

10ème Congrès Français d'Acoustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

Caractérisation des variations de timbre du bruit moteur dans l'habitacle d'une automobile par application d'un modèle auditif

Jean-François Sciabica^{1,2}, Marie-Céline Bezat¹, Vincent Roussarie¹, Richard Kronland-Martinet², Sølvi Ystad²

¹PSA Peugeot-Citroën, 2 route de Gisy, 78943 Vélizy-Villacoublay, France
{jean-francois.sciabica, marieceline.bezat, vincent.roussarie}@mpsa.com

²LMA, Centre National de la Recherche Scientifique, 31 chemin Joseph-Aiguier, 13402 Marseille cedex 20
{kronland, ystad}@lma.cnrs-mrs.fr

La perception du bruit à l'intérieur d'un habitacle automobile résulte de l'équilibre entre ses trois sources principales : le bruit moteur, le bruit de roulement et le bruit aérodynamique. Afin de clarifier l'impact des composantes harmoniques du bruit moteur sur la perception du bruit habitacle et de proposer une approche globale des phénomènes de masquage entre ces différentes sources de bruit, nous appliquons au bruit perçu dans l'habitacle les différents étages d'un modèle auditif périphérique simplifié. Les images auditives obtenues en sortie de ce modèle montrent que les harmoniques moteurs qui ne sont pas masquées par les bruits aérodynamiques et de roulement sont regroupées perceptivement par l'oreille en deux ou trois groupes d'harmoniques. La répartition d'énergie entre ces différents groupes d'harmoniques expliquerait les variations de timbres perçues au cours d'une montée de régime. Dans l'expérience suivante, nous chercherons à relier les variations de timbres perçues au cours d'une montée de régime au niveau d'énergie de ces groupes d'harmoniques en sortie du modèle auditif

1 Introduction

A l'heure des nouvelles chaînes de traction, l'étude du bruit du moteur demeure d'actualité dans les prestations acoustiques à l'intérieur des habitacles automobiles. Le bruit moteur perçu dans l'habitacle, désormais considéré comme un « objet sonore » à mettre en valeur, intéresse beaucoup les concepteurs sonores. Sa forte implication dans l'ambiance sonore à l'intérieur de l'habitacle concourt à la qualité globale perçue du véhicule ainsi qu'à son identité. Il est également un « miroir sonore » de la dynamique du véhicule et contribue à la puissance du véhicule ressentie par le conducteur sur les phases d'accélération. Nos recherches actuelles prennent en effet de plus en plus en compte le couple acoustique/dynamique dans la caractérisation du timbre du bruit moteur en mettant l'accent sur l'évolution temporelle du timbre du bruit moteur, « retour sonore » de l'information dynamique. Le bruit moteur perçu à l'intérieur d'un habitacle ne peut cependant s'étudier que par la prise en compte du phénomène sonore global à l'intérieur de l'habitacle, c'est à dire l'interaction du bruit moteur avec les autres sources sonores que sont le bruit aérodynamique et le bruit de roulement. Des phénomènes de masquages de deux natures (le masquage des harmoniques moteur par le bruit aérodynamique et de roulement et le masquage des harmoniques moteur entre elles) réduisent le nombre d'harmoniques moteur réellement entendues et pertinentes dans la caractérisation du timbre.

Dans la littérature, les recherches en matière de qualité sonore sur le bruit à l'intérieur de l'habitacle ont souvent concerné les aspects perceptifs et les évocations associées au bruit moteur. Bisping [1] introduit un schéma perceptif

