



HAL
open science

Etude du confort vibro-acoustique automobile en simulateur

Maël Amari

► **To cite this version:**

Maël Amari. Etude du confort vibro-acoustique automobile en simulateur. Acoustique [physics.class-ph]. INSA de Lyon, 2009. Français. NNT: . tel-00784843

HAL Id: tel-00784843

<https://theses.hal.science/tel-00784843>

Submitted on 4 Feb 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES - LYON

Laboratoire Vibrations Acoustique

ECOLE DOCTORALE MEGA

Département Génie Mécanique Conception

THESE

pour l'obtention du grade de Docteur

présentée et soutenue publiquement par

Maël AMARI

Etude du confort vibro-acoustique
automobile en simulateur

JURY

Mr. P. DONATI	<i>Dr., INRS</i>	Rapporteur
Mme. C. FILLOL	<i>Dr., RATP</i>	Invitée
Mr. P. GUILLEMAIN	<i>Dr., CNRS</i>	Examineur
Mr. E. PARIZET	<i>Pr., INSA de Lyon</i>	Directeur de thèse
Mr. J.F. PETIOT	<i>Pr., Ecole centrale de Nantes</i>	Examineur
Mr. V. ROUSSARIE	<i>Dr., PSA Peugeot Citroën</i>	Examineur
Mr. R. WEBER	<i>Pr., Université d'Oldenburg</i>	Rapporteur

INSA Direction de la Recherche - Ecoles Doctorales Quadriennal 2007-2010

SIGLE	ECOLE DOCTORALE	NOM ET COORDONNEES DU RESPONSABLE
CHIMIE	<p><u>CHIMIE DE LYON</u> http://sakura.cpe.fr/ED206</p> <p>M. Jean Marc LANCELIN</p> <p>Insa : R. GOURDON</p>	<p>M. Jean Marc LANCELIN Université Claude Bernard Lyon 1 Bât CPE 43 bd du 11 novembre 1918 69622 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04.72.43 13 95 Fax : lancelin@hikari.cpe.fr</p>
E.E.A.	<p><u>ELECTRONIQUE, ELECTROTECHNIQUE, AUTOMATIQUE</u> http://www.insa-lyon.fr/eea</p> <p>M. Alain NICOLAS Insa : C. PLOSSU ede2a@insa-lyon.fr Secrétariat : M. LABOUNE AM. 64.43 – Fax : 64.54</p>	<p>M. Alain NICOLAS Ecole Centrale de Lyon Bâtiment H9 36 avenue Guy de Collongue 69134 ECULLY Tél : 04.72.18 60 97 Fax : 04 78 43 37 17 eea@ec-lyon.fr Secrétariat : M.C. HAVGOUDOUKIAN</p>
E2M2	<p><u>EVOLUTION, ECOSYSTEME, MICROBIOLOGIE, MODELISATION</u> http://biomserv.univ-lyon1.fr/E2M2</p> <p>M. Jean-Pierre FLANDROIS Insa : H. CHARLES</p>	<p>M. Jean-Pierre FLANDROIS CNRS UMR 5558 Université Claude Bernard Lyon 1 Bât G. Mendel 43 bd du 11 novembre 1918 69622 VILLEURBANNE Cédex Tél : 04.26 23 59 50 Fax 04 26 23 59 49 06 07 53 89 13 e2m2@biomserv.univ-lyon1.fr</p>
EDISS	<p><u>INTERDISCIPLINAIRE SCIENCES-SANTE</u></p> <p>Sec : Safia Boudjema M. Didier REVEL Insa : M. LAGARDE</p>	<p>M. Didier REVEL Hôpital Cardiologique de Lyon Bâtiment Central 28 Avenue Doyen Lépine 69500 BRON Tél : 04.72.68 49 09 Fax :04 72 35 49 16 Didier.revel@creatis.uni-lyon1.fr</p>
INFOMATHS	<p><u>INFORMATIQUE ET MATHÉMATIQUES</u> http://infomaths.univ-lyon1.fr</p> <p>M. Alain MILLE</p> <p>Secrétariat : C. DAYEYAN</p>	<p>M. Alain MILLE Université Claude Bernard Lyon 1 LIRIS - INFOMATHS Bâtiment Nautibus 43 bd du 11 novembre 1918 69622 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04.72. 44 82 94 Fax 04 72 43 13 10 infomaths@bat710.univ-lyon1.fr - alain.mille@liris.cnrs.fr</p>
Matériaux	<p><u>MATERIAUX DE LYON</u></p> <p>M. Jean Marc PELLETIER</p> <p>Secrétariat : C. BERNAVON 83.85</p>	<p>M. Jean Marc PELLETIER INSA de Lyon MATEIS Bâtiment Blaise Pascal 7 avenue Jean Capelle 69621 VILLEURBANNE Cédex Tél : 04.72.43 83 18 Fax 04 72 43 85 28 Jean-marc.Pelletier@insa-lyon.fr</p>
MEGA	<p><u>MECANIQUE, ENERGETIQUE, GENIE CIVIL, ACOUSTIQUE</u></p> <p>M. Jean Louis GUYADER</p> <p>Secrétariat : M. LABOUNE PM : 71.70 –Fax : 87.12</p>	<p>M. Jean Louis GUYADER INSA de Lyon Laboratoire de Vibrations et Acoustique Bâtiment Antoine de Saint Exupéry 25 bis avenue Jean Capelle 69621 VILLEURBANNE Cedex Tél :04.72.18.71.70 Fax : 04 72 43 72 37 mega@lva.insa-lyon.fr</p>
ScSo	<p><u>ScSo*</u></p> <p>M. OBADIA Lionel</p> <p>Insa : J.Y. TOUSSAINT</p>	<p>M. OBADIA Lionel Université Lyon 2 86 rue Pasteur 69365 LYON Cedex 07 Tél : 04.78.69.72.76 Fax : 04.37.28.04.48 Lionel.Obadia@univ-lyon2.fr</p>

*ScSo : Histoire, Géographie, Aménagement, Urbanisme, Archéologie, Science politique, Sociologie, Anthropologie

REMERCIEMENTS

Ce travail de recherche est le fruit d'une *Convention Industrielle de Formation par la Recherche* (CIFRE) entre **PSA Peugeot Citroën** et le **Laboratoire Vibrations Acoustique** de l'**INSA de Lyon**.

Je souhaite exprimer mes sincères remerciements aux principaux intervenants de cette thèse pour leur disponibilité et leur ouverture d'esprit. Je remercie :

- **Etienne Parizet** (*Professeur, INSA de Lyon, Directeur de thèse*) pour sa patience et ses précieux conseils ;
- **Vincent Roussarie** (*Dr, Ingénieur de recherche, PSA Peugeot Citroën, Tuteur industriel*) pour son expertise en acoustique automobile ;
- **Olivier Lescop** (*Ingénieur de recherche, PSA Peugeot Citroën*) pour ses compétences en méthodologie perceptive et son soutien.

Je tiens ensuite à remercier **J.F. Petiot** (*Professeur, Ecole Centrale de Nantes, Examineur*), **P. Donati** (*Dr., INRS, Rapporteur*), **R. Weber** (*Professeur, Université d'Oldenburg, Rapporteur*), **P. Guillemain** (*Dr., CNRS, Examineur*) et **C. Fillol** (*Dr., RATP, Invitée*) d'avoir accepté d'examiner ce travail de doctorat.

Mes chaleureux remerciements s'adressent à l'ensemble du service **Perception Et Facteurs Humains (PEFH)** de **PSA Peugeot Citroën**. En particulier à **Anne Bardot** et **Patricia Jonville** pour m'avoir accueilli au sein de leur service, ainsi qu'à l'ensemble de mes collègues pour leur indispensable assistance.

Je remercie également les membres du **Laboratoire Vibrations Acoustique (LVA)** pour leur accueil et leur disponibilité.

Enfin, ces trois années de doctorat sont dédiées à ma famille et à mes proches.

Résumé

RESUME

L'intégration des facteurs humains dans la conception automobile est aujourd'hui un enjeu majeur de l'innovation. Il est essentiel pour les fabricants de maîtriser les processus d'évaluation d'un véhicule pour obtenir des informations sur la manière dont celui-ci va être perçu, puis jugé.

De par l'utilisation de plus en plus urbaine des véhicules, le confort de roulage à basse vitesse est au cœur des préoccupations industrielles. A ces allures, le confort dépend essentiellement de l'environnement vibro-acoustique de l'habitacle. Les évaluations de confort dans ces situations constituent le cadre de ce travail de recherche.

En complément des études « in situ », ce type d'étude nécessite l'utilisation de simulateurs qui permettent la maîtrise des caractéristiques de l'environnement d'un sujet. Dans la mesure du possible, ces simulateurs reproduisent fidèlement l'environnement dans lequel est immergé l'occupant d'un véhicule. Pour cela, ils font intervenir l'ensemble des modalités sensorielles propres à l'évaluation du confort. Mais, il existe toujours des limites à l'immersion et la simulation modifie le contexte cognitif dans lequel se trouve le passager.

Dans le but d'optimiser la simulation, deux expériences sont tout d'abord réalisées pour mesurer l'influence de l'environnement de simulation sur les évaluations de confort. Pour cela, les contributions relatives de l'immersion et des informations contextuelles apportées par les modalités vibratoires, sonores et visuelles sont estimées.

Les propriétés physiques des stimuli, significatives pour le confort, sont ensuite identifiées. À cet effet, les contributions relatives des niveaux sonores et vibratoires au confort automobile sont modélisées avec précision. L'existence d'une image perceptive du confort vibratoire des véhicules est également recherchée.

Enfin, les travaux se dirigent vers le cœur de la problématique de la prédiction du confort de roulage automobile : appréhender, dès la conception, les liens entre les prestations offertes par un véhicule à son occupant et le confort vibro-acoustique de l'habitacle. Des évaluations expertes d'items de cotation des véhicules sont alors comparées à des évaluations de confort faites par des sujets naïfs. Deux expériences perceptives faisant intervenir des stimuli artificiels sont alors mises en place. Ainsi, les liens entre les paramètres de synthèse et les évaluations permettent d'identifier les items de cotation les plus pertinents pour l'évaluation du confort.

Table des matières

ETUDE DU CONFORT VIBRO-ACOUSTIQUE AUTOMOBILE EN SIMULATEUR

RESUME	5
TABLE DES MATIERES.....	7
I OBJECTIFS DU TRAVAIL DE RECHERCHE.....	12
1 Introduction	12
2 Théorie	14
2.1 Confort et perception	14
2.2 Modalité vibratoire	20
2.3 Interaction sonore et vibratoire	69
3 Approche choisie	78
II OUTILS EXPERIMENTAUX.....	84
1 Mesures en véhicule	84
1.1 Description	84
1.2 Chaîne de mesures.....	86
2 Restitution en laboratoire	86
2.1 Laboratoire	87
2.2 Restitution sonore	89
2.3 Banc vibratoire.....	89
2.4 Pilotage du simulateur	94
3 Conclusion.....	95
III INFLUENCES DU CONTEXTE ET DES MODALITES PERCEPTIVES SUR LE CONFORT	99
1 Introduction	99
2 Influence des modalités vibratoires, sonores et visuelles (Exp. 1).....	102
2.1 Protocole	102
2.2 Résultats.....	105
3 Influence du contexte visuel (Exp. 2)	112
3.1 Protocole	113
3.2 Résultats.....	113
4 Conclusion.....	117

IV	PARAMETRES SIGNIFICATIFS POUR LE CONFORT AUTOMOBILE	121
1	Introduction	121
2	Influence relative du son et des vibrations (Exp. 3)	121
2.1	Stimuli	121
2.2	Protocole	123
2.3	Résultats	124
3	Image perceptive des véhicules (Exp. 4).....	134
3.1	Stimuli	136
3.2	Protocole	137
3.3	Résultats	138
4	Conclusion.....	144
V	CONFORT ET PRESTATIONS AUTOMOBILES.....	148
1	Introduction	148
2	Evaluations expertes de signaux de synthèse (Exp. 5).....	152
2.1	Stimuli	152
2.2	Protocole	155
2.3	Résultats	157
3	Evaluations de confort de signaux de synthèse (Exp.6)	166
3.1	Stimuli	167
3.2	Protocole	170
3.3	Résultats	171
4	Conclusion.....	179
VI	CONCLUSION	183
1	Synthèse	183
2	Perspectives	186
	BIBLIOGRAPHIE.....	188
	ANNEXES.....	197
A	Indicateurs physiques.....	198
B	Traitement des signaux	200
C	Consignes	201

Partie 1

Objectifs du travail de recherche

1

OBJECTIFS DU TRAVAIL DE RECHERCHE

1	Introduction	12
2	Théorie	14
2.1	Confort et perception	14
2.1.1	Notion de confort	14
2.1.2	Multi-modalité de la perception.....	16
2.1.3	Approche écologique de l'évaluation du confort	19
2.2	Modalité vibratoire	20
2.2.1	Vibrations	20
2.2.1.1	Définition	20
2.2.1.2	Sources vibratoires	22
2.2.2	Sensation vibratoire	28
2.2.2.1	Perception des vibrations	28
2.2.2.2	Psychophysique	42
2.2.2.3	Evaluation des vibrations	61
2.3	Interaction sonore et vibratoire	69
2.3.1	Effets sur la perception	70
2.3.1.1	Etat de l'art.....	70
2.3.1.2	Synthèse	71
2.3.2	Effets sur les évaluations.....	72
2.3.2.1	Etat de l'art.....	72
2.3.2.2	Synthèse	76
2.3.3	Conclusion	77
3	Approche choisie	78

I Objectifs du travail de recherche

1 Introduction

Les constructeurs automobiles n'ont de cesse d'améliorer les prestations offertes à leurs clients. Pour répondre à leurs exigences de consommation, les caractéristiques des véhicules doivent être optimisées dès les premières étapes de la conception. Aussi, au-delà de la simple compréhension et de la modélisation des phénomènes physiques mis en jeu, les industriels s'intéressent à la perception des occupants.

Parmi l'ensemble des prestations offertes par un véhicule, le confort constitue un des items les plus importants et dépend de nombreux critères comme le comportement routier de la voiture, sa capacité à filtrer les sollicitations extérieures, ou encore l'ergonomie, les matériaux et la régulation thermique de son habitacle. Ces éléments sont souvent étudiés de façon séparée alors que l'évaluation du confort est fortement dépendante de la perception globale de l'environnement. En effet, lors d'un parcours, l'occupant d'un véhicule est totalement immergé dans un continuum sensoriel complexe où interagissent à la fois, la vue, l'ouïe, le toucher.

Le confort peut être évalué durant toutes les phases d'utilisation d'un véhicule. Qu'il se trouve à l'arrêt ou en circulation, à faible ou grande vitesse, qu'il soit conducteur ou passager, l'occupant d'un véhicule est sans cesse capable d'estimer le confort de la situation dans laquelle il se situe. De par l'utilisation croissante des véhicules en zone urbaine, le confort en phase de roulage à basse vitesse occupe une part de plus en plus importante dans les préoccupations des constructeurs vis-à-vis du bien être de leur clients. Cette situation particulière ($v < 50 \text{ km/h}$) définit le cadre très strict de cette étude.

Une analyse détaillée du confort d'un véhicule en phase de roulage à basse vitesse montre qu'il est intimement lié au confort vibro-acoustique. En effet, dans ces conditions où l'agrément de conduite prend une place moindre, les principales sources de contraintes qui proviennent de l'environnement direct de l'occupant sont des vibrations et des sons qui lui sont transmis par l'habitacle (vibrations du plancher, des pédales, des sièges, du volant et du tableau de bord, bruit du moteur et bruit de roulement).

Les bruits et les vibrations ressentis par l'occupant d'un véhicule constituent la base de ce travail de recherche qui s'intéresse très précisément à l'intégration des modalités vibratoires et sonores dans les évaluations de confort.

Les sollicitations acoustiques et vibratoires sont produites par des phénomènes similaires. Elles sont physiquement cohérentes, se juxtaposent et interagissent inévitablement, d'une part à cause des phénomènes mécaniques mis en jeu, et d'autre part à travers la nature même des mécanismes de perception de l'occupant du véhicule.

Par exemple, en déplacement sur une route, le mouvement des pneumatiques crée des déformations de la caisse. À très basses fréquences, ces déformations ne se traduisent que par des vibrations ressenties à travers le siège du véhicule, par ses pieds en contact avec le plancher, ou par ses mains posées sur le volant. Plus la fréquence augmente, plus les structures du véhicule deviennent efficaces pour rayonner du bruit. Le roulement des pneumatiques génère alors une augmentation du niveau sonore ambiant. La limite entre vibrations et acoustique n'est pas franche et la transition des unes à l'autre se fait continûment.

Cette continuité se retrouve également dans la perception humaine : le corps humain peut par exemple percevoir des vibrations de fréquences inférieures à la plus basse fréquence perceptible par l'oreille ($f = 20$ Hz). Les sons des très basses fréquences sont alors ressentis par l'oreille mais également par des sensations corporelles (notamment sur les parois thoraciques ou abdominales).

Pour ces raisons, l'étude simultanée des modalités sonores et vibratoires ainsi que celles d'éventuelles interactions s'avère incontournable et se situe véritablement au cœur de ce travail de recherche.

Enfin, en complément d'expériences réalisées « in situ », l'étude du confort en phase de roulage basse vitesse nécessite l'utilisation de simulateurs. Contrairement à un véhicule en situation réelle, la simulation permet le contrôle des caractéristiques des stimