

# Interfaces Homme Machine dans l'Automobile : Impact Technologique du Design Sonore

**Sabine Langlois,  
Bénédicte Le Nindre,  
Claire Peteul**  
Renault,  
Direction de la Recherche,  
1 Avenue du Golf,  
78288 Guyancourt,  
France,  
sabine.langlois@renault.com,  
benedicte.le-nindre@renault.com,  
claire.peteul@renault.com

**Nicolas Misdariis**  
Ircam,  
Équipe Perception et Design Sonores,  
1 place Igor Stravinsky,  
75004 Paris,  
France,  
nicolas.misdariis@ircam.fr

*La radio mise à part, l'ambiance sonore à l'intérieur d'une voiture est composée des bruits mécaniques dus au roulage et des bruits électroniques ajoutés pour assister le conducteur. Nous nous intéressons ici au son de clignotant.*

*Nous avons mené un test d'écoute sur les bruits de clignotant des voitures actuelles et avons observé que tous les clients ne partagent pas les mêmes attentes. Si tous s'accordent sur les caractéristiques principales que le son doit posséder pour remplir sa fonction (le rythme), certains clients apprécient la qualité sonore des clignotants actuels (leur timbre), alors que d'autres clients aimeraient entendre des sons plus créatifs.*

*Notre ligne directrice a été alors de créer des sons qui soient cohérents avec différents environnements automobiles (matériaux...). Modalys, logiciel de synthèse sonore développé par l'Ircam, correspondait à nos besoins. Nous avons donc demandé à l'équipe Perception et Design Sonores de l'Ircam de proposer une méthodologie de design sonore et de créer des sons pour cette application. L'étape suivante a consisté à installer les sons sur les véhicules.*

*Sur les véhicules Renault actuels, le son du clignotant est joué par le tableau de bord. Il s'agit d'un son très simple (deux fréquences) et facile à produire par la technologie utilisée (microcontrôleur et buzzer).*

*Nous avons choisi des sons parmi ceux créés par l'Ircam. Pour transposer nos fichiers wave dans la technologie véhicule, les ingénieurs électroniciens et les fournisseurs ont dû mieux comprendre le fonctionnement des composants électroniques, ce qui les a amenés à découvrir des capacités inutilisées de leurs systèmes. Ainsi, nos sons cibles ont conduit à une utilisation plus complète de la technologie : les sons transposés ont une meilleure qualité sonore sans impact économique.*

*Le clignotant n'est pas la seule interface homme machine présente dans l'habitacle ; d'autres sons y sont joués répondant à d'autres fonctionnalités. La suite de nos travaux portera, entre autres, sur la cohérence entre ceux sons.*

**L**a radio mise à part, l'ambiance sonore à l'intérieur d'une voiture est composée des bruits mécaniques dus au roulage et des bruits électroniques ajoutés pour assister le conducteur. Nous nous intéressons ici au son de clignotant. Alors que le clignotant était autrefois produit par un relais mécanique, il est désormais joué par l'électronique. Ce saut technologique nous autorise à modifier les caractéristiques sonores du clignotant et nous offre ainsi la possibilité de créer des sons inouis, au sens étymologique du terme.

Nous avons tout d'abord mené un test d'écoute pour comprendre quels sons de clignotant les clients apprécient. Nous avons ainsi rassemblé des idées pour créer de nouveaux sons. Ce travail de création a été fait avec l'Ircam sans tenir compte de la technologie utilisée dans nos véhicules. L'étape suivante consistait alors pour nous, chercheurs en psychoacoustique, à comprendre comment transposer les sons créés dans la technologie véhicule. Cette expérience a eu un effet inattendu : elle a permis aux ingénieurs électroniciens et à leurs fournisseurs de découvrir sur les composants électroniques des possibilités inutilisées.

