

CFA/VISHNO 2016

Etude de la perception des sons de climatisation automobiles

A. Minard, C. Lambourg et P. Boussard

GENESIS, Domaine du Petit Arbois BP69, 13545 Aix En Provence Cedex 04, France
antoine.minard@genesis.fr



LE MANS

Avec l'apparition de véhicules électriques ou hybrides, le son produit par la motorisation devient moins problématique, car sa contribution au bruit global perçu en habitacle est réduite. Toutefois cette réduction provoque l'émergence d'autres sources telles que les systèmes de climatisation. Le cas échéant, ces sources peuvent à leur tour augmenter le désagrément. Le projet FUI CEVAS s'intéresse à la simulation et la perception des sons de systèmes de climatisation automobile et de refroidissement de batterie. Dans le cadre de celui-ci, une étude perceptive du son de climatisation est présentée. Cette étude a consisté en une expérience psychoacoustique de différentiels sémantiques, afin d'établir l'espace perceptif des sons de climatisations et de relier le désagrément aux autres attributs sémantiques évalués. Un ensemble de 12 échelles sémantiques a été présenté à 20 participants afin de décrire les propriétés perceptives de 60 sons de climatisation automobile représentatifs des systèmes existant à l'heure actuelle. Une analyse en composantes principales a été appliquée aux résultats de cette expérience et a révélé un espace constitué de 3 composantes permettant d'expliquer plus de 95 % de la variance des données. La dernière étape de cette étude a consisté en l'objectivation du désagrément des sons de climatisation automobile. Celle-ci a mis en lumière l'influence forte et prévisible du niveau sonore perçu, mais aussi ponctuellement l'effet secondaire d'émergences tonales ou de fluctuations d'amplitude.

1 Introduction

Le projet CEVAS a pour objectif d'améliorer la modélisation acoustique des systèmes de climatisation automobiles (SCA) et d'en étudier la perception. La finalité principale du projet est d'obtenir un outil efficace pour la conception de nouveaux systèmes, optimisés afin de répondre à des critères de confort acoustique plus importants qu'auparavant avec la généralisation de véhicules silencieux (électriques et hybrides notamment).

Une partie du projet se concentre sur la caractérisation et la modélisation aéroacoustique des SCA [1] [2], jusqu'à la synthèse audio du son produit [3]. Une autre part du projet est consacrée à la perception sonore des SCA dans le contexte d'un habitacle automobile. Le travail présenté ici s'inscrit dans ce cadre et s'intéresse plus particulièrement aux attributs perceptifs pertinents permettant la description des sons de SCA et leur lien spécifique avec le désagrément qu'ils peuvent susciter.

La littérature scientifique offre une variété d'études portant sur le confort acoustique associé aux sons de systèmes de climatisation, plus souvent dans le cadre résidentiel ou dans les bureaux. Un certain nombre d'études [4] [5] [6] [7], fondées sur des questionnaires et des mesures chez les résidents, se contentent de relier le désagrément des systèmes de climatisation à des indicateurs de niveau sonore. D'autres recherches portent sur des expériences en laboratoire afin de mieux maîtriser les facteurs influençant potentiellement le désagrément pour se concentrer sur la réponse suscitée par chaque son. Ainsi plusieurs études sur les sons de climatisation résidentielle [8] [9] [10] ont révélé un espace de timbre à 2 ou 3 dimensions, souvent expliquées principalement par l'acuité et la tonalité. Ces études ont également proposé des modèles de qualité sonore calculés à partir d'indicateurs psychoacoustiques correspondant à ces paramètres. Globalement les auditeurs préfèrent les sons plus sourds (acuité faible) et moins tonaux, même si certaines analyses révèlent des groupes d'auditeurs manifestant des tendances différentes, voire inverses.

