

Influence du retour sonore dans l'habitacle automobile sur la perception de mouvement du conducteur / Intégration multisensorielle de la perception de la vitesse

How does interior car noise alter driver's perception of motion? Multisensory integration in speed perception

Sébastien Denjean, Vincent Roussarie

PSA Peugeot Citroën
2, route de Gisy
78140 Vélizy-Villacoublay
E-mail : sebastien.denjejan@mpsa.com

Sébastien Denjean, Richard Kronland-Martinet, Sølvi Ystad

Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique (LMA)
31, chemin Joseph-Aiguier
13402 Marseille

Jean-Luc Velay

Laboratoire de Neurosciences Cognitives (LNC)
3, place Victor-Hugo
13331 Marseille

Résumé

Le développement des motorisations électriques, entraîne la disparition du bruit moteur qui est une des trois sources principales de bruit en automobile, avec le bruit aérodynamique et le bruit de roulement. Or celui-ci est une source importante de retour d'informations et son absence peut modifier la perception de mouvement du conducteur qui est basée sur l'intégration multisensorielle des informations provenant des différentes modalités, en particulier visuelle, vestibulaire et sonore. Afin d'étudier l'influence de ces modifications acoustiques sur la perception de vitesse du conducteur, un test a été réalisé en simulateur de conduite avec 24 participants qui devaient accélérer jusqu'à une vitesse donnée sans compteur de vitesse. Nous comparons les vitesses réellement atteintes dans trois conditions sonores (véhicule thermique, véhicule électrique ou aucun retour sonore) et deux conditions visuelles (jour et nuit), ce qui nous permet de faire ressortir que le retour sonore que le conducteur perçoit dans l'habitacle modifie sa perception de vitesse du véhicule.

Abstract

Acoustic feedback inside a car is composed of different sources, which give information on the driver's actions and the dynamic state of the car. This acoustic feedback influences the driver's perception of movement in a multisensory integration. The development of electric motorizations brings new balance between noise sources inside the car, due to the loss of engine sound that is present in traditional internal combustion engine cars. To study the influence of this modified noise sources balance on driving, we focused on speed perception. A car simulator was used for this purpose. 24 participants were asked to accelerate up to a given target speed, while the speedometer was hidden. We studied the speed they actually reached with three types of acoustic feedback (engine sound, electric motor sound, no sound), in two visual conditions (night and day). We found that acoustic feedback alters the driver's speed perception.



Le contrôle de la vitesse est une tâche importante de l'activité de conduite automobile en tant que facteur clé de la sécurité routière. En effet, une vitesse trop importante augmente le risque d'être impliqué dans un accident de la route [1], ainsi que la dangerosité des accidents [2]. Pendant l'activité de conduite, le conducteur ne reste pas fixé sur le compteur de vitesse en permanence et doit donc se fier à sa perception de vitesse. Une bonne perception de vitesse lui permet d'être moins focalisé sur son compteur, ce qui soulage son attention et lui permet d'être plus concentré sur sa conduite. Différentes études ont été menées sur la perception de la vitesse en automobile, en véhicule ou en laboratoire, avec différentes méthodes expérimentales. Par exemple, Evans [3] demandait aux participants d'estimer la vitesse sur une échelle subjective, en position de passager en véhi-

cule. Milosevic [4], dans les mêmes conditions expérimentales, a préféré une estimation directe de la vitesse sur une échelle absolue (en km/h). Triggs et Berennyi [5] ont comparé les estimations de vitesse de passagers de jour et de nuit. Conchillo et al. [6] se sont intéressés à l'influence de la présence de trafic sur la vitesse perçue. Ces différentes études rapportent que, quelles que soient les conditions expérimentales, les conducteurs ont tendance à sous-estimer leur vitesse. D'autres expériences [7], menées en simulateur de conduite, ont permis d'établir une validité relative de la perception de la vitesse. Bien que les sujets semblent sous-estimer leur vitesse de façon plus importante en simulateur, les écarts entre deux situations expérimentales restent semblables à ceux observés en situation réelle, ce qui en fait des outils pertinents pour ces études.