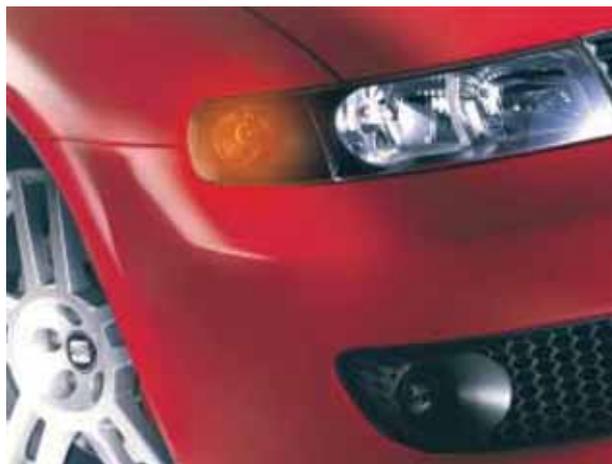
## Etude de qualité sonore

Notre premier objectif est de comprendre quels sons de clignotant les clients aiment entendre et quelles sont les raisons de ce jugement. Nous choisissons d'étudier les clignotants des véhicules actuels. Une première écoute nous fait prendre conscience de la variété de ces sons et de la spécificité des clignotants des voitures asiatiques, qui ont une signature sonore très typée. Nous décidons alors de nous concentrer sur les clignotants des véhicules européens et choisissons douze véhicules représentatifs du marché.

Les sons sont enregistrés à l'intérieur de l'habitacle, moteur coupé, dans une salle anéchoïque, à l'aide du mannequin Head Acoustics HMS III. Ils sont restitués dans une salle calme avec un amplificateur Head Acoustics et un casque électrostatique HAll (Sennheiser). Ce système permet de jouer les sons à leur niveau réel.

Quarante-trois personnes participent au test d'écoute. Ce test comporte trois étapes :

1. Catégorisation libre : on demande aux sujets de regrouper les sons qui partagent les mêmes caractéristiques et de définir



le représentant de chaque classe ainsi formée. Les sujets peuvent faire autant de classes qu'ils le souhaitent, et mettre dans chaque classe autant de sons qu'ils le veulent.

2. Verbalisation : on demande aux sujets de décrire librement chaque classe.

3. Projection sur un axe de « qualité sonore » : sur la fiche du test, nous avons dessiné un axe non gradué qui possède deux bornes, 0 et 10 ; on demande aux sujets de placer les représentants des classes le long de cet axe.

Au cours du test, les sujets peuvent écouter les sons aussi souvent et dans l'ordre qu'ils souhaitent.

Nous utilisons souvent ce type de test lorsqu'il s'agit d'aborder une nouvelle thématique [1]. La théorie qui sous-tend l'étape de catégorisation peut être trouvée dans [3] ou [4].

## Résultats

Pour analyser la catégorisation libre, nous utilisons un algorithme [4] qui détermine, en examinant les sons paire par paire, quels sons sont le plus souvent regroupés dans la même classe. Le résultat peut être représenté sous la forme d'un arbre, dont les feuilles sont les sons et les nœuds les catégories consensuelles. L'algorithme indique la qualité de l'arbre, c'est-à-dire le degré d'accord entre les sujets (il est ici de 15 %, résultat inférieur à 20 %, qui est la valeur limite que nous acceptons).

Nous obtenons ici six catégories ; chacune comporte entre un et trois sons, comme on peut le voir sur la Figure 1. Il est important de noter que nous rejetons le son 8 de la classe 6 car sa sonorité est trop différente, à l'oreille, de celle des sons 7 et 10.

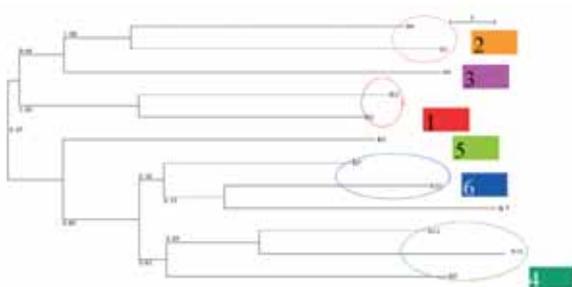


Fig. 1 : arbre obtenu à partir de la catégorisation libre

Nous réalisons une analyse sémantique des verbatims recueillis afin de définir à quels critères subjectifs les gens ont recours pour décrire chaque classe. Les verbatims relèvent du domaine de la description (régularité, vitesse, niveau, différence de hauteur entre tic et tac, grave ou aigu, attaque, amortissement, timbre), de l'interprétation de la ressemblance entre le son du clignotant et celui de sources sonores (matériaux, animaux, horloge, montre, univers mécanique versus électronique) et du jugement (ancien versus moderne, agréable).