Dans les domaines du transport, la climatisation dans les trains a également été abordée, notamment par Kahn et Hogstrom [11], qui retrouvent un lien associant le désagrément avec l'acuité et la tonalité. Toutefois d'autres études [12] [13], au travers d'une approche cognitive du confort acoustique dans les trains, montrent un effet bénéfique du son de climatisation pour l'ambiance acoustique intérieure : celui-ci permet aux passagers de s'isoler des conversations d'autres passagers ou des bruits

intempestifs. Dans le contexte automobile, la problématique du son de climatisation a été abordée par Menager et Rochepeau [14] qui ont étudié 5 SCA, enregistrés seuls ou en habitacle automobile, et à différents régimes de fonctionnement (mode et débit). Le modèle prédictif obtenu établit un lien avec la sonie (détériorant la qualité) et le *Speech Interference Level* (favorisant la qualité). Enfin le projet CESAM a également porté sur des sons de SCA, étudiés en laboratoire [15]. Douze modèles ont été considérés, et enregistrés sur banc d'essai et en véhicule, à 2 modes de fonctionnement et 2 débits. Plusieurs expériences psychoacoustiques ont été réalisées et ont permis d'aboutir à un modèle d'agrément fondé sur le *Speech Interference Level* et sur le modèle de tonalité d'Aures [16].

L'étude présentée ici a pour but d'étudier le son de SCA sur un corpus élargi, incorporant un plus grand nombre de modèles, notamment de véhicules hybrides et électriques, et une plus grande variété de modes de fonctionnement. Ce corpus est étudié au travers d'une méthodologie psychoacoustique complète allant de la définition des échelles sémantiques pertinentes pour la description de ce type de son à la mise au point d'un modèle robuste de désagrément, qui sera confronté aux modèles précédemment évoqués.

2 Evaluation perceptive des sons de SCA

Le principe de l'étude réalisée est d'étudier les différentes dimensions sonores des SCA. Pour ce faire, une expérience de *différentiels sémantiques* [17] a été réalisée. Ce type d'expérience consiste à évaluer les sons étudiés sur un ensemble d'échelles dont les bornes sont définies par des couples d'adjectifs ou de termes de significations opposées.

Toutefois, afin de ne pas biaiser les jugements par l'usage d'un vocabulaire prédéfini dont la seule valeur est celle que l'expérimentateur lui prête, les échelles sémantiques utilisées ont été établies par une expérience préliminaire de *verbalisations* selon la méthode employée par Nosulenko et al. [18]. Il a donc été demandé à 10 participants de verbaliser les différences et les préférences entre chaque paire de sons à partir d'un corpus de 8 enregistrements. L'analyse des résultats de cette expérience préliminaire (non détaillée ici) a permis d'identifier 12 échelles sémantiques pertinentes pour la description des sons de SCA, listées dans le tableau 1.

Tableau 1 – Listes des échelles sémantiques utilisées

Très désagréable	Peu désagréable
Très sifflant	Peu sifflant
Grave	Aigu
Très fluctuant	Peu fluctuant
Fort	Faible
Très rond	Peu rond
Très bruité	Peu bruité
Très soufflant	Peu soufflant
Très clair	Peu clair
Localisé	Diffus
Proche	Lointain
Bonne qualité	Mauvaise qualité

2.1 Stimuli

Le corpus de sons de cette expérience doit répondre à 2 problématiques : on cherche bien entendu à évaluer la perception des SCA telle qu'elle intervient dans l'habitacle, mais également à fournir une évaluation sur laquelle le constructeur de SCA peut avoir une influence. Ainsi le corpus de sons comprend un ensemble de 40 sons enregistrés en habitacle, où interviennent donc les influences du tableau de bord et de l'habitacle, et un ensemble de 20 sons de SCA seuls enregistrés sur banc d'essai en salle semi-anéchoïque.

Par ailleurs, afin d'inclure dans le corpus une large variété de modèles de SCA, la base de sons du projet CESAM [15] a également été utilisée. La sélection de 60 sons a été effectuée en veillant à inclure plusieurs échantillons de chaque mode (CVAR, CVAF, HFF, HDF), avec différents débits. Tous les sons ont subi dans l'ordre les traitements suivants :

- Extraction d'une portion d'une durée de 5 secondes ;
- Egalisation pour compenser les réponses en fréquence entre 80 Hz et 16 kHz des têtes artificielles utilisées pour les enregistrements (Cortex MKII ou B&K 4100) et du casque utilisé pour l'expérience (Sennheiser HD 650) ;
- Application de rampes linéaires de 200 ms en début et en fin de son.