La perception du mouvement en automobile est un exemple quotidien d'intégration multisensorielle. Notre perception de l'environnement est basée sur la combinaison des informations reçues dans les différentes modalités perceptives. C'est le cas pour la perception de la vitesse : les différentes informations visuelles, vestibulaires, acoustiques ou encore vibratoires sont fusionnées pour donner la perception de mouvement, et chacune de ces informations unimodales peut fortement influencer la perception globale. Des exemples d'intégration multisensorielle bien connus montrent l'influence du mouvement sur le son perçu, comme l'illusion ventriloque [8] dans lequel l'auditeur a une mauvaise estimation de la position de la source sonore, ou encore l'effet McGurk [9] qui entraîne une modification de la perception des syllabes prononcées en fonction du mouvement des lèvres du locuteur. L'effet du son sur la perception du mouvement a aussi été étudié. Par exemple Shams, Kamitani et Shimojo [10] ont montré qu'un point lumineux semble clignoter quand il est présenté en même temps que des bips sonores. Un point intéressant est le caractère asymétrique de ces cas d'intégration multisensorielle : alors que les événements visuels influencent fortement la perception des événements sonores, l'effet inverse est plus faible. Les informations visuelles sont des informations de premier ordre dans ces exemples d'intégration multisensorielle, mais les informations acoustiques ont aussi leur importance. Concernant l'influence des contributions dans l'intégration multisensorielle de la perception du mouvement, un état de l'art a été réalisé par Soto-Faraco, Kingstone et Spence [11], qui fait ressortir que chacune des modalités peut influencer différents aspects du mouvement perçu, tels que sa trajectoire, sa vitesse, ou encore les seuils de perception du mouvement.

Dans le cas de l'automobile, le bruit dans l'habitacle porte des informations sur le mouvement du véhicule et en particulier sa vitesse. En comparant les bruits aérodynamiques et de roulement de plusieurs véhicules à différentes vitesses, Richard [12] a montré que ces bruits ont des profils spectraux comparables et que leur niveau évolue avec la vitesse. La corrélation de ces paramètres avec la vitesse peut constituer des indices acoustiques très utiles dans l'estimation de la vitesse pour le conducteur. Mais elle nécessite un apprentissage car cette relation peut varier fortement d'un véhicule à un autre. Le bruit moteur est aussi porteur d'informations sur le mouvement du véhicule. Sa fréquence fondamentale est directement liée au régime moteur, lui-même fortement corrélé à la vitesse du véhicule entre deux passages de rapports. De plus les informations portées par le bruit moteur sont plus saillantes pour l'oreille humaine étant plus perceptibles que les variations des bruits aérodynamiques et des bruits de roulement. Différentes études ont été menées concernant la perception du bruit moteur dans l'habitacle, par exemple par Sciabica [13, 14]. Le développement des motorisations électriques vient perturber le bruit automobile perçu dans l'habitacle avec la disparition du bruit moteur. Le conducteur perd donc une grande partie des informations sonores sur son mouvement et nous ne pouvons pas savoir quel en sera l'impact sur la perception de mouvement du conducteur. Peu d'études traitant de la perception de la vitesse se sont intéressées à l'influence du retour sonore sur la perception de mouvement. Alors qu'Evans [3] ou Matthews et Cousins [15] ont repéré une sous-estimation plus importante de la vitesse par les conducteurs quand ils portent des

bouchons d'oreilles, aucun effet significatif n'a été rapporté par McLane et Wierwille [16] ni par Horswill et McKenna [17]. Horswill et Plooy [18] ont demandé aux participants d'estimer la vitesse par un jugement relatif, en comparant deux scènes vidéos. La première à vitesse fixe, utilisée comme référence (60 km/h et niveau sonore mesuré en véhicule), la seconde avec une vitesse variant entre 48 et 72 km/h et différents niveaux sonores (niveau mesuré ou diminué de 5 dB). Merat et Jamson [19] ont comparé les vitesses produites par des conducteurs en simulateur de conduite dans différentes conditions : avec retour sonore et compteur de vitesse, avec retour sonore seul, sans retour sonore ni compteur de vitesse pour deux vitesses cibles : 30 et 70 mph. Ces deux études ont montré une sous-estimation significative de la vitesse quand le niveau sonore est réduit. De plus, Merat et Jamson ont aussi rapporté les difficultés qu'avaient les sujets à maintenir une vitesse constante sans retour sonore.

Ces deux études s'intéressent à l'influence du niveau du retour sonore sur la perception de la vitesse, mais pas sur sa nature et les différentes sources qui le composent. L'expérience décrite ici vise à étudier l'influence de ces différentes sources sonores en comparant les cas d'un véhicule à motorisation thermique (bruit aérodynamique, bruit de roulement et bruit moteur), un véhicule avec un retour sonore plus pauvre (seulement bruit aérodynamique et bruit de roulement, cf. véhicule électrique) et un véhicule totalement silencieux. Cela nous permet d'étudier d'une part l'influence de la présence de bruit dans l'habitacle sur la perception du mouvement, et d'en extraire la part qui est due à la présence de bruit moteur.

Méthode

Participants

24 volontaires, 22 hommes et 2 femmes, âgés de 18 à 54 ans (âge moyen 30,8 - écart-type 9,1) ont participé à cette étude. Tous étaient titulaires du permis de conduire, sans problème de vue non corrigé ni problème auditif déclaré.