Les sons de la première classe, la plus consensuelle, sont décrits comme « réguliers, avec une grande différence de hauteur entre le tic et le tac, électroniques » ; ceux de la deuxième classe comme « irréguliers et lents » ; celui de la troisième comme « irrégulier, rapide, grave, avec peu de niveau, sans différence entre le tic et le tac » ; ceux de la quatrième comme « réguliers, avec une attaque forte, ressemblant à une horloge, métalliques » ; celui de la cinquième « avec un fort niveau et une grande différence de hauteur et d'amortissement entre le tic et le tac, agressif » ; et ceux de la sixième comme « graves, avec une grande différence d'amortissement entre le tic et le tac, ressemblant à une horloge, vieux ».

Pour dépeupler les résultats de la projection le long de l'axe de « qualité sonore », nous utilisons un logiciel d'analyse multidimensionnelle [5] qui optimise les distances entre les sons de façon à obtenir la représentation la plus consensuelle, en un ou plusieurs axes. Avec un seul axe, l'erreur est très importante (27 %), résultat médiocre qui indique que tous les clients ne partagent pas la même attente. La représentation en deux axes est bien meilleure (l'erreur n'est plus que de 17 %).

Si nous examinons les axes individuels des sujets, nous observons que personne n'utilise la pleine échelle : la meilleure note culmine à 6/10, ce qui nous laisse penser que les clients ne sont pas très satisfaits des sons de clignotants actuels.

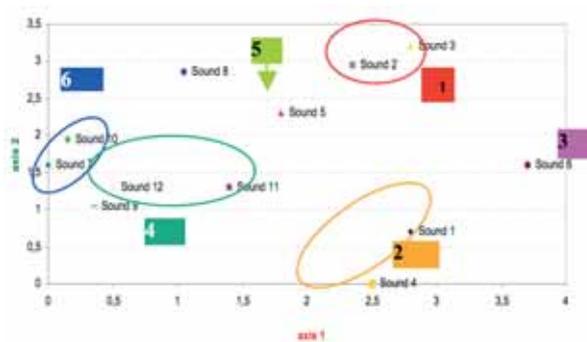


Fig. 2: Représentation en deux axes de la projection sur l'axe de « qualité sonore »

Il est intéressant de noter que sur la représentation en deux axes, le logiciel place en zéro le son le plus apprécié. La Figure 2 montre que cette représentation de la préférence en deux axes nous permet de retrouver les catégories, ce qui n'était pas possible en un axe. Ce résultat cautionne la pertinence de la représentation en deux axes.

Afin de comprendre pourquoi les gens apprécient ou rejettent les sons, nous pouvons donc nous appuyer sur les verbatims. Nous obtenons alors les résultats suivants.

Les clients appartenant à la première population apprécient les sons réguliers qui présentent un niveau fort, un rythme binaire (durée entre tic et tac égale à durée entre tac et tic),

et une grande différence de hauteur entre le tic et le tac. Ils apprécient également les sons de clignotant qui font référence à l'univers mécanique des horloges et des montres, c'est-à-dire les clignotants qui sonnent comme les anciens relais mécaniques.

Les clients de la seconde population préfèrent quant à eux les sons lents et graves, possédant un niveau et un amortissement faibles.

## Conclusion

Alors que, pour la première population, la priorité doit être donnée à la fonction du son (« indiquer que le clignotant est en marche »), la seconde population apprécierait davantage que la sonorité du clignotant participe au confort global du véhicule ; elle attend des constructeurs qu'ils explorent les possibilités offertes par l'électronique pour proposer de nouvelles sonorités.

Cependant, tous s'accordent à dire que les sons actuels ne sont pas très agréables.

Le test a ainsi permis de mettre en exergue le pouvoir évocateur des sons : certaines personnes rapprochent ces sons de sonorités de montres, mais aussi d'animaux et de matériaux. Ces éléments nous ouvrent de nouvelles perspectives d'investigation.

