores des véhicules thermiques pris comme référence [3].

Dans cette étude, nous traitons la problématique perceptive, et en particulier le potentiel évocatif des sons (métaphores sonores) dans l'efficacité des systèmes de sonification. Ces travaux sont menés dans le cadre du projet ANR METASON dédié à l'exploration des métaphores sonores dans les stratégies de sonification. Pour sa partie applicative, le projet cherche à évaluer des solutions en stratégie de sonification pour l'automobile afin d'améliorer encore l'efficacité des systèmes retenus.

Nous explorons dans METASON d'autres technologies de synthèses sonores, fondées sur la synthèse contrôlée par des paramètres de haut-niveaux [4,5] et actuellement en cours de développement pour être adaptés à l'automobile. Afin d'améliorer l'efficacité des stratégies sonores, nous proposons d'évaluer un panel d'échantillons sonores principalement dans ce qu'il évoque en termes de sources sonores et de mouvements. En s'appuyant sur les principes de l'approche écologique de la perception auditive [13,14], nous faisons l'hypothèse que la source évoquée, pour être efficace dans sa fonction de prévention, doit renvoyer à des caractéristiques proches d'un véhicule en mouvement. L'objectif de l'étude est donc d'identifier comment caractériser au mieux nos échantillons sonores et comment mieux les choisir pour améliorer leur efficacité. L'expérience nous permet également de mieux cibler les futurs protocoles d'évaluation des stratégies de sonification.

2 Test Perceptif

Afin de préparer cette expérience, nous avons mené une phase de prétest par laquelle nous avons pu sélectionner les sons les plus signifiants et différents entre eux, ainsi que les attributs les plus pertinents pour les décrire.

2.1 Procédure

Le protocole mis en place est une écoute successive des échantillons avec un questionnaire de réponse à remplir

pour chaque stimulus. Le test est divisé en deux parties successives. Pour chaque partie, les 25 stimuli ont été soumis aux sujets.

La première partie du questionnaire est non contextualisée, les sujets sont invités à répondre de façon spontanée aux questions suivantes :

- Qu'est-ce que ce son vous évoque ?
- Est-ce le son d'un objet ?
- Dans quel contexte imaginez-vous entendre ce type de son ?
- Quels sentiments provoque-t-il chez vous ? Y a-t-il des mots qui vous viennent à l'esprit pour décrire ce son ?

La deuxième partie du questionnaire est davantage guidée, les sujets doivent répondre aux questions par des échelles graduées ou parmi un nombre limité de réponses. Cette approche va nous permettre de mieux positionner entre eux les différents attributs choisis pour décrire les sources. Le sujet est mis en contexte par la phrase « Vous allez entendre le sons d'objets mobiles... », il doit ensuite répondre aux questions sur la source, les mouvements associés et sur les aspects hédoniques et évocateurs du futur. Les registres évoqués par catégorie sont :

- Sur la source : évocation de la taille, du poids, de l'interaction entre l'objet et l'environnement.
- Sur son mouvement : évocation de l'accélération, de la décélération, de la vitesse mais aussi de la nature de la source qui met en mouvement l'objet (source d'énergie).
- Sur le design des sons : appréciation et évocation de la temporalité du son (passé/présent/futur).

2.3 Sujets

50 sujets ont passé le test, 32 hommes et 16 femmes. Les sujets sont âgés de 21 à 52 ans et n'ont pas déclaré de problèmes auditifs.

2.4 Matériel

Le test a été réalisé au laboratoire d'acoustique du centre technique de PSA à Velizy, les sons sont restitués à travers un système de restitution PEQ Head Acoustics 2482 PEQ IV. Les signaux audio ont été écoutés avec un casque Head Acoustics HA II.