Protocole expérimental

Cette étude a été réalisée sur le simulateur de conduite statique Sherpa, développé par PSA Peugeot Citroën. Il est composé d'un demi-habitacle équipé d'un système de restitution sonore et disposé devant un écran semi-circulaire (Figure 1).



Fig. 1 : Simulateur de conduite utilisé pour l'étude
Picture of the driving simulator used for the study

Afin d'étudier l'influence des modifications entraînées par le développement de motorisations silencieuses, trois retour sonores ont été testés : véhicule thermique (avec bruit aérodynamique, bruit de roulement et bruit moteur), véhicule électrique (bruit aérodynamique et bruit de roulement) ou sans son. Les niveaux mesurés dans le simulateur en fonction de la vitesse sont représentés figure 2.

Nous observons que les niveaux sont similaires dans ces deux conditions, l'écart entre ces courbes correspondant à la présence de bruit moteur qui augmente peu le niveau sonore global perçu dans l'habitacle. Ce n'est donc pas l'influence du niveau qui nous intéresse ici, mais bien celle de la quantité d'informations portées par le retour sonore, le bruit moteur étant très riche par ses informations sur le régime moteur, fortement corrélé à la vitesse du véhicule.

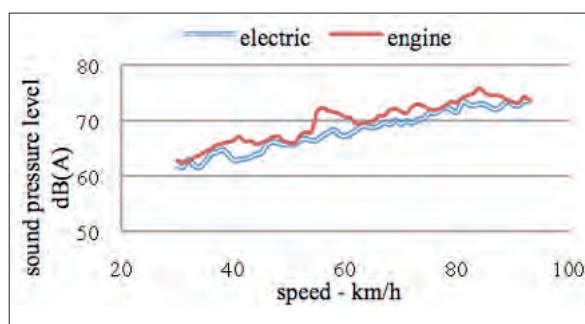


Fig. 2 : Niveaux sonores présentés dans le simulateur pour les conditions thermique et électrique
Diagrams of sound pressure levels in relation to vehicle speed

Les informations visuelles étant prédominantes sur les informations sonores dans la perception de la vitesse, nous avons voulu tester deux niveaux de richesse de flux visuel. Deux conditions visuelles ont été étudiées : jour et nuit. Concernant les vitesses étudiées nous nous sommes intéressés à deux vitesses cibles, 70 et 90 km/h, chacune atteinte depuis des vitesses initiales inférieures de 20 et 40 km/h. Quatre paires de vitesses ont donc été testées : 30-70, 50-70, 50-90 et 70-90 km/h.

Ces différentes variables ont été croisées pour former un plan expérimental complet et sont rassemblées dans le tableau 1.

Chaque stimulus a été répété 3 fois et chaque sujet a testé 72 stimuli.

Acoustique	Visuel	Vitesse cible	Ecart de vitesse
thermique	jour	70 km/h	+ 20 km/h
électrique	nuit	90 km/h	+ 40 km/h
sans son			

Tabl. 1 : Variables expérimentales
Experimental variables

Procédure

Le test a été divisé en deux sessions d'une heure, l'une pour la condition visuelle de jour, l'autre pour la nuit. Afin de réduire les effets d'apprentissage, la moitié des participants a commencé par la condition de jour, l'autre par celle de nuit suivant une répartition aléatoire.

La tâche demandée aux sujets consistait à accélérer depuis la vitesse initiale jusqu'à une vitesse cible avec le compteur de vitesse masqué, en se basant uniquement sur leur perception de vitesse. L'environnement visuel du test correspond à une route en ligne droite, en rase campagne. Pour augmenter la densité de flux visuel, des arbres étaient plantés sur les deux côtés de la route, avec une répartition aléatoire afin d'éviter de pouvoir détecter un rythme de défilement des arbres. Le test a été réalisé sans trafic pour ne pas perturber les participants.

La piste était découpée en trois zones marquées par des lignes blanches au sol (figure 3). La première zone a pour but d'amener le conducteur en condition de test : il doit démarrer le véhicule, accélérer jusqu'à la vitesse initiale et passer en 4ème rapport. Sur cette zone, le compteur de vitesse est visible pour que le conducteur atteigne la vitesse initiale avec précision. Quand le participant passe la première ligne, il entre dans la zone d'accélération. Le compteur de vitesse est masqué et le conducteur doit accélérer jusqu'à la vitesse cible. Enfin, au passage de la deuxième ligne, le participant doit maintenir cette vitesse cible tout au long de la troisième zone.