2.2 Participants

Vingt participants (10H/10F, âgés de 23 à 50 ans, et possédant tous une voiture) ont pris part à l'expérience, pour laquelle ils ont été rémunérés. Aucun n'a fait mention d'un problème auditif majeur dont il aurait eu connaissance, et aucun ne travaille dans un domaine lié à l'audio ou l'acoustique.

2.3 Matériel

L'expérience a été effectuée au casque dans une cabine audiométrique du LMA, à Marseille. Une carte audio RME Fireface UC et un casque audio ouvert Sennheiser HD 650 ont été utilisés.

Une interface graphique a été spécialement programmée en Matlab R2011b. Cette interface gère la lecture des sons (par la librairie *Psychtoolbox*¹ et sa fonction *PsychPortAudio*), la saisie des réponses des participant (évaluations de chaque son sur les 12 échelles sémantiques)

¹ <http://psychtoolbox.org/>

et la sauvegarde temporaire (en cas de problème technique) et définitive des données.

2.4 Procédure

Au début de l'expérience, une consigne écrite est fournie aux participants leur expliquant le contexte de l'expérience et la tâche à réaliser. Après avoir lu cette consigne, les participants doivent dans un premier temps écouter une séquence constituée de 12 sons extraits du corpus sonore, présentés dans un ordre aléatoire pour chaque participant.

Après cette lecture (qui peut être relancée autant de fois que nécessaire avant de passer à la suite), l'expérience de différents sémantiques commence. Pour chaque son présenté, les participants doivent l'évaluer sur les 12 échelles sémantiques (échelles discrètes en 7 points), avant de pouvoir valider pour passer au son suivant. Ils ont la possibilité de réécouter chaque son autant de fois qu'ils le désirent avant de valider. L'expérience débute par 4 sons d'entraînement, non inclus dans les 60 sons de l'expérience, afin que les participants se familiarisent avec la tâche à effectuer. Une fois ces 4 sons évalués sur les 12 échelles, l'expérience à proprement parler commence, et les participants doivent répéter la tâche sur les 60 sons. L'ordre de présentation des sons est aléatoire² et différent pour chaque participant. Par ailleurs, pour chaque participant, l'ordre des 12 échelles sémantiques et leur orientation (placement gauche/droite des termes opposés) sont aléatoires, mais maintenus pour toute l'expérience.

Enfin lorsque les participants ont évalué tous les sons l'expérience est terminée.

2.5 Analyse

Les données de sortie de l'expérience prennent la forme d'un jeu de 20 matrices correspondant chacune aux résultats d'un participant. Ces matrices sont de taille 60 x 12, et contiennent les évaluations des 60 sons sur les 12 échelles sémantiques (seule la seconde présentation du son répété est retenue).

L'analyse de la répétabilité (un son présenté 2 fois pour chaque participant) et l'analyse de la cohérence interindividuelle (matrice de corrélation inter-participant et analyse hiérarchique par la méthode UPGMA [19]) révèlent des incohérences ponctuelles mais aucun participant ne présente des résultats systématiquement aberrants. L'ensemble du panel de 20 participants est donc conservé pour la suite de l'analyse.

Compte tenu de la présence dans le corpus sonore de sons enregistrés en condition semi-anéchoïque et de sons enregistrés en véhicules, une première étape de l'analyse des résultats globaux a consisté en une analyse de variance sur ces deux conditions d'enregistrement. Vingt sons parmi les 60 correspondent à des enregistrements répétés dans ces 2 conditions toute chose égale par ailleurs (mêmes modèle, mode de fonctionnement et débit). Un test de Friedman a été appliqué sur ces 20 sons pour chacune des 12 échelles sémantiques. Une correction de Bonferroni est utilisée pour compenser l'augmentation du risque d'erreur de première espèce due à la répétition des tests statistiques. Un effet significatif est révélé pour les échelles « peu

² Le premier son évalué est toutefois systématiquement présenté une seconde fois à la fin de l'expérience (afin de vérifier la répétabilité des jugements), les participants doivent en réalité évaluer 61 sons.

désagréable/très désagréable » ($\chi^2(1,360^3)=12.05$, $p<0.05$), « grave/aigu » ($\chi^2(1,380)=49.54$, $p<0.05$), « faible/fort » ($\chi^2(1,380)=30.57$, $p<0.05$), « proche/lointain » ($\chi^2(1,360^3)=10.52$, $p<0.05$), « peu bruité/très bruité » ($\chi^2(1,380)=25.07$, $p<0.05$), « peu soufflant/très soufflant » ($\chi^2(1,380)=18.11$, $p<0.05$) et « peu rond/très rond » ($\chi^2(1,380)=22.11$, $p<0.05$). Globalement on constate que la condition d'enregistrement en véhicule a tendance à rendre les sons plus désagréables, forts, graves, ronds, proches, bruités et soufflants. Seuls certains sons, les enregistrements au mode CVAR, ainsi qu'au mode CVAF à fort débit (Q500), sont moins sensibles à ces effets.

Afin de déterminer les liens qui existent entre les différentes échelles sémantiques, une analyse en composantes principales (ACP) a été appliquée aux évaluations moyennes des 60 sons sur les 12 échelles sémantiques. Les 3 premières composantes résultant de l'ACP appliquée aux évaluations moyennes permettent d'expliquer plus de 95 % de la variance des données. Les figures 1 et 2 représentent les plans formés respectivement par les composantes 1 et 2, et 1 et 3.

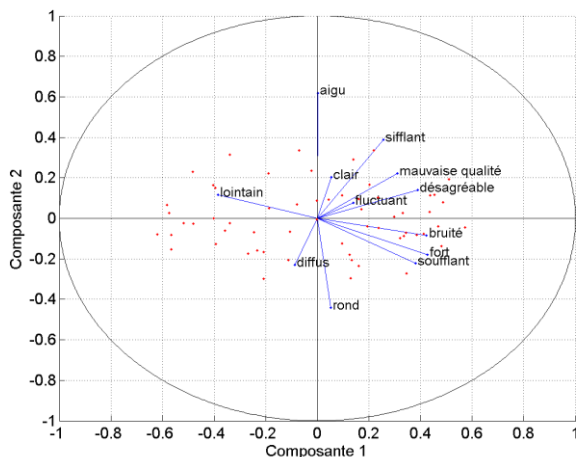


Figure 1 – Plan formé par les composantes 1 et 2 de l'ACP. Les points rouges représentent les sons, et les lignes bleues les coefficients des échelles sémantiques.

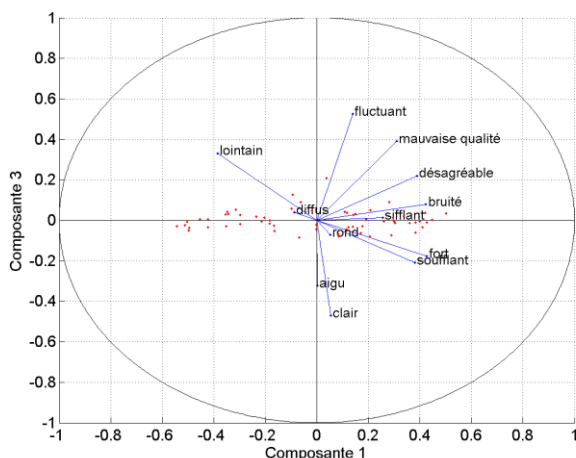


Figure 2 – Plan formé par les composantes 1 et 3 de l'ACP. Les points rouges représentent les sons, et les lignes bleues les coefficients des échelles sémantiques.