à deux axes permettant de juger la qualité sonore des véhicules avec un premier axe « Plaisant-Déplaisant » et un second axe « Puissant-Faible » tandis que Kubo [2] propose une carte sonore des véhicules à deux axes « Non sportif - Sportif » et « Simple - Luxueux ». Dans les deux cas, une méthode de sémantique différentielle ainsi qu'une analyse factorielle sont utilisées pour déterminer les axes principaux de la représentation. Les techniques de sémantique différentielle ont permis d'explorer très largement les évocations et la sémiotique du bruit moteur. Chouard [3] recueille une liste de 232 adjectifs pour illustrer le bruit moteur perçu dans l'habitacle. Plusieurs études ont également cherché à montrer le lien entre les attributs perceptifs du bruit moteur et les paramètres du signal. Hansen [4] analyse l'impact des composantes tonales sur la qualité sonore à l'intérieur des véhicules (les phénomènes de sifflement) en identifiant dans le signal les harmoniques proéminentes. Bezat [5] propose également une méthode d'analyse-synthèse originale pour déterminer le lien entre la qualité de la fermeture d'une portière et les paramètres du signal. Les attributs perceptifs de ces sons sont d'abord analysés par un panel sensoriel. Ce dernier définit des descripteurs pour qualifier les sons de fermetures de portières et évalue ensuite ces sons sur chaque descripteur afin de définir leur profil sensoriel. Combinée à une analyse des paramètres du signal par une représentation temps/ERB, Bezat propose alors un modèle de synthèse contrôlée par des critères perceptifs.

Dans ce papier, nous rappelons les connaissances clés sur la perception du bruit moteur ainsi que les méthodes traditionnelles d'analyse de ce type de signal. Puis, nous présentons l'analyse perceptive obtenue par un panel sensoriel et par application d'un modèle auditif destinée à mettre en évidence les paramètres signal pertinents du

point de vue de la perception. Nos travaux portent à la fois sur des signaux de bruit habitacle ainsi que sur des imitations vocales de bruit moteur et nous présentons ici nos premiers résultats sur la caractérisation des variations de timbres.

2 Rappels sur le bruit perçu dans l'habitacle

2.1 Sources du bruit perçu dans l'habitacle

Le bruit perçu à l'intérieur d'un habitacle est constitué de l'équilibre entre 3 sources physiques : le bruit moteur perçu à l'intérieur de l'habitacle, le bruit aérodynamique et le bruit de roulement.

Le bruit moteur perçu dans l'habitacle (que nous appellerons simplement par la suite bruit moteur) est le bruit du moteur filtré par les transferts entre le Groupe MotoPropulseur et l'habitacle ainsi que par les résonances de l'habitacle. Il s'agit d'un signal riche en harmoniques dont la fréquence fondamentale est imposée par le régime moteur (RPM). Dans le cas d'un moteur à 4 cylindres, l'explosion successive des 4 pistons pendant un cycle moteur (soit deux tours de vilebrequin) produit deux phénomènes périodiques. Le premier correspond à la période entre l'explosion de deux pistons différents et génère les harmoniques dites « paires » dont la fréquence fondamentale est reliée au régime moteur par :

$$f_{0\text{ HARMONIQUES..PAIRES}} = \frac{RPM}{30} \quad (1)$$

L'explosion successive des pistons n'étant pas idéalement périodique, un second phénomène associé à la période entre deux explosions du même piston vient s'ajouter au précédent et génère des harmoniques dites « demi-harmoniques » dont la fréquence fondamentale est reliée au régime moteur par :

$$f_{0\text{ DEMI-HARMONIQUES}} = \frac{RPM}{120} \quad (2)$$

Les harmoniques paires ont donc un fondamental quatre fois plus grand que celui des demi-harmoniques et elles sont également plus énergétiques que les demi-harmoniques si bien que la fréquence fondamentale des harmoniques paires s'impose comme fréquence fondamentale du bruit moteur.

Le bruit de roulement et le bruit aérodynamique sont deux bruits larges bandes. Le bruit de roulement est plus présent à basse vitesse et son niveau sonore dépend grandement de la qualité du revêtement de la chaussée et de la texture du pneu. Le bruit aérodynamique augmente en niveau avec la vitesse et son impact perceptif est plus marqué dans les hautes fréquences. Nous considérons que la somme de ces deux bruits correspond à la partie bruitée de notre signal. Les phénomènes de masquage jouent alors un rôle important dans l'équilibre de ces 3 sources sonores, notamment entre la composante bruitée et la composante harmoniques du bruit moteur. Le bruit aérodynamique masque en grande partie les partiels élevés du bruit moteur alors que les premiers partiels du bruit moteur peuvent être masqués par le bruit de roulement. Le masquage entre harmoniques est également à prendre en compte dans la mesure où les harmoniques paires sont plus énergétiques

que les demi-harmoniques et que l'écart entre les demi-harmoniques varie entre 8 et 60 Hz sur une montée de régime de 800 à 6 000 trs/minutes.