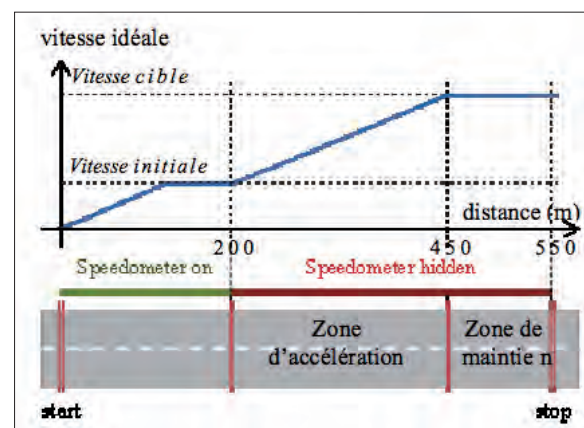


Fig. 3 : Schéma représentant les différentes zones marquées sur la piste et la vitesse idéale à atteindre par les participants
Layout of test areas and ideal speed reached by the participants

Au début de chaque session, les sujets étaient entraînés pour se familiariser avec le simulateur et calibrer leur perception de vitesse. Pour cette phase d'entraînement, nous avons choisi d'utiliser la condition sonore thermique, qui est le retour sonore habituel pour ces conducteurs. Pour réaliser la calibration, les sujets devaient accélérer jusqu'à la vitesse cible sans compteur de vitesse et l'expérimentateur leur annonçait la vitesse réellement atteinte afin de leur permettre d'ajuster leur vitesse à l'essai suivant. Cette phase de calibration s'achevait après cinq accélérations acceptables (+/- 5 km/h) consécutives pour chaque vitesse cible. Cette calibration peut avoir un fort impact sur les résultats, en réduisant les erreurs commises par les participants suite à cet entraînement.

Durant la phase de test, les stimuli étaient présentés suivant un plan aléatoire. La vitesse du véhicule et les actions du conducteur (enfoncement pédale d'accélérateur) étaient enregistrées et stockées automatiquement tout au long du test.

Résultats

L'influence des paramètres de test a été étudiée à partir de la vitesse atteinte par les conducteurs sur la zone de maintien. Deux indicateurs ont été étudiés :

- L'erreur (différence entre la vitesse réellement atteinte et la vitesse cible) en moyenne sur cette zone, en tant qu'indicateur de la vitesse perçue par les conducteurs.
- Son écart type sur la zone de maintien, comme indicateur de la qualité du maintien de la vitesse et de l'aptitude des conducteurs à réaliser cette tâche.

La consensualité des réponses des participants a été vérifiée par une analyse en composantes principales et l'influence de chacun des paramètres expérimentaux par une analyse de variance (ANOVA).

Profils d'accélération moyens

On représente ci-dessous les profils d'accélération moyens sur tous les sujets pour le cas de l'accélération de 50 à 90 km/h dans la condition visuelle jour.

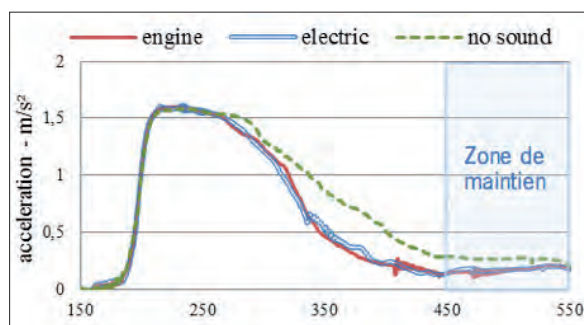


Fig. 4 : Profils d'accélération moyens pour l'accélération de 50 à 90 km/h de jour
Mean acceleration profiles for the 50 to 90 km/h acceleration in daytime condition

Cet exemple de profil illustre bien la stratégie employée par les sujets pour réaliser la tâche : ils cherchent à atteindre la vitesse demandée le plus vite possible, avec une accélération maximale d'environ 1,5 m/s² en moyenne, ce qui correspond à un enfoncement pédale moyen d'environ 80%. La vitesse cible est donc atteinte avant la fin de la zone d'accélération et les sujets tentent ensuite de maintenir cette vitesse dès qu'ils pensent l'avoir atteinte. Nous remarquons sur ce graphique que, sans retour sonore, les conducteurs ont tendance à accélérer plus longtemps lors de la phase d'accélération et conservent une accélération plus forte dans la zone de maintien que dans les cas avec un retour sonore présent. De plus, dans les trois conditions sonores, l'accélération reste positive dans la zone de maintien, les sujets continuent d'accélérer quand ils veulent maintenir leur vitesse constante.

Vitesse moyenne sur la zone de maintien

L'erreur moyenne entre la vitesse réellement atteinte sur la zone de maintien et la vitesse cible nous informe sur la vitesse perçue par les conducteurs : elle représente l'écart entre la vitesse perçue par le conducteur et la vitesse réelle.