La composante 1 semble correspondre grossièrement au jugement de désagrément (échelle « peu désagréable / très désagréable »), elle-même corrélée à l'échelle « mauvaise qualité / bonne qualité » ($r(58 \text{ degrés de liberté})=0.95$). Cette composante semble également liée au niveau sonore perçu, au travers de l'échelle « faible / fort », elle-même corrélée aux échelles « peu bruité / très bruité » ($r(58)=0.97$) et « peu soufflant / très soufflant » ($r(58)=0.98$). Les échelles « peu désagréable / très désagréable » et « faible / fort » sont également fortement corrélées ($r(58)=0.91$). Les échelles « peu sifflant / très sifflant » ($r(58)=0.86$) et à moindre mesure « stable / fluctuant » ($r(58)=0.80$) contribuent également au désagrément, et l'échelle « proche / lointain » y contribue négativement ($r(58)=-0.90$).

La composante 2 semble elle liée à la perception de l'acuité, puisqu'elle est alignée avec l'échelle « grave / aigu » sur le plan des 2 premières composantes (figure 1). Cette échelle est également négativement corrélée avec l'échelle « peu rond / très rond » ($r(58)=-0.85$).

Enfin la composante 3 semble liée principalement à l'échelle « stable / fluctuant », qui est corrélée, comme mentionné précédemment, à l'échelle « peu désagréable / très désagréable », mais également à l'échelle « bonne qualité / mauvaise qualité » ($r(58)=0.82$).

Les composantes d'ordre supérieur permettent de retrouver les échelles « peu sifflant / très sifflant » et « localisé / diffus ». Enfin l'échelle « sourd / clair » semble à part, son coefficient de corrélation le plus élevé, avec l'échelle « grave / aigu », étant relativement modéré ($r(58)=0.66$).

La dernière analyse a consisté en l'objectivation des évaluations moyennes sur l'échelle « peu désagréable / très désagréable » (appelé par la suite désagrément par souci de concision) à l'aide d'indicateurs acoustiques et/ou psychoacoustiques. Pour ce faire, les indicateurs disponibles dans le logiciel LEA⁴, listés dans le tableau 2, ont été calculés sur l'ensemble des 60 sons de l'expérience.

Tableau 2 – Indicateurs acoustiques et psychoacoustiques calculés.

Type d'indicateur	Détails
Niveaux sonores	dB SPL, pondérations A, B, C, G ; SEL ; SIL3, SIL4, PSIL
Indicateurs de sonie (et niveaux d'isotonie)	Modèles de Zwicker [20] et de Moore [21]
Autres indicateurs psychoacoustiques	Acuité, Rugosité, Force de Fluctuation, Tonalité
Indicateurs d'émergence tonale	Normes ISO1996-2 annexe C [22] et DIN45681 [23]

Le coefficient de corrélation de Bravais-Pearson ajusté a été évalué entre les 60 valeurs de chacun des indicateurs et le désagrément. On constate l'importance de la sonie dans le jugement de désagrément : les 2 modèles de sonie sont corrélés respectivement à $r_{aj}(58)=0.93$ et $r_{aj}(58)=0.94$. tout comme le niveau mesuré en dBA ($r_{aj}(58)=0.94$) ou les *Speech Interference Levels* (SIL3, SIL4 et PSIL, avec $r_{aj}(58)=0.94$, 0.94 et 0.91 respectivement). En revanche les autres niveaux pondérés sont moins efficaces et les autres

³ Les données sur cette échelle présentent une valeur manquante à cause d'un problème technique ponctuel lors du test, ce qui explique le nombre de degrés de liberté inférieur aux autres échelles pour le terme erreur.

⁴ <http://genesis-acoustics.com>

indicateurs psychoacoustiques ne suffisent pas à eux seuls à expliquer le désagrément.