2.5 Simuli

25 échantillons sonores ont été testés, d'une durée de 4,5 secondes chacun. Le corpus a été composé à partir de samples de synthèse stationnaires auxquels une variation linéaire de hauteur (pitch) a été appliquée (delta pitch = + 3,5 demi-tons). La même variation de hauteur a été appliquée à tous les échantillons. A noter que lors du pré-test, le corpus était composé des échantillons en 2 versions, stationnaire et pitchée : à l'analyse, il est apparu que les attributs perceptifs n'étaient pas affectés par la transformation de pitch appliquée. Le corpus du test final a donc pu être réduit à la version pitchée uniquement, choisie car permettant mieux à des sujets de décrire la notion de mouvement perçu. En termes de textures sonores pour les échantillons de synthèse, les choix de sons finaux ont été

basés sur les résultats du pré-test, qui a permis de donner une première visualisation de l'espace perceptif sonore investigué. Enfin, même si cela aurait pu permettre une meilleure contextualisation (passage d'un véhicule), le choix a été fait de ne pas appliquer d'effet Doppler, ceci afin de ne pas déformer les stimuli.

3 Analyse

3.1 Résultats

Les résultats présentés ici concernent uniquement la partie 2 du test : caractérisation perceptive du son d'objets mobiles.

- La source sonore

Concernant la caractérisation de la source sonore, les sujets étaient invités à évaluer la taille et le poids de l'objet émettant de tels sons sur une échelle de Likert en 7 points labellisée, les bornes se déclinant respectivement de « très petit » à « très grand », de « très léger » à « très lourd ». Il résulte de l'analyse de ces réponses que les sujets sont dans l'ensemble assez consensuels. Une analyse en composantes principales (ACP) normée révèle en effet un faisceau assez homogène représentant les directions d'évaluation des sujets (variables), ce qui est corroboré par un important pourcentage d'inertie restituée par la première composante principale, respectivement 49.90% et 45.29%. Comme on peut le voir sur le graphique (Figure 1) qui croise moyennes des notes pour la taille et moyennes de notes pour le poids, il existe une relation forte entre ces deux items ($R = 0.98$, où R est le coefficient de corrélation). Ainsi, le son d'un objet perçu comme grand sera également perçu lourd et inversement le son d'un objet perçu petit sera perçu léger. Une analyse de variance (ANOVA) sur les réponses des deux items nous permet de nous assurer de la discrimination des sons ($p < 0.001$). Un test de comparaisons multiples de moyennes (DUNCAN) met en évidence que les sons 5, 8, 17 et 23 sont perçus comme petits et légers alors que les sons 6, 10, 16, 20, 22 et encore davantage le son 18 sont perçus comme grands et lourds.

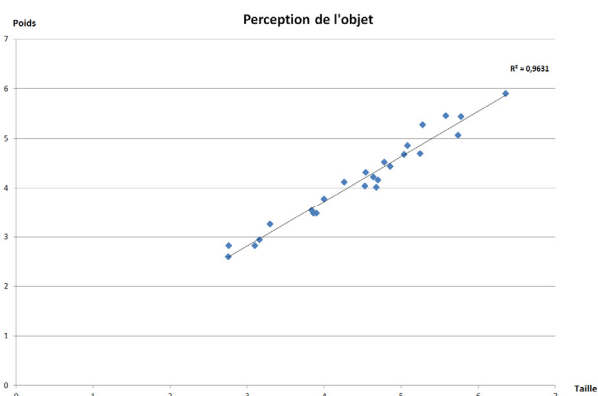


Figure 1 : Poids de l'objet en fonction de la taille pour les 25 sons du corpus, sur la moyenne des notes obtenues pour chaque descripteur