Les résultats de l'ANOVA montrent une influence significative du retour sonore sur la perception de la vitesse ($p < 0,001$). Cet effet est particulièrement marqué dans la condition où aucun retour sonore n'est présent, avec des erreurs nettement supérieures que dans les cas avec retour sonore (thermique et électrique). Contrairement aux premières observations réalisées en véhicules, nous observons que la sous-estimation est plus importante dans la condition thermique. Bien que les différences soient faibles entre les conditions électrique et thermique, elle est significative avec un test de Duncan.

L'ANOVA a aussi permis de faire ressortir l'influence de la condition visuelle ($p < 0,001$) avec une erreur plus faible de nuit et l'influence de l'écart de vitesse à produire ($p < 0,001$) avec une erreur plus faible dans le cas où l'on demande aux sujets d'accélérer de 40 km/h.

La vitesse cible n'a pas d'influence significative sur l'erreur moyenne ($p = 0,518$).

Nous observons aussi une influence de la répétition ($p < 0,001$) avec des erreurs significativement plus faibles pour la première répétition en comparaison des deux suivantes.

Ces résultats sont regroupés dans la figure 5, page suivante..

Enfin, nous remarquons que les conducteurs sous-estiment leur vitesse et ont tendance à produire des vitesses plus élevées que les vitesses demandées, les erreurs moyennes étant toutes positives. Cette sous-estimation est encore plus marquée sans retour sonore, avec des erreurs deux fois plus grandes dans cette situation.

Variabilité de la vitesse sur la zone de maintien

La variabilité de la vitesse tout au long de la zone de maintien (zone en bleu sur la figure 4) est aussi un paramètre intéressant en tant qu'indicateur de l'aptitude des conducteurs à réaliser la tâche, ainsi que de la robustesse de leur perception de vitesse.

Les résultats de l'ANOVA réalisée sur l'écart-type de la vitesse sur la zone de maintien présentent des différences par rapport à ceux de l'erreur moyenne. L'influence de la condition visuelle est toujours présente ($p < 0,011$) avec une meilleure précision de nuit, ainsi que celle de l'accélération à produire ($p < 0,001$). Cette fois-ci la vitesse cible a aussi un effet significatif ($p < 0,002$). Les conducteurs présentent plus de facilité à maintenir une vitesse plus basse, et d'autant plus quand l'écart avec la vitesse initiale est plus faible.

Nous n'observons plus d'influence significative de la répétition.

Enfin, concernant le retour sonore, son influence est significative ($p < 0,001$) mais pour cet indicateur, c'est la condition thermique qui donne les meilleures précisions. Avec l'information portée par le bruit moteur, les conducteurs maintiennent leur vitesse avec plus de précision que dans le cas électrique et cette tâche est encore plus difficile sans aucun retour sonore.

Un test de Duncan montre un écart significatif entre les 3 conditions sonores.

Les différents résultats de l'ANOVA réalisée sur l'écart type de la vitesse tout au long de la zone de maintien sont donnés figure 6, page suivante.