## Design sonore

Nous avons déjà l'idée que, dans le contexte de l'habitacle automobile, des interactions s'opèrent entre le son et les autres sens. Les rapprochements suggérés par les sujets pendant le test nous confirment qu'il s'agit bien d'une direction intéressante pour le design sonore des clignotants. Nous décidons donc de créer des sons de clignotant qui seraient cohérents avec l'ambiance à l'intérieur de l'habitacle, et en particulier avec les matériaux utilisés pour recouvrir les sièges, les panneaux de porte, la planche de bord..., l'objectif fixé étant que l'audition s'associe à la vision et au toucher. Nous souhaitons aussi créer des sons différents, destinés aux différents types de véhicules produits par Renault : véhicules familiaux ou sportifs, petites citadines ou véhicules haut de gamme, automobiles pour lesquelles une ambiance spécifique est définie.

## Méthode

Afin de créer des sons en relation directe avec la composition des matériaux (bois, métal, plastique, tissu...) et avec le toucher (claquement, frottement...), nous décidons de travailler avec l'équipe Perception et Design Sonores de l'Ircam en utilisant le logiciel de synthèse sonore Modalys, développé par l'Ircam depuis bientôt quinze ans. Il s'agit en effet d'un logiciel de synthèse sonore basé sur des modèles physiques, ce qui donne accès à une vaste bibliothèque de structures physiques élémentaires, soit mécaniques (corde, plaque...), soit acoustiques (tube ouvert, fermé...) et à une série d'interactions physiques (frappé, frotté, soufflé ou même collé...).

De plus, grâce à sa propriété de modularité, il offre la possibilité de combiner les divers modèles élémentaires décrits ci-dessus afin de créer une structure complexe. On peut ainsi recréer un instrument de musique, ou créer de toute pièce une structure chimérique beaucoup plus éloignée de la

réalité. Le son produit par Modalys est la réponse vibratoire d'un ou plusieurs points du modèle, comme si l'on plaçait un microphone de contact à la surface de la structure considérée (cf. [6]).

Afin de créer les sons de clignotant, l'équipe Perception et Design Sonores de l'Ircam a exploré différents types de structures, possédant diverses propriétés mécaniques (densité, module d'Young du matériau, géométrie des objets...), excitées de différentes façons, pour aboutir finalement à la création d'une trentaine de sons. Préalablement à ce processus de création, l'équipe a pris en compte les orientations données par l'étude de la qualité sonore et l'analyse objective qui en a découlé (non présentée ici), études qui ont mis en évidence les caractéristiques nécessaires au son de clignotant pour répondre à sa fonction d'information : la régularité (durée entre deux tics constante), le rythme binaire (durée entre tic et tac et entre tac et tic égale), la vitesse et le niveau global. Il est important de souligner également que la création sonore a été réalisée en tenant compte de la bande passante du buzzer (globalement 1-5 kHz). D'autre part, l'intervention de l'Ircam a permis d'aborder les directions de travail aujourd'hui inexplorées que les études perceptives ont mises à jour ; il s'agit en particulier du timbre, de la hauteur, de l'attaque et de l'amortissement, et du potentiel de différenciation entre le tic et le tac.

## Conclusion

Même si un certain nombre de paramètres ne peuvent être modifiés, un très large éventail de sons peut être créé afin d'assurer la cohérence entre le son du clignotant et l'ambiance souhaitée dans l'habitacle. L'approche ici adoptée, qui a consisté à ne pas tenir compte de la technologie utilisée pour jouer les sons dans les véhicules, nous a permis de créer des sonorités nouvelles.

## Impact technologique du design sonore

Une fois cette bibliothèque de trente sons « idéaux » constituée, nous souhaitons réaliser l'implémentation in situ des signaux sonores, et analyser les contraintes engendrées par cette étape d'intégration. Examinons le cas où le clignotant est joué par l'électronique du tableau de bord (notons, par ailleurs, que certains constructeurs utilisent déjà le système audio de l'autoradio pour restituer ces sons).

## Méthode

Nous choisissons trois sons parmi les trente créés initialement, de façon à disposer de sonorités très différentes :

- un son grave, et qui s'amortit lentement,
- un son aigu, et qui s'amortit rapidement,
- un son qui présente une attaque franche et un niveau global supérieur aux deux précédents.

Nous transmettons ces sons à plusieurs fournisseurs de tableau de bord, leur demandons de transposer les trois sons cibles dans leur technologie et cherchons à analyser l'importante variation des différences entre sons transposés et sons cibles. Notre objectif, à terme, est d'être capable de définir une méthodologie pour créer les sons électroniques des futurs véhicules.