Autre élément pour caractériser la source sonore, l'interaction de l'objet avec l'environnement. Les modalités

les plus représentées dans les réponses sont « roule », « décolle », « vibre », de l'ordre de 30% en moyenne sur tous les sons, les moins représentées sont « est immobile », « frotte », « vole », de l'ordre de 5%. Nous ne parlerons plus de ces dernières par la suite, les effectifs étant jugés comme trop faibles. Une analyse des correspondances simples (AFC) nous permet de mieux visualiser les écarts en relatif des fréquences observées pour caractériser les sons (voir Figure 2). Une classification ascendante hiérarchique (CAH) sur les coordonnées des 3 principaux axes nous permet d'entrevoir 6 classes de sons. La première classe est composée des sons 1, 2, 4, 8, 14, 20, 22, 23, 24, 25. Ils roulent et flottent davantage que les autres. La classe 2 (sons 9, 13 et 15) décollent plus que les autres. La classe 3 composée des sons 11, 17 et 18 est caractérisée par le terme « flotte » toute comme la classe 1. La classe 4 (sons 10, 16, 21) « décolle » comme la classe 2 mais donne l'impression d'impacter sur une surface tout comme la classe 5 (sons 3, 6 et 12). Les sons de la classe 5 sont également caractérisés par le terme « roule ». Les sons de la classe 6 (5, 7 et 19) tournent davantage sur eux-mêmes.

• Le mouvement du son

Concernant la question du mouvement ou du déplacement de l'objet, une grande majorité des sons (2/3) donne l'impression de s'éloigner, le dernier tiers se partage sur les modalités « reste à la même distance » et « se rapproche ». Un test du khi-deux nous permet d'identifier les sons qui sont le plus emblématiques de chaque modalité de réponse ($\alpha = 10\%$). Ainsi, les sons 4 et 17 ont été plus fréquemment cités comme s'éloignant que les autres. Les sons 5 et 10 donnent davantage l'impression de rester à la même distance. Enfin, les sons 6 et 24 ont été plus fréquemment cités comme se rapprochant.

Globalement, tous les sons donnent l'impression d'accélérer, ce qui était un résultat attendu puisque les signaux étaient tous pitchés. Les réponses sont partagées pour le son 5. Les sons qui donnent le plus l'impression d'accélérer sont les sons 4 et 15. Les sons qui donnent le moins l'impression d'accélérer sont les sons 5, 8, 16 et 20.

On demandait ensuite aux sujets d'évaluer la force de l'accélération (s'ils percevaient une accélération) sur une échelle de Likert en 5 points labellisée, se déclinant de « très faible » à « très forte ». On constate dans un premier qu'il n'existe aucune corrélation entre la force de l'accélération perçue et la taille ($R = -0.004$) et le poids ($R = -0.012$). Une ANOVA suivie d'un test de DUNCAN nous permet d'affiner l'analyse et de déterminer les sons dont l'accélération est perçue comme la moins forte (sons 4, 12, 13, 15 et 16) et les sons dont l'accélération est perçue comme étant la plus forte (sons 8, 10, 18, 20 et surtout le 23).