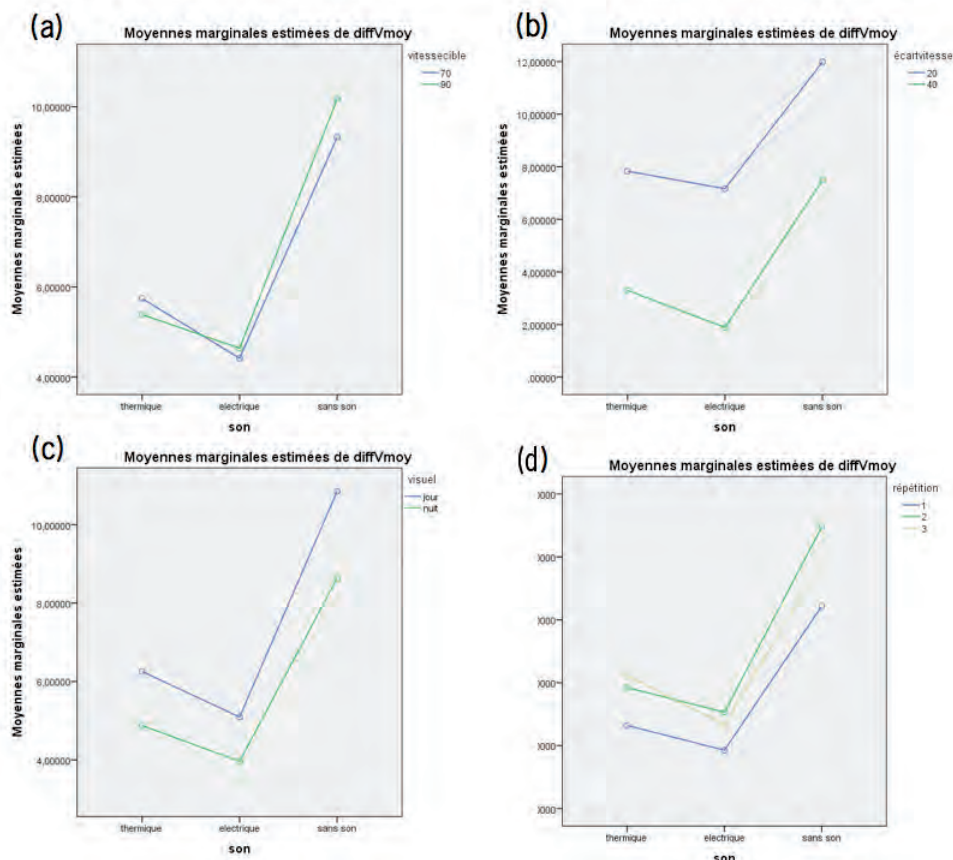


Fig. 5 : Influence de la vitesse cible (a), de l'écart de vitesse (b) de la situation visuelle (c) et de la répétition (d) en fonction de la condition sonore sur les vitesses moyennes sur la zone de maintien (en km/h)
Influence of target speed (a), speed gap (b), visual condition (c) and repetition (d) in relation with acoustic condition on mean errors on the maintain zone (in km/h)

Discussion

Retour sonore

La condition sans retour sonore nous montre l'importance du bruit automobile dans l'habitacle sur la perception de mouvement du conducteur. En effet, sans retour sonore, les conducteurs ont tendance à conduire significativement plus vite et présentent plus de difficultés à conserver une vitesse constante. Même si cette condition est extrême et ne sera jamais réellement atteinte, elle montre que la tâche de conduite est fortement influencée par le retour sonore perçu dans l'habitacle par le conducteur. Contrairement à notre intuition, nous observons que les conducteurs ont tendance à conduire plus vite en présence de bruit moteur que dans le cas où seuls les bruits aérodynamiques et de roulement sont présents, même si cette différence reste faible. Cependant, le bruit moteur s'avère particulièrement utile pour maintenir une vitesse constante. Les informations de faibles variations de vitesse portées par le bruit moteur sont plus facilement traitées par le conducteur et lui permettent de limiter les faibles accélérations.

Vitesses

En ce qui concerne la vitesse cible, nous n'observons pas de différences significatives sur l'erreur moyenne. Cependant, les deux vitesses cibles étudiées sont relativement proches

(seulement 20 km/h d'écart) et des effets pourraient apparaître avec une plus grande différence entre les vitesses cibles. Au contraire, l'écart entre la vitesse initiale et la vitesse cible a un effet sur l'erreur réalisée par les participants. Les sujets semblent avoir une perception différente de la vitesse en fonction de l'accélération qu'ils doivent produire. En effet, si l'on s'intéresse aux valeurs de l'enfoncement pédale produites par les conducteurs au moment où ils atteignent la vitesse cible, on remarque qu'ils relâchent l'accélérateur à des vitesses plus élevées dans le cas de l'accélération de 20 km/h par rapport au cas de l'accélération de 40 km/h. Ils n'ont donc pas une estimation absolue de la vitesse mais se focalisent plutôt sur une estimation relative. De plus, un autre phénomène peut accentuer ces différences : les zones marquées sur la piste ont les mêmes dimensions quelles que soient les paires de vitesses. Compte tenu du fait que les sujets tentent d'atteindre la vitesse cible le plus rapidement possible, ils leur reste plus de distance à parcourir avant d'atteindre la zone de maintien dans le cas où ils doivent accélérer de 20 km/h que dans le cas où on leur demande d'accélérer de 40 km/h. Or nous avons vu que les conducteurs continuent d'accélérer lorsqu'ils veulent maintenir une vitesse constante, ce qui peut entraîner une plus grande dérive de la vitesse avant d'atteindre la zone de maintien dans le cas de l'accélération de 20 km/h.