## Résultats

Grâce aux échanges avec les fournisseurs, nous avons pu mieux comprendre comment chacune des technologies produit le son. Il convient de distinguer deux aspects : la génération du son à partir de la tension électrique, et l'émission du son. Lorsque le son est produit par l'électronique du tableau de bord, l'émetteur sonore peut être soit un buzzer, de type piézoélectrique ou magnétique, soit un haut-parleur. Alors que la réponse fréquentielle du buzzer présente des pics très marqués (sur la fréquence propre fondamentale et ses harmoniques), la réponse du haut-parleur est plus régulière, particulièrement dans les hautes fréquences, comme le montre la Figure 3. Les performances de l'émetteur sonore dépendent de la rigidité de sa fixation et du volume d'air disponible dans son voisinage immédiat. Notons que certaines recherches consistent à accroître l'efficacité des émetteurs sonores piézoélectriques (cf. [7]).

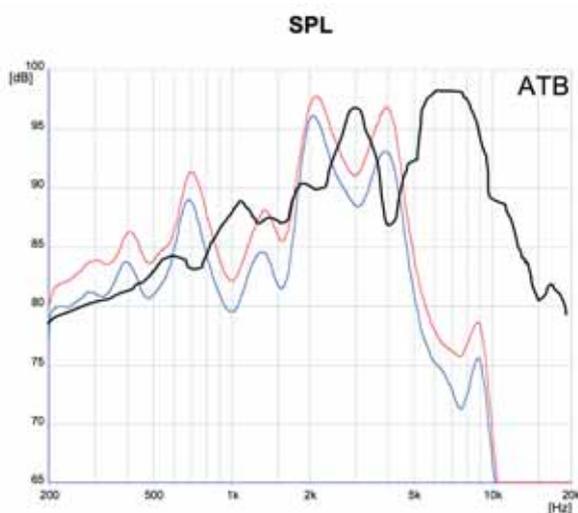


Fig. 3 : Réponse fréquentielle de deux versions de buzzers (courbes rouge et bleue) et d'un haut-parleur (courbe noire)

Nous nous intéressons dorénavant au cas où le générateur sonore est installé dans le microprocesseur. Un générateur sonore classiquement utilisé est capable de jouer uniquement des sons monophoniques, les caractéristiques de chaque « note » étant les suivantes (illustration en Figure 4) :

- **Durée totale** : elle est définie par la durée du signal de PWM (pulse width modulation) ;
- **Fréquence** : c'est l'inverse de la durée entre deux fronts montants du signal de PWM ;
- **Niveau** : lorsque l'émetteur utilisé est un buzzer, le niveau est ajusté en changeant la durée des pics ; lorsqu'il s'agit d'un haut-parleur, le niveau peut aussi être modifié en changeant l'amplitude de la tension ;
- **Amortissement** : il est possible d'ajouter un amortissement à la fin du son, ce qui donne un rendu dit « effet gong ». Notons que la durée de la phase d'amortissement dépend de la fréquence, ce qui ne facilite pas le travail de design sonore. Il est, par ailleurs, important de souligner que le paramètre d'attaque de la note ne peut pas être modifié, alors que celui-ci est très important pour le timbre.

Les différents générateurs sonores proposés par les fournisseurs ne présentent pas tous la même latitude de réglage des différentes caractéristiques. Par exemple, le nombre de fréquences utilisables peut être limité à 100, ce qui ne permet pas toujours de former une quinte parfaite entre deux notes.

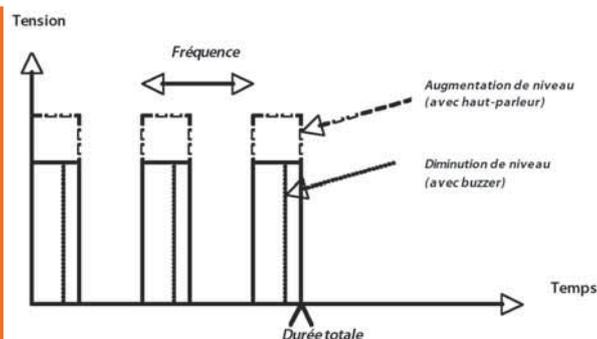


Fig. 4 : Caractéristiques sonores (en italique) produites par le signal de PWM

Ceci étant, en étendant les capacités du générateur sonore (latitudes de réglage élargies), l'un des fournisseurs a néanmoins réussi à créer des sons relativement proches de leurs cibles.