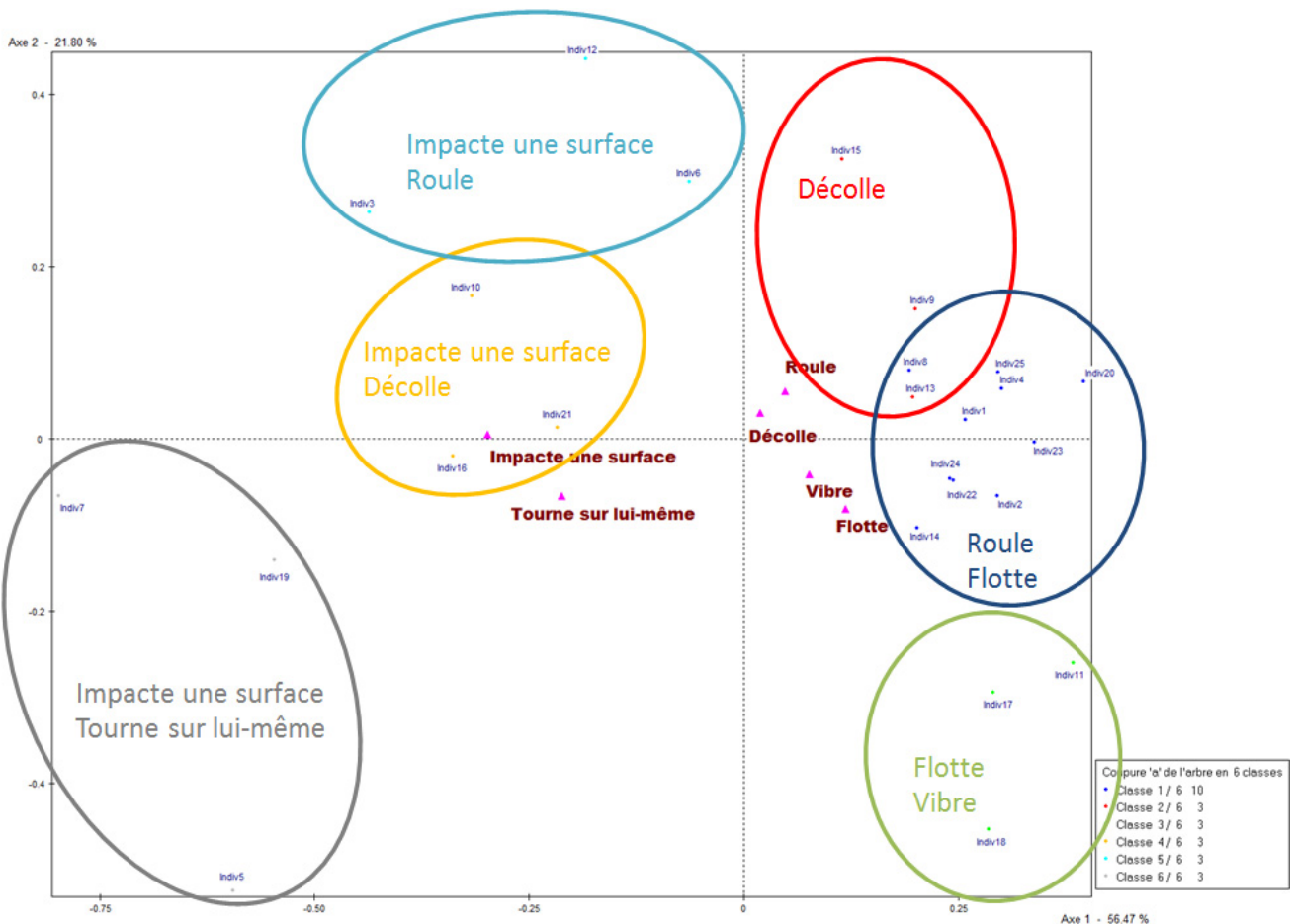


Figure 2 : AFC réalisée sur le type d'interaction objet/environnement

Enfin si l'on s'intéresse à la source d'énergie qui met l'objet en mouvement, on peut dire que les deux tiers des sons évoquent majoritairement une énergie électrique. Le dernier tiers se répartit sur les modalités « turbine » ou « thermique ». Notons que les sons qui évoquent le plus une énergie électrique sont les sons 7, 8, 17, 23, 24, 25. Ceux qui font le plus penser à une turbine sont les sons 15 et 21. Enfin, ceux qui évoquent davantage un moteur thermique sont les sons 12 et 16. L'énergie qui met en mouvement les objets sonores est pour deux tiers des sons proposés perçue comme majoritairement puissante. Les plus emblématiques sont les sons 6, 15, 16, 18, 20 et 21. Les rares sons évoquant réellement une énergie de faible puissance sont les sons 5, 8, 11 et 23. Rappelons que ces derniers étaient majoritairement associés à des objets petits et légers alors que les premiers sont davantage associés aux objets perçus comme grands et lourds. Ceci est corroboré lorsque l'on corrèle les notes moyennes respectivement de la taille et du poids aux pourcentages de sujets ayant répondu que « oui » à l'affirmation selon laquelle la source d'énergie est puissante (respectivement $R=0.83$ et 0.85). Le son le plus difficile à catégoriser est le son 5 avec 40% d'indécis qui n'arrivent pas à trancher et répondent qu'ils ne savent pas.