Un modèle complet de qualité sonore a été recherché afin d'améliorer la prédiction du désagrément. Pour ce faire une régression pas-à-pas [24] a été utilisée. Cette procédure recherche itérativement les indicateurs apportant une amélioration significative au modèle. Le résultat de cette procédure est le modèle associant le niveau d'isotonie selon le modèle de Moore et l'audibilité tonale de la norme ISO1996 : $r_{aj}(57)=0.96$, $F(57,3)=337.49$, $p=0.00$ (voir figure 3). Toutefois la contribution du niveau d'isotonie au modèle est plus de 5 fois supérieure à celle de l'audibilité tonale. Plusieurs autres modèles de qualité sonore, spécifiques aux sons de SCA ou non, ont également été testés : la *Psychoacoustic Annoyance* de Zwicker et Fastl [25], le modèle d'agrément des SCA du projet CESAM [15], fondé sur le SIL4 et la tonalité d'Aures, et le modèle de préférence de Ménager et Rochepeau établi sur une ancienne génération de SCA [14], fondé sur le niveau d'isotonie (modèle de Zwicker) et le PSIL (ces 2 paramètres sont toutefois très corrélés entre eux sur notre corpus de sons, à $r_{aj}(58)=0.98$). Ces modèles ne permettent pas d'améliorer significativement la prédiction, avec des coefficients de corrélation de $r_{aj}(58)=0.90$, -0.94 et -0.93 respectivement.

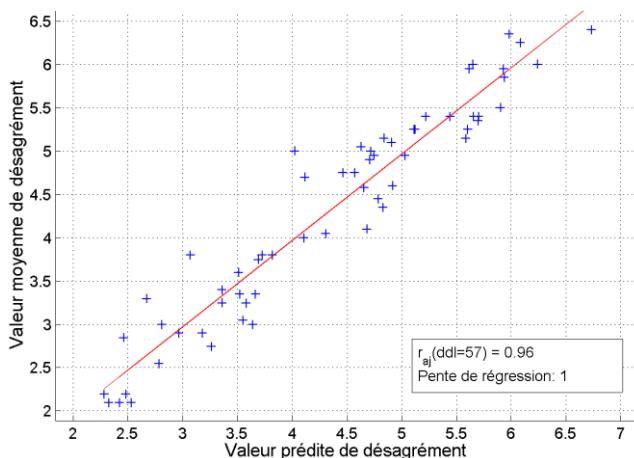


Figure 3 – Diagramme de dispersion des valeurs moyenne de désagrément et du modèle obtenue.

3.6 Discussion

Le modèle de désagrément est à mettre en regard avec les modèles établis lors de précédentes études sur les sons de SCA, mais également sur des sons de climatisation et de ventilation en général.

Tout d'abord le modèle obtenu est assez proche de celui du projet CESAM [15] qui inclut un indicateur de niveau sonore (SIL4) et un indicateur fondé, entre autres, sur un calcul d'émergence tonale (Tonalité d'Aures). Le modèle de [14] est quelque peu différent puisque celui-ci inclut deux descripteurs de niveau sonore (Niveau d'isotonie et PSIL), corrélés entre eux pour le corpus sonore étudié.

Par ailleurs, le modèle obtenu ici par régression pas-à-pas incluait initialement le niveau sonore en dB(G). A première vue, ceci pourrait sembler cohérent avec une précédente étude sur les systèmes de climatisation résidentielle [10], qui a révélé une contribution particulière du contenu en basses fréquences, matérialisé par la somme de la sonie spécifique dans les 2 premières bandes de Bark. Toutefois, il a été décidé de ne pas garder le niveau en dB(G) pour plusieurs raisons. Tout d'abord le coefficient

associé lors de la régression est négatif, ce qui signifie que plus le niveau en dB(G) est important, moins le désagrément est élevé, ce qui peut sembler inadéquat, et notamment contradictoire au modèle de [10]. De plus, la pondération G est centrée sur 20 Hz, et il est relativement improbable que cette zone fréquentielle ait réellement eu une influence lors du test, compte tenu du casque utilisé et du fait qu'aucun caisson de basses n'a été employé. Sa présence dans le modèle est donc très probablement fortuite.

Par ailleurs il peut paraître étonnant de ne pas trouver parmi les indicateurs pouvant expliquer une part du désagrément des paramètres souvent associés à la perception des sons de climatisation et de ventilation, comme l'acuité ou la force de fluctuation. En effet, l'analyse en composantes principales exposée précédemment a révélé que la 2^e et la 3^e composantes étaient associées à la perception des échelles « grave/aigu » et « stable/fluctuant », respectivement.