## Conclusion

Le premier objectif de cette étape consistait à implémenter les nouveaux dans le véhicule. Il s'est finalement avéré que la méthode, qui a consisté à proposer des sons cibles aux fournisseurs de tableau de bord et à leur demander de transposer les sons dans leur technologie, a eu deux conséquences majeures.

Tout d'abord, comme il était prévisible, cela nous a permis de mieux connaître le fonctionnement du système utilisé sur véhicule.

De plus, aussi bien les ingénieurs électroniciens que les fournisseurs, ont eu l'opportunité de découvrir des capacités jusqu'à présent insoupçonnées des composants électroniques qu'ils utilisent habituellement. Dans les véhicules actuellement vendus par Renault, les sons électroniques sont composés d'une ou deux notes, dont on ajuste uniquement la durée et la fréquence (le niveau est systématiquement réglé au maximum et il n'y a pas d'amortissement). Grâce à cette étude, nous sommes désormais capables de mettre au point les sons en jouant sur quatre paramètres (durée, fréquence, mais aussi niveau et amortissement), et en profitant de plus larges latitudes d'ajustement.

Nous pouvons ainsi espérer améliorer la sonorité du clignotant, ainsi que des autres interfaces homme machine sonores, et cela sans surcoût. La prochaine étape consistera à utiliser le système audio pour restituer les sons, ce qui offrira des possibilités nouvelles : bande passante plus large, étendue plus particulièrement vers les basses fréquences, possibilité de changer l'attaque et de créer des sons polyphoniques.

## Conclusion

L'étude de la qualité sonore des bruits de clignotants a permis de mettre à jour les attentes des clients et les caractéristiques que les sons doivent posséder pour répondre à ces attentes. Sur cette base, et plus particulièrement sur l'idée de créer des sons en cohérence avec les matériaux présents dans l'habitacle, nous avons travaillé avec l'équipe Perception et Design Sonores de l'Ircam pour créer une bibliothèque de sonorités nouvelles pour le clignotant.

Grâce à nos discussions avec les fournisseurs, nous avons découvert que Renault a jusqu'à présent créé des sons rudimentaires par rapport aux possibilités offertes par les composants électroniques : seuls deux paramètres sont ajustés alors que la technologie utilisée permet d'en régler quatre au total.

L'approche de design sonore qui a consisté à créer des sons en accord avec notre intention et à transposer ces sons cibles dans la technologie des véhicules Renault actuels a permis de changer nos habitudes de travail : plutôt que de mettre au point les sons en ajustant uniquement les paramètres habituels, nous avons repoussé les limites connues afin de mieux utiliser la technologie disponible, sans la changer et sans générer un surcoût de production.

## Remerciements

Nous tenons à remercier Louis Dandrel pour sa participation au design sonore des bruits de clignotant avec Modalys. L'exploration de la technologie aurait été impossible sans l'implication du département Electronique de Renault et de ses fournisseurs.

## Références bibliographiques

- [1] B. Saint-Loubry, 'Sound quality mark for economic cars'. Internoise (2000)
- [2] E. Rosch, 'Principles of categorization, in Cognition and categorization' (1978)
- [3] F. Guyot, 'Etude de la perception sonore en termes de reconnaissance et d'appréciation qualitative : une approche par la catégorisation'. PhD dissertation, Université du Maine (1996)
- [4] A. Guénoche, J.P. Barthélémy. 'Similitude, arbres et typicalité, in Sémantique et cognition' (CNRS, Paris), pp205-224, (1993)
- [5] C. Favre. 'Analyse en normes L1 et L0 des distances et des préférences, planification en analyse sensorielle, application au confort d'accueil des sièges automobiles'. PhD dissertation, Université de Rennes II, (1999)
- [6] G. Eckel, F. Iovino, R. Caussé. 'Sound Synthesis by Physical Modelling with Modalys'. International Symposium on Musical Acoustics (Dourdan, France) (1995)
- [7] S.E. Woodard. 'Methods to increase sound fidelity and quality produced from piezoelectric devices'. Journal of Sound and Vibration, volume 280, pp127-240, (2005)