- Le design des sons

En questionnant les sujets sur les évocations associées aux sons, on cherchait notamment à savoir si l'on se représente davantage ces objets sonores dans le passé, le futur ou tout simplement dans un intervalle de temps qui est le nôtre. Les sons ont majoritairement été catégorisés dans le futur et le présent. Les occurrences faisant référence au passé sont effectivement très faibles de l'ordre de 25% pour les plus importantes. Un test de khi-deux ($\alpha = 5\%$) nous permet de mettre en évidence les sons les plus évocateurs du futur. Il s'agit des sons 1, 2, 7, 8, 19, 20, 22, 23, 24. Les sons les plus actuels sont les sons 4, 6, 10, 11, 12, 15, 16 et 21.

Dernier item également très important pour l'adhésion finale à la fonction de sonification, l'appréciation des sons proposés. Il est en effet indispensable qu'un son destiné à la sonification extérieure ne soit pas jugé désagréable. Notons en première approche que les sons sont plus volontiers rejetés qu'appréciés. L'ACP normée sur les notes recueillies (échelle de Likert en 7 points allant de « très désagréable » à « très agréable ») démontre un certain consensus sur les sons appréciés et les sons rejetés. L'homogénéité des réponses est toutefois moins importantes que pour les items taille et poids de l'objet puisque l'inertie restituée sur le premier axe n'est que de 31%. Sur les 50 sujets interrogés seuls deux semblent se démarquer dans leurs réponses sur l'agrément des sons mais ne peuvent en tant que tels représenter une classe de sujets à part entière. Une ANOVA suivie d'un test de DUNCAN nous permet de voir quels sons sont appréciés et lesquels sont rejetés. Ainsi, les sons 2, 18, 20, 22, 24 et 25 sont les sons qui plaisent le plus aux sujets. Les sons 5, 7, 9, 12, 13, 15, 19 font partie des sons les moins appréciés. Le son le plus segmentant est le son 25. Autant de personnes l'apprécient (notes supérieures à 4) que de personnes le rejettent (notes inférieures à 4).

3.2 Discussion

Un premier enseignement que nous pouvons tirer de l'expérimentation concerne la perception de la taille et du poids, estimés à partir de l'écoute, du son d'un objet en mouvement. Il apparaît nettement dans les résultats que les sons peuvent aisément être discriminés entre eux sur ces 2 descripteurs. Classiquement, on retrouve que les sons dont les composantes graves sont les plus présentes sont ceux estimés les plus « lourds » ou les plus « grands » à l'inverse des sons dépourvus de composantes en dessous de 1000Hz environ. On peut voir dans la figure 3 le cas du son 5, jugé petit et léger (composantes bruitées hautes fréquences) et du son 18 jugé grand et lourd (composantes bruitées et partiels basses fréquences).

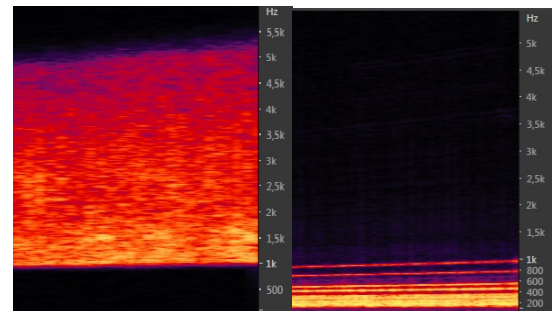


Figure 3 : Graphes temps/fréquence des sons 5 (à gauche) et 18 (à droite)

Pour nos préconisations acoustiques en sonification extérieure, nous retiendrons que les composantes graves, dans la limite des systèmes de restitution utilisés, doivent être bien présentes dans les textures retenues. Les basses fréquences sont également vertueuses au sens où elles sont contributives de la qualité perçue et de l'appréciation des sons. On notera qu'en général il vaut mieux utiliser des partiels que du bruit pour appuyer l'aspect lourd. La limite de l'exercice dans l'usage des fréquences basses (<300 Hz) étant de ne pas re-créer les gênes occasionnées par les moteurs thermiques actuels.