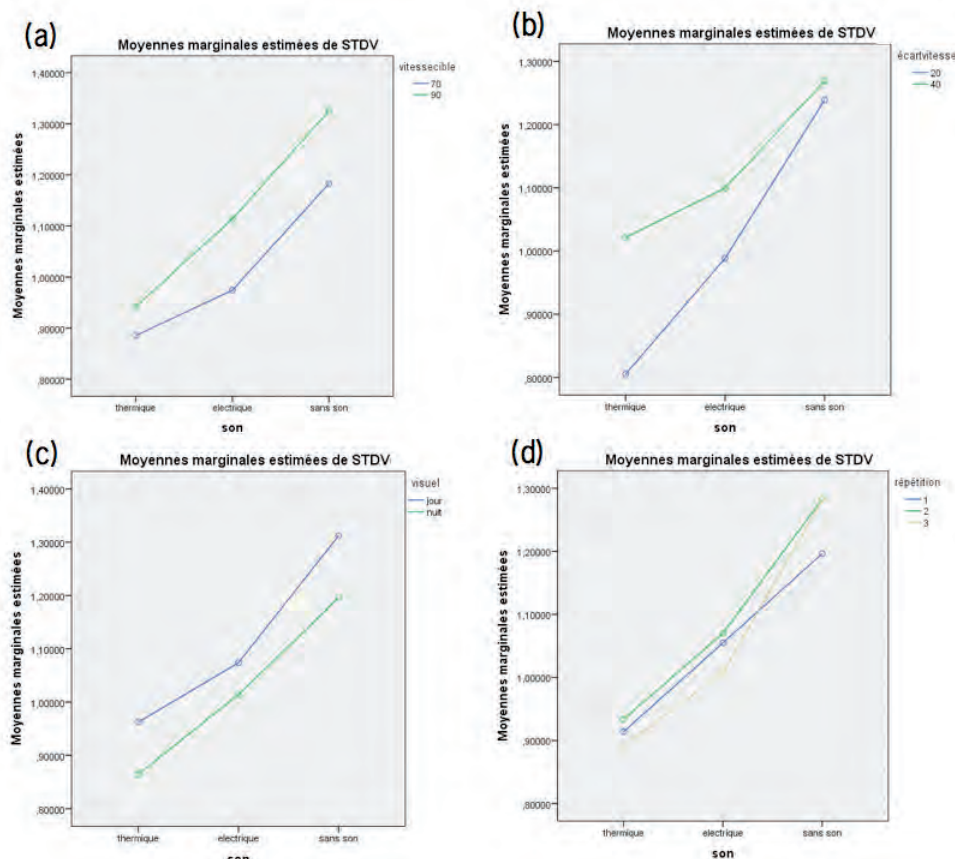


Fig. 6 : Influence de la vitesse cible (a), de l'écart de vitesse (b) de la situation visuelle (c) et de la répétition (d) en fonction de la condition sonore sur les écarts-types de la vitesse sur la zone de maintien (en km/h)
Influence of target speed (a), speed gap (b), visual condition (c) and repetition (d) in relation with acoustic condition on standard deviations of speed on the maintain zone (in km/h)

En ce qui concerne la qualité du maintien, on observe que les conducteurs ont plus de facilité à maintenir leur vitesse quand ils doivent atteindre des vitesses plus basses et quand ils doivent produire des variations plus faibles. Ces résultats rejoignent ceux de Merat et Jamson [19].

Environnement visuel

L'ANOVA réalisée a montré que les erreurs moyennes entre la vitesse réelle et la vitesse cible étaient plus faibles de nuit que de jour. De nuit, les conducteurs ont tendance à rouler moins vite car ils ont un champ visuel plus réduit et ont ainsi plus de difficultés pour anticiper leurs actions. Compte tenu du fait que les conducteurs sous-estiment leur vitesse, le fait de rouler moins vite les rapproche de la vitesse cible et réduit donc les erreurs produites. Cependant, en simulateur, les participants peuvent être moins sensibles aux risques encourus qu'en situation réelle, en véhicule. Un autre point qui pourrait expliquer cette réduction de l'erreur est le fait que le champ visuel est beaucoup plus restreint sur un périmètre proche du véhicule dans la condition nuit et le conducteur focalise son attention sur le flux latéral qui est porteur d'informations plus précises sur le mouvement. Ces observations de réduction de la vitesse en situation de nuit est cohérente avec de précédentes études, en particulier celle de Kemeny et Panerai [20].

Conclusion

En cohérence avec l'état de l'art sur la perception de la vitesse en automobile, nous observons que les conducteurs ont tendance à sous-estimer leur vitesse et donc à produire des vitesses plus importantes que les vitesses demandées et ce d'autant plus de nuit. L'objectif de cette étude est avant tout de déterminer l'influence du retour sonore dans l'habitacle sur la perception de la vitesse. Contrairement aux précédentes études, nous ne nous sommes pas intéressés à l'influence du niveau de ce retour sonore, mais plutôt à sa nature et à l'influence des différentes composantes qu'il contient, en particulier celle du bruit moteur. C'est le caractère informatif du retour sonore qui nous a intéressés ici, en comparant un cas sans aucune information sonore, un cas avec un retour sonore très informatif calqué sur un véhicule thermique avec les informations portées par le bruit aérodynamique, le bruit de roulement et le bruit moteur, et un cas intermédiaire, typé véhicule électrique, dans lequel on supprime les informations portées par le bruit moteur. Sans aucun retour sonore, les conducteurs ont tendance à rouler significativement plus vite que dans les conditions où un retour sonore est présent et ils ont plus de difficultés à maintenir leur vitesse constante. Pour cette tâche de maintien, les informations portées par le bruit