2.2 Analyse signal du bruit perçu dans l'habitacle

Afin d'étudier l'évolution fréquentielle d'un signal issu d'une voiture en accélération, nous réalisons une analyse temps/fréquence (Transformée de Fourier à court terme avec une fenêtre de 0.3 secondes et un pas de calcul de 10 ms). Ce signal a été enregistré dans une voiture en phase d'accélération avec la pédale d'accélération enfoncée à 100% par le biais d'une tête acoustique placée en position passager. Le spectrogramme de la figure 1 montre que beaucoup d'harmoniques sont présentes dans le signal. Nous pouvons remarquer que de nombreuses demi-harmoniques contribuent au signal (signal (H3.5, H5.5 H7)). Nous pouvons également constater que certaines harmoniques émergent tandis que d'autres sont masquées par la composante bruitée au cours de l'accélération. En effet, l'ordre des harmoniques mises en résonance par l'habitacle varie avec le régime moteur. Cependant, ce type de représentation est insuffisant pour décrire les variations de timbre du bruit habitacle.

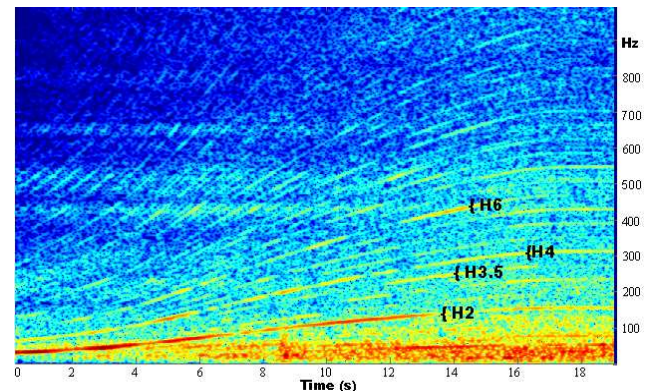


Figure 1 : représentation temps/fréquence du bruit habitacle d'un véhicule accélérant en 3ème pleine charge

2.3 Propriétés perceptives du bruit habitacle

Les grandes dimensions perceptives du bruit habitacle sont bien décrites par Roussarie dans [6]. La plus grande partie de l'information perceptive est portée par le niveau sonore du bruit moteur. Néanmoins, il est possible de dégager des attributs perceptifs caractéristiques du bruit à l'intérieur de l'habitacle.

Le bourdonnement correspond à la résonance dans l'habitacle d'une harmonique basse-fréquence du bruit moteur. Selon le régime moteur et la situation de vie, le bourdonnement peut-être apprécié comme une contribution à la puissance du véhicule (Le « ronron » du moteur sur les posé de pied sur la pédale d'accélération) ou comme une gêne si le bourdonnement est trop présent alors que le véhicule roule à une vitesse stabilisée. L'autre attribut perceptif du bruit habitacle est la rugosité du bruit moteur. Elle correspond aux battements rapides entre les demi-harmoniques (par exemple, à 3000 trs/min, la fréquence de battements est de 25 Hz) et intervient lors que ces demi-harmoniques émergent de la partie bruitée et ne sont pas masquées par les harmoniques paires. La rugosité moteur est donc associée à un fort enrichissement

harmonique du bruit moteur au cours de la montée de régime et contribue aux évocations de sportivité et de puissance.