Les résultats obtenus concernant l'interaction entre l'objet et son environnement (évocation de roulement/frottement/impact etc.) font apparaître 6 classes qui permettent de discriminer les sons entre eux. Le type d'interaction visé pour la sonification extérieure est le roulement, de sorte à ce que le son porte mieux l'information d'un véhicule en approche. Un résultat intéressant est qu'il apparaît deux classes, disjointes perceptivement, dont les sons possèdent une composante de « roulement » : la classe 1 dont les sons roulent et flottent, et la classe 5 qui roulent et impactent une surface. Les sons de la classe 5, sur la question de l'énergie évoquée (thermique, turbine, électrique), sont jugés très majoritairement thermique ou turbine, ce qui laisserait penser que cette classe renvoie au référent communément connu du monde des moteurs actuels. L'intérêt des résultats est de montrer qu'il peut exister une autre classe pour évoquer l'interaction de roulement que de reproduire les sons de moteurs thermiques.

Un autre point qui mérite d'être relevé concerne la classe des sons jugés comme « impacte une surface / tourne sur lui-même » : les sons qui possèdent ces attributs

possèdent tous une composante de modulation de fréquence prédominante. Les résultats semblent indiquer que les variations temporelles trop présentes, trop régulières, nous éloignent des interactions de type roulement et sont en général rejetées d'un point de vue hédonisme. Une étude supplémentaire basée sur un corpus de sons modulés pourrait permettre de mieux borner les modulations acceptables pour la fonction de sonification extérieure.

Concernant la perception du mouvement, les résultats confirment bien que la variation de hauteur du son renseigne sur la perception d'accélération des objets. Sachant que les sons sont à iso-variation de pitch dans leur construction, les contenus spectraux, quant à eux, diffèrent et peuvent expliquer des différences dans la perception de l'évolution globale du pitch, comme l'avait montré une étude sur la perception du régime moteur [9]. Les différences de perception d'accélération entre les sons demanderaient une analyse plus poussée afin de comprendre sur quels indices spectraux ou temporels les sujets se sont basés pour discriminer les sons. Dans la perspective d'efficacité d'un son extérieur, un son qui donnerait l'impression d'accélérer davantage serait a priori plus alertant pour un piéton.

En termes d'agrément, les sons préférés sont tous composés de partiels / harmoniques, équilibrés sur le spectre, avec parfois la présence de bandes étroites. Deux d'entre eux ont des consonances musicales (harmoniques) et trois d'entre eux des timbres voisés (formants). Les sons ne sont pas modulés ou légèrement et aléatoirement en amplitude. La plupart de ces sons n'évoque pas d'objet en particulier et est plutôt perçue comme abstraite. A l'inverse, les sons qui sont perçus comme proches de sources de l'environnement sont plutôt rejetés.

En Figure 4, la représentation Temps / fréquence du son 25 qui fait partie des sons préférés et dont les propriétés recherchées sont les plus présentes. On reconnaît la structure partiel (de BF à medium/aigu), des bandes étroites et une légère modulation aléatoire temporelle.