moteur semblent aider le conducteur, quelle que soit la vitesse cible ou l'accélération à produire pour l'atteindre. En situation réelle de conduite, la mauvaise estimation de la vitesse est compensée par la présence du compteur de vitesse, mais une estimation correcte de la vitesse et de l'accélération est nécessaire entre deux vérifications de la vitesse par le conducteur. L'estimation relative de la vitesse est donc nécessaire à l'activité de conduite et, comme nous l'avons vu dans cette étude, ce sont les informations portées par le bruit moteur qui sont utiles au conducteur pour en limiter les faibles variations involontaires. La perte de ces informations avec les motorisations électriques pourrait compliquer la tâche de conduite et augmenter la charge attentionnelle des conducteurs. La connaissance des informations portées par les différentes sources de bruit automobile et de leurs influences sur certaines tâches de conduite pourra nous permettre de réfléchir à différentes stratégies visant à rendre ce retour d'information sonore au conducteur et ainsi l'accompagner dans l'activité de conduite.

[16] R.C. McLane, W.W. Wierwille, "The influence of motion and audio cues on driver performance in an automobile simulator", *Human Factors* 17, 488-501 (1975)

[17] M.S. Horswill, F.P. McKenna, "The development, validation, and application of a video-based technique for measuring an everyday risk-taking behaviour: Drivers' speed choice", *Journal of Applied Psychology* 84, 977-985 (1999)

[18] M.S. Horswill, A.M. Plooy, "Auditory feedback influences perceived driving speeds", *Perception* 37, 1037-1043 (2008)

[19] N. Merat, H. Jamson, "A driving simulator study to examine the role of vehicle acoustics on drivers' speed perception", *Proceedings of the Sixth International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design*, 226-232 (2011)

[20] A. Kemeny, F. Panerai, "Evaluating perception in driving simulation experiments", *Trends in Cognitive Sciences* 7(1), 31-37 (2003)

Remerciements

Ces travaux ont été en partie soutenus par l'Association Nationale de la Recherche dans le cadre du programme CONTINT (ANR-10-CORD-0003, "Métaphores sonores", <http://metason.cnrs-mrs.fr/>)

Références bibliographiques

- [1] L. Aarts, I. van Schagen, "Driving speed and the risk of road crashes: A review", *Accident Analysis and Prevention* 38, 215-224 (2006)
- [2] H.C. Joksche, "Velocity change and fatality risk in a crash - A rule of thumb", *Accident Analysis and Prevention* 25(1), 103-104 (1993)
- [3] L. Evans, "Speed estimation from a moving automobile", *Ergonomics* 13, 219-230 (1970)
- [4] S. Milosevic, "Perception of vehicle speed", *Revija za psihologiju* 16, 11-19 (1986)
- [5] T. Triggs, and J. S. Berenyi, "Estimation of automobile speed under day and night conditions", *Human Factors* 24, 111-114 (1982)
- [6] A. Conchillo, M.A. Recarte, L.M. Nunes, T. Ruiz, "Comparing speed estimations from a moving vehicle in different traffic scenarios: Absence versus presence of traffic flow", *The Spanish Journal of Psychology* 9(1), 32-37 (2006)
- [7] S.T. Godley, T.J. Triggs, B.N. Fildes, "Driving simulator validation for speed research", *Accident Analysis and Prevention* 34, 589-600 (2002)
- [8] I.P. Howard, W.B. Templeton, *Human spatial orientation*, Wiley, New York (1966)
- [9] H. McGurk, J. MacDonald, "Hearing lips and seeing voices", *Nature* 264(5588), 746-748 (1976)
- [10] L. Shams, Y. Kamitani, S. Shimojo, "Visual illusion induced by sound", *Cognitive Brain Research* 14, 147-152 (2002)
- [11] S. Soto-Faraco, C. Spence, A. Kingstone, "Cross-modal dynamic capture: Congruency effects in the perception of motion across sensory modalities", *Journal of Experimental Psychology* 30(2), 330-345 (2004)
- [12] F. Richard, F. Costes, J.-F. Sciabica, V. Roussarie, "Vehicle Acoustic specifications using masking models", *Proceedings of the Internoise, Istanbul* (2007)
- [13] J.-F. Sciabica, M.-C. Bezat, V. Roussarie, R. Kronland-Martinet, S. Ystad, "Caractérisation des variations de timbre du bruit moteur dans l'habitacle automobile par application d'un modèle auditif" 10ème Congrès Français d'Acoustique, Lyon (2010)
- [14] J.-F. Sciabica, M.-C. Bezat, V. Roussarie, R. Kronland-Martinet, S. Ystad, "Towards the timbre modeling of interior car sound", *Proceedings of the 15th International Conference on Auditory Display, Copenhagen* (2009)
- [15] M.L. Matthews, L.R. Cousins, "The influence of vehicle type on the estimation of velocity while driving", *Ergonomics* 23, 1151-1160 (1980)