Enfin, l'évolution temporelle de ces paramètres perceptifs contribue également aux différentes évocations du bruit moteur. Une sonorité continue avec une évolution lente ne sera pas appréciée de la même manière que des variations non continues et brusques. En effet, les changements de timbres (aussi bien par la variation des paramètres perceptifs que par la variation du spectre du bruit moteur) sont une information perceptive que le conducteur peut associer à un regain ou à une baisse de dynamique du véhicule

3 Analyse perceptive du bruit moteur perçu dans l'habitacle

3.1 Analyse par modèle auditif

Nous appliquons un modèle auditif pour comprendre comment l'oreille humaine réagit au bruit à l'intérieur d'un habitacle et pour avoir une approche globale des phénomènes de masquage mis en jeu entre le bruit moteur et le bruit aérodynamique et le bruit de roulement. Le modèle auditif considéré [7] simule les différents étages du système auditif périphérique. Le transfert du son à travers l'oreille externe et moyenne jusqu'à la cochlée est modélisé par un filtre FIR. La cochlée est décrite comme un banc de filtres dont la bande passante croît avec l'augmentation de la fréquence centrale des filtres. Dans le modèle considéré, les filtres auditifs retenus sont des filtres gammatone du 4ème ordre [8] linéairement espacés sur l'échelle ERB. Nous choisissons une densité importante de filtres auditifs pour représenter la cochlée afin d'améliorer la visualisation en sortie du modèle auditif. Les cellules cillées sont ensuite modélisées par un rectifieur demi-onde suivi d'un filtre passe bas détecteur d'enveloppes. Une loi d'exposant est ajoutée pour simuler la compression.

3.2 Premiers résultats perceptifs

La représentation issue du modèle auditif confirme le rôle important joué par des groupes d'harmoniques centrées autour de H2, H4 et H6 sur la perception du bruit moteur. Nous avons également la confirmation que les ordres élevés n'ont pas un fort impact sur la perception global du bruit habitacle puisqu'ils sont masqués par le bruit aérodynamique.

De plus, nous pouvons identifier des groupements d'harmoniques qui ne sont pas séparés par le système auditif. Par exemple sur la figure 2, nous pouvons observer que les harmoniques 3.5 et 4 sont regroupées tout comme les harmoniques 6, 7 et 7.5. Ces groupes d'harmoniques évoluent au cours de la montée de régime et contribuent à faire évoluer le timbre du bruit moteur. Nous voyons que l'impact perceptif de l'harmonique H2 décroît au cours du temps tandis que les deux groupes perceptifs centrés sur H4 et H6 deviennent proéminents. L'écoute attentive de ce son confirme un changement de timbres assez subtil tout au long du son. Ce changement de timbre reste néanmoins assez subtil à l'oreille car ce dernier s'étend progressivement tout au long du son.

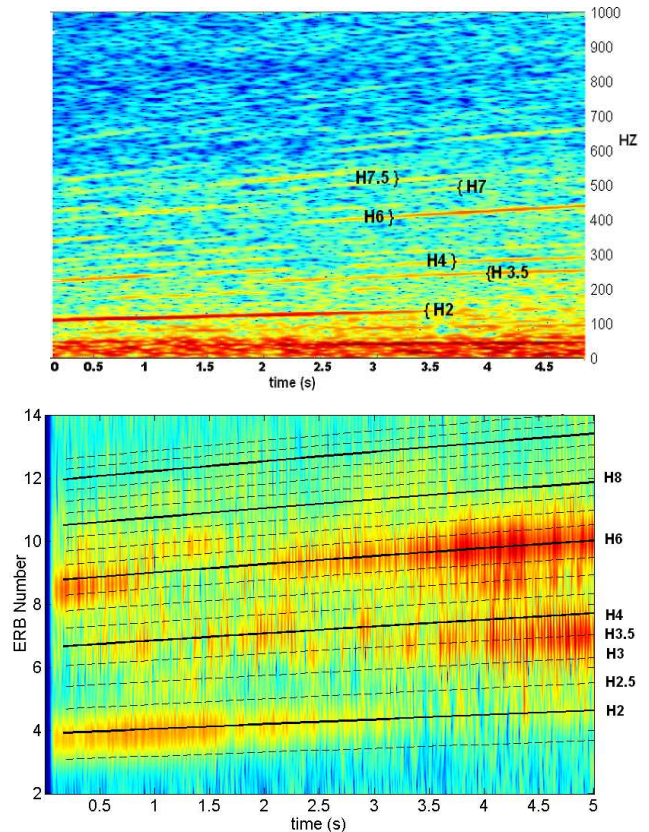


Figure 2 : Représentation temps/fréquence (haut) et représentation auditive (bas) sur le même bruit habitacle d'une automobile en phase d'accélération. Le suivi des harmoniques moteur est mentionné sur la représentation auditive (harmoniques paires en traits pleins et demi-harmoniques en pointillé)