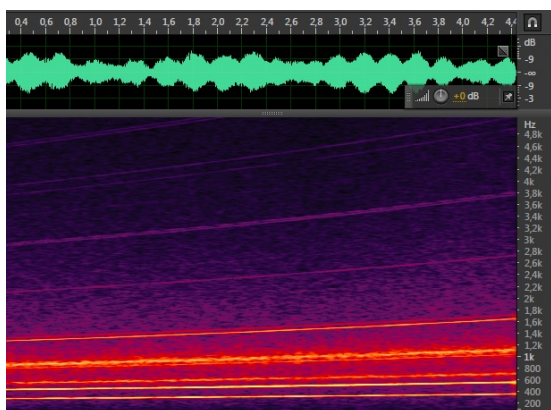


Figure 4: Graphe temps/fréquence du son 25

Un de nos objectifs était d'obtenir des prototypes de sons pour lesquels nous obtenons les meilleures estimations sur les critères les plus pertinents. Ainsi, pour la sonification extérieure nous avons retenu en priorité les évocations d'objet roulant, de sources électriques, mais aussi de taille/poids, puissance et évocation du futur. Nous avons ensuite confronté ces évaluations aux appréciations

hédoniques afin de ne garder que les sons préférés. Nous obtenons un groupe composé de 5 sons (2, 20, 23, 24, 25), on y retrouve en majeure partie des sons plutôt issus de textures musicales ou futuristes, équilibrés entre basses et moyennes fréquences, sans impact et légèrement modulés. Une approche plus analytique via des signaux paramétrés permettra d'affiner encore les corrélats acoustiques majeurs de ces attributs perceptifs.

Enfin, bien qu'ayant pris des précautions dans notre protocole pour mettre les sujets en contexte, nous sommes loin d'une écoute écologique au sens strict, et nous estimons que ces tests en laboratoire devront être complétés par des tests *in situ*. Nous savons en effet qu'explorer les propriétés d'un objet telles qu'elles sont inférées directement par l'événement sonore dans son contexte sera a priori plus fiable que de tenter de décrire le son uniquement par ses caractéristiques sonores les plus évidentes [13,14].

4 Conclusion

Cette étude menée dans le cadre du projet METASON nous a permis de confronter de nombreuses textures sonores aux évocations de sources et de mouvements qu'elles induisent chez les sujets. L'hypothèse forte autour des métaphores sonores dans le projet METASON est d'utiliser les invariants sonores, contenus dans les sources, qui infèrent chez les sujets leurs propriétés perceptives essentielles, les rendant immédiatement reconnaissables [13,14]. Le son généré faisant sens pour les sujets améliore ainsi la perception directe de la source évoquée. Le but de la sonification extérieure est d'abord de prévenir de l'arrivée d'un véhicule, la reconnaissance instantanée de la source améliorera donc mécaniquement l'efficacité du système. Quels que soient les moteurs de synthèses sonores utilisés, modèles source / résonateur ou sampler, nous avons besoin d'évaluer l'efficacité perceptive des sources évoquées pour nos objectifs de sonification. L'étude a ainsi permis de révéler les caractéristiques des sources qui font le plus consensus chez les sujets, d'évaluer les sons sur ces propriétés et, en les croisant avec les appréciations, nous avons pu extraire les textures qui font le plus sens pour la sonification des véhicules silencieux.

Les propriétés des sources que nous souhaitons évoquer en priorité sont celles d'un objet roulant, lourd, à motorisation électrique. La sonification a aussi un objectif hédonique d'appréciation voire de signature sonore, l'étude a pu montrer là aussi les sons les plus appréciés ou rejetés. Parmi les préférées, les textures les plus musicales et les plus équilibrées en sources bruitées et harmonique, lorsque les partiels présents sont suffisamment graves, l'objet est immédiatement perçu comme plus lourd, plus grand. L'analyse croisée des descripteurs les plus pertinents pour la description et la valorisation de la source ont montré que 5 sons sur les 25 testés du corpus rassemblent les éléments les plus recherchés pour la sonification extérieure. Ces sons regroupent principalement des propriétés de qualité (absence de dissonance), de texture musicale ou voisée (versus bruits métalliques, grincement, ..), d'homogénéité (absence de modulations trop marquées, aléatoires ou non) et de fréquences plutôt basses.