L'étude évoquée précédemment [10] avait également identifié l'acuité comme un attribut du timbre des sons de climatisation au travers d'une expérience de mesure de similarités, mais sa contribution aux préférences était incertaine (l'indicateur d'acuité utilisé n'était notamment pas retenu lors d'une régression pas-à-pas). Dans une autre étude [9] le confort a été directement relié à l'acuité (une valeur forte diminuant celui-ci), mais les expériences n'ont comparé que des sons correspondant aux mêmes enregistrements dont les composantes tonales et une bande particulière du spectre de bruit avaient subi des amplifications/réductions. Dans ce cas précis la corrélation entre l'acuité et le confort est directement induite par le choix de corpus sonore. L'influence de l'acuité sur la qualité sonore ne semble donc pas triviale, même si l'acuité reflète un aspect sonore qui est clairement perçu. Il est également possible que le lien entre ce paramètre et la qualité sonore ne soit pas linéaire, et donc monotone.

Concernant la force de fluctuation, son influence est probablement trop ponctuelle dans le corpus sonore étudié (principalement un seul son parmi 60, correspondant à un SCA d'un véhicule peu récent, et présentant manifestement un défaut, probablement d'usure) pour justifier son incorporation dans le modèle d'objectivation. Si le désagrément semble être nettement plus élevé en cas de fluctuations importantes, la rareté de ce phénomène dans la base de données et le fait que celui-ci corresponde à un défaut incite à penser que la présence d'un indicateur de fluctuation n'est pas indispensable pour un indicateur de qualité sonore de SCA sortis d'usine.

5 Conclusion

Cette étude avait pour objectif d'étudier la perception des systèmes de climatisation automobiles (SCA) et en particulier le désagrément qu'ils provoquent. Un corpus sonore a été établi de sorte à regrouper une large variété de modèles de SCA, incluant notamment des modèles utilisés sur des véhicules hybrides et électriques. Afin d'identifier les attributs auditifs pertinents pour la description des sons de SCA, une expérience perceptive de différentiels sémantiques a été réalisée. Celle-ci a consisté à évaluer un ensemble élargi de 60 sons de SCA, sur 12 échelles sémantiques, établies suite à une expérience préalable de verbalisations. L'analyse multidimensionnelle des résultats révèle un espace de description à 3 composantes

correspondant respectivement au désagrément, à l'acuité et à la perception des fluctuations. L'objectivation de l'échelle de désagrément a permis d'obtenir un modèle fondé sur le niveau d'isotonie et un indicateur d'émergence tonale (annexe C de la norme ISO1996-2). Ce modèle semble plus efficace que les précédents modèles de qualité sonore des SCA.

Cette étude, tout comme les précédentes études sur le sujet [14] [15], est fondé sur une approche psychoacoustique de la qualité sonore. Or, dans le domaine ferroviaire, les études de Khan [12] et Mzali [13] ont déjà montré qu'une approche cognitive de la qualité sonore peut révéler un effet bénéfique du son de climatisation. Une telle approche pourrait être également utilisée sur les sons de climatisation automobile, en évaluant la qualité de l'ambiance sonore au sein d'un habitacle de voiture en condition de roulage. Ainsi le son de climatisation serait perçu parmi d'autres sources sonores (bruits de roulement, aérodynamique, de motorisation), et son étude pourrait apporter de nouveaux éléments importants pour la conception de systèmes de climatisation adaptés aux nouvelles technologies automobiles.

Remerciements

CEVAS est un projet FUI AAP 14 dans le cadre des pôles de compétitivité I-TRANS et PEGASE. Les partenaires du projet sont VALEO, le CETIM, l'Université de Technologie de Compiègne, ESI GROUP et GENESIS. Le travail de GENESIS décrit ici a été financé par la FEDER, BPI France, et la Communauté du Pays d'Aix-en-Provence.

Références

- [1] S. Bennouna, B. Ouedraogo, S. Moreau, J. M. Ville, and O. Chériaux, Aeroacoustic Measurement of Automotive HVAC In-Duct Elements, *Proceedings of FAN 2015*, Lyon, France, 2015.
- [2] M. Legros, J. M. Ville, S. Moreau, and X. Carniel, Acoustic Synthesis of an Automotive HVAC, *Proceedings of FAN 2015*, Lyon, France, 2015.
- [3] A. Minard, A. Vidal, C. Lambourg, and P. Boussard, Sound Synthesis of Fan Noise and Modeling of its Perception in Car Passenger Compartment, *Proceedings of FAN 2015*, Lyon, France, 2015.
- [4] N. W. M. Ko, W. F. Ho, & W. K. Un, Responses to air-conditioning system noise, *Journal of Sound and Vibration*, **57**(4), 595-602, 1978.
- [5] S. K. Tang, Performance of noise indices in air-conditioned landscaped office buildings, *Journal of the Acoustical Society of America*, **102**(3), 1657-1663, 1997.
- [6] S. K. Tang & M. Y. Wong, On noise indices for domestic air-conditioner noise, *Journal of Sound and Vibration*, **274**(1-2), 1-12, 2004.
- [7] U. Ayr, E. Cirillo, & F. Martellotta, An experimental study on noise indices in air conditioned offices, *Applied Acoustics*, **62**(6), 633-643, 2001.
- [8] P. Susini, S. McAdams, S. Winsberg, I. Perry, S. Vieillard & X. Rodet, Characterizing the sound quality of air-conditioning noise, *Applied Acoustics*, **65**(8), 763-790, 2004.
- [9] J. Y. Jeon, J. You, & H. Y. Chang, Varying the spectral envelope of air-conditioning sounds to enhance indoor acoustic comfort, *Building and Environment*, **46**, 739-746, 2011.
- [10] A. Minard, Perception et confort acoustiques des systèmes de traitements d'air, Université de La Rochelle, Thèse de doctorat, 2013.
- [11] M. S. Khan & C. Hogstrom, Determination of sound quality of HVAC systems on trains using multivariate analysis, *Noise Control Engineering*, **49**(6), 276-283, 2001.
- [12] M. S. Kahn, Effects of masking sound on train passenger aboard activities and on other interior annoying noises, *Acta Acustica united with Acustica*, **89**(4), 711-717, 2003.
- [13] M. Mzali, Perception de l'ambiance sonore et évaluation du confort acoustique dans les trains, University Paris VI, Thèse de doctorat, 2002.
- [14] M. Menager & D. Rochepeau, Etude de la Qualité Sonore des appareils de chauffage et de climatisation automobile, INSA pour Valeo, 2004.
- [15] J. Marteau & M. Besombes, Jury d'écoute sur bruits de HVAC, Rapport de la tâche 2.7.4 du projet REVA-CESAM "Extraction de critères psychoacoustiques", 2009.
- [16] W. Aures, A model for calculating the sensory euphony of various sounds, *Acustica*, **59**, pp. 130-141, 1985.
- [17] L. N. Solomon, Semantic approach to the perception of complex sounds, *Journal of The Acoustical Society of America*, **30**(5), 421-425, 1958.
- [18] V. Nosulenko, E. Parizet, & E. Samoylenko, La méthode d'analyse des verbalisations libres : une application à la caractérisation des bruits de véhicules, *Informations sur les Sciences Sociales*, **37**(4), 563-611, 1998.
- [19] P. Legendre & L. Legendre, *Numerical ecology*, 3^e ed., Elsevier, 2012.
- [20] ISO 532:1975 (R2012), Acoustics -- Method for calculating loudness level, 1975.
- [21] ANSI S3.4-2007, American National Standard Procedure for the Computation of Loudness of Steady Sounds, 2007.
- [22] ISO 1996-2:2007, Acoustics - Description, measurement and assessment of environmental noise - Part 2: Determination of environmental noise levels, 1987.
- [23] DIN 45681:2005-03, Acoustics – Detection of tonal components of noise and determination of tone adjustment for the assessment of noise immisions, 2005.
- [24] D. C. Howell, *Statistical method for psychology*, Wadsworth Publishing, 2007.
- [25] E. Zwicker & H. Fastl, *Psychoacoustics: Facts and Models*, Springer, 1990.