Contrairement à une représentation temps/fréquence, la représentation auditive nous renseigne sur l'impact perceptif des harmoniques que laisse entrapercevoir le spectrogramme. Les regroupements d'harmoniques par le système auditif apparaissent plus clairement sur le modèle auditif et la distribution relative de leur énergie peut nous renseigner à l'avenir sur le timbre du bruit moteur.

3.3 Cas de la rugosité moteur

La représentation auditive de la figure 2 laisse apparaître à partir de $t = 3.5$ secondes des battements pour le groupe d'harmoniques H3, H3.5 et H4. L'écoute attentive du son confirme que la rugosité moteur devient plus présente sur la fin du son. Les représentations auditives peuvent donc être utilisées pour mettre en évidence la présence ou non de rugosité moteur sur une montée de régime, information que ne peut pas fournir un spectrogramme classique. En effet, la distribution linéaire des filtres gammatone sur l'échelle ERB porte l'information sur les harmoniques qui sont résolues ou non par le système auditif et contribue à l'apparition des battements sur la représentation auditive lorsque deux demi-harmoniques moteurs voisines interagissent.

Si nous appliquons le modèle auditif à deux sons jugés rugueux par le panel, nous pourrions visualiser les phénomènes de battements associés. C'est le cas de la figure 3 où nous travaillons volontairement sur des sons de 2 secondes pour faciliter la visualisation. Ces sons sont issus des stimuli proposés au panel sensoriel.

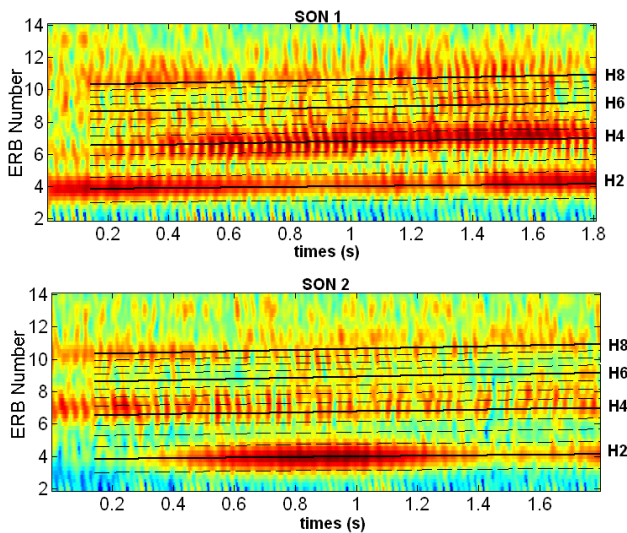


Figure 3: Représentations auditives sur deux sons jugés rugueux par le panel sensoriel.

Sur la figure 3, les battements sont visibles dans le cas du son 1 pour les harmoniques moteur de H6 à H8, surtout entre $t = 1.2$ et $t = 1.8$ et dans le cas du son 2 pour les harmoniques de 3.5 à 5 sur toute la durée du signal. Sur la représentation auditive du son N°2, la profondeur des battements est plus importante que sur le son N°1, ce qui est vérifié par le panel sensoriel qui avait classé le son 2 plus rugueux que le son 1.

3.4 Imitation vocale du bruit moteur

Afin d'étudier les changements de timbre du bruit moteur, nous nous sommes intéressés à des imitations vocales. La similitude entre la voix et le bruit moteur semble une piste intéressante pour étudier les paramètres signal mis en jeu dans lors d'une transition de timbre de bruit moteur. L'imitation vocale a déjà été utilisée comme méthode de « cartoonification » pour exagérer certains attributs perceptifs du son imité tout en atténuant d'autres et est notamment utilisée par Dessein [8] dans des tâches de classification libre de sons de l'environnement. A cet effet, nous avons réalisés des enregistrements de voix de personnes n'ayant aucun lien avec le monde de l'automobile. Tous sont des hommes et la fréquence fondamentale de leur voix couvre ainsi une plage de 80 à 200 Hz soit une plage de régime moteur équivalente de 2400 à 6000 trs/min. La consigne donnée avant l'enregistrement est d'imiter la montée de régime d'une voiture en introduisant une variation de timbre la plus continue possible. Deux timbres automobiles types étaient spécifiés, Timbre 1 (T1) et Timbre2 (T2). Nous leur demandons en même temps d'imaginer qu'ils sont en train d'accélérer en pleine charge au volant d'un véhicule. Nous appliquons ensuite une analyse additive au son enregistré pour extraire sa composante harmonique. Nous réalisons nos analyses sur cette composante harmonique.

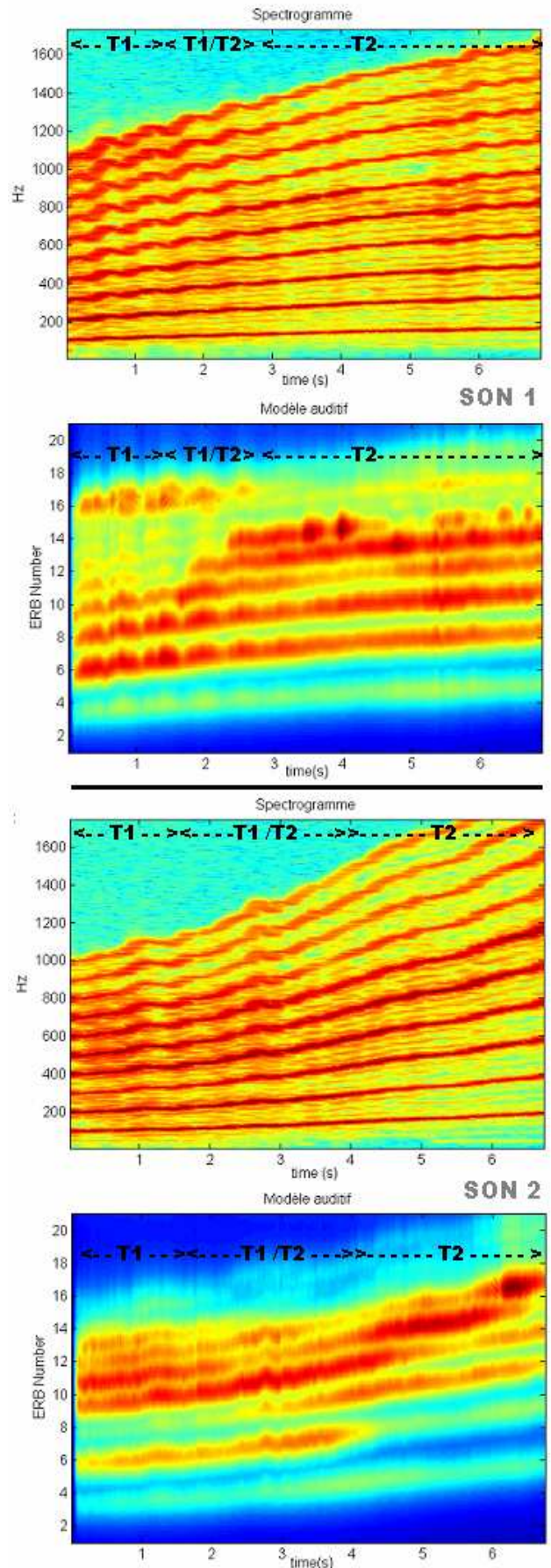


Figure 4 : Représentation temps/fréquence (haut) et représentation auditive (bas) de deux imitations vocales de bruit moteur, les deux sons débutant sur le Timbre 1 et se terminant sur le Timbre 2.

L'étude des spectrogrammes de ces imitations vocales représentés sur la figure 4 montre que les similitudes entre la voix et le bruit moteur sont assez nombreuses. L'évolution continue de la fréquence fondamentale est caractéristique de la montée de régime du bruit moteur. Les partiels de la voix « correspondent » aux harmoniques paires du bruit moteur, leur nombre étant bien plus élevé que dans le cas du bruit moteur. Par ailleurs, une voix roucouillante génère des harmoniques intermédiaires dont le nombre est fonction de la fréquence fondamentale de la voix et la fréquence des battements associés au roucoulement.

Nous appliquons le modèle auditif aux enregistrements de voix et traçons ses sorties sur la figure 4 ainsi que les spectrogrammes associés. Les deux imitations vocales représentées montrent deux stratégies différentes pour passer du Timbre 1 au Timbre 2. Dans les deux cas, la transition entre les deux timbres est beaucoup plus visible sur la représentation auditive que sur le spectrogramme.

Deux stratégies semblent donc au minimum possible pour reproduire par imitation la transition entre deux timbres du bruit moteur. Sur la figure 4, dans le cas du son 1, les partiels 5 et 6 entrent progressivement pour obtenir le Timbre 2. Dans le cas du son 2, le partiel 2 disparaît alors que le partiel 3 fait son entrée tandis que les harmoniques 4, 5 et 6 semblent rester constante et ne pas intervenir dans la perception de la transition. Il est à noter que dans les deux cas, la fondamentale du son n'est pas perceptivement pertinente. La stratégie mise en œuvre dans le son 1 pour changer de timbre (diminution de l'impact perceptif de l'harmonique 2 au profit d'un impact perceptif plus fort pour le partiel 3) semble être plus applicable au bruit moteur que la stratégie du son 2 où les partiels élevés (partiels 5 et 6) entrent progressivement car les harmoniques d'ordres élevés du bruit moteur (H10, H12) n'émergent que très rarement dans l'habitacle puisque masquées par le bruit aérodynamique.

4 Conclusions et perspectives

Les représentations temps/fréquence ne sont pas suffisantes pour décrire les évolutions temporelles du timbre du bruit moteur notamment à cause des multiples phénomènes de masquage mis en jeu. Les représentations issues des modèles auditifs sont une piste envisageable pour mettre en évidence l'impact perceptif des paramètres du signal. Associées à une analyse sensorielle, ces représentations auditives permettent d'identifier les paramètres signal impliqués dans l'évolution temporelle des attributs perceptifs du bruit moteur comme la rugosité moteur ou la transition entre deux timbres du bruit moteur. Les représentations auditives nous ont déjà permis de comprendre l'évolution des paramètres du signal au cours de la transition entre deux timbres donnés sur des sons imitant le bruit moteur. La prochaine étape est la modélisation de ce phénomène sur des enregistrements de bruit moteur dans l'habitacle ainsi que la quantification des attributs perceptifs du bruit moteur à partir des représentations auditives.

Références

- [1] Bisping R., "Car Interior Sound Quality: Experimental Analysis by Synthesis," *Acta Acustica united with Acustica* 83, 813-818 (1997).
- [2] Chouard N., Hempel T., "A semantic differential design especially developed for the evaluation of interior car sounds," *J. Acoust. Soc. Am.* Volume 105, Issue 2, (1999).
- [3] Kubo N., Mellert V., Weber R., Meschke J., "Categorization of engine sound," *Proceedings of the Internoise*, Prague, (2004).
- [4] Hansen H., Weber R., Letens U., "Quantifying tonal phenomena in interior car sound," *Proceedings of the forum acusticum*, Budapest, (2005).
- [5] M.C. Bezat, "Perception des bruits d'impact: Application au bruit de fermeture de porte automobile", *Thèse de Doctorat en acoustique, Université de Provence*, (2007).
- [6] Roussarie V., Richard F., Bezat M.C., "Perceptive qualification of engine sound character; validation of auditory attributes using analysis-synthesis method", *CFA/DAGA' 04 proceedings*, (2004)
- [7] Pressnitzer D, Gnansia D. "Real time auditory model", *Proceedings of International Computer Music Conference*, Barcelona, (2005)
- [8] Dessein A, Lemaitre G., "Free classification of vocal imitations of everyday sounds", *Proceedings of the SMC 2009, Porto*, (2009)