Les analyses sur la nature des interactions nous ont permis d'obtenir une première cartographie, positionnant

ainsi les sons sur les aspects roulant, flottant, vibrant ou impactant. Toutefois les consensus sont moins bons et les futurs moteurs de synthèse permettront de mieux comprendre ce qui fait sens dans les sons pour ces propriétés.

Dans la dernière partie du projet METASON et dans nos activités de recherche à suivre, nous testerons des moteurs de synthèse sonore pour la sonification s'inspirant de modèles physiques de sources et de leurs interactions développés par le LMA du CNRS Marseille. Ces nouveaux modules sont contrôlés directement par les propriétés physiques et géométriques des sources pour la synthèse du son et par les variables cinétiques pour le mapping en fonction du mouvement [5,6]. Nous vérifierons alors à nouveau les évocations obtenues et nous chercherons les meilleures calibrations pour assurer l'efficacité des systèmes de sonification automobile à venir.

Remerciements

Cette étude a été soutenue par le projet METASON, projet financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR-10-CORD-010, "Métaphores sonores" <http://metason.cnrs-mrs.fr/>).

Références

- [1] J.-C. Chamard and V. Roussarie ; Design of Electric or Hybrid vehicle alert sound system for pedestrian ; Congrès Français d'Acoustique, Nantes 25 avril 2012.
- [2] J.-C. Chamard, V. Roussarie, L. Bosc, R. Kronland Martinet, Design of Electric or Hybrid vehicle alert sound system for pedestrian, Congrès Français d'Acoustique, Nantes 25 avril 2012
- [3] JC Chamard, GDR "Ville Silencieuse Durable", journée "Ambiance sonore" 13 novembre 2012. "Design of Electric or Hybrid vehicle alert sound system for pedestrian"
- [4] F. Dubois, G. Baudet and J.-C. Chamard ; EVADER: Electric Vehicle Alert for Detection and Emergency Response ; Congrès Français d'Acoustique, 2012, Nantes, France
- [5] R. Kronland-Martinet, S. Ystad Solvi, M. Aramaki, High-level control of sound synthesis for sonification processes , AI & Society 2012, vol. 27, issue 2, pp. 245-255
- [6] A Merer, M. Aramaki, S. Ystadi, R. Kronland-Martinet, Perceptual characterization of motion evoked by sounds for synthesis control purposes, ACM Transactions on Applied Perception (TAP) 2013, vol. 10, issue 1, pp. 1-24
- [7] National Highway Traffic Safety Administration, "Quieter Cars and the safety of blind pedestrians: phase ; 1", DOT HS 811 304, April 2010.
- [8] Rodrigues J., Dommès A., Cavallo V. et Vienne F., "Etudier la traversée de rue en environnements virtuels : Informations auditives et sentiment de présence", 3e

colloque francophone international du GERI COPIE, Salon de Provence, France, 2011.

- [9] V. Roussarie, F. Richard, M-C. Bezat, Perceptive qualification of engine sound character, validation of auditory attributes using analysis-synthesis method Proceedings of the CFA/DAGA in Strasbourg. (2004)
- [10] SAE Standard J2889-1, "Measurement of minimum noise emitted by road vehicles", 2011.
- [11] U. Sandberg, L. Goubert and P. Mioduszewski ; Are vehicles driven in electric mode so quiet that they need acoustic warning signals? Proceedings of 20th International Congress on Acoustics, ICA 2010 ; 23-27 August 2010, Sydney, Australia
- [12] K. Yamauchi, M. Takada, K. Nagahata, and S. Iwamiya, "An examination on required sound levels for the external acoustic sign for quiet vehicles", Proceedings of Inter-Noise 2010, Lisbon, Portugal, 2010.
- [13] Gaver, W. W. (1993). What in the world do we hear? An ecological approach to auditory event perception. *Ecological Psychology*, 5 (1), 1-29.
- [14] Gaver, W. W. (1993). How do we hear in the world? Explorations in Ecological Acoustics, *Ecological Psychology*, 5 (4), 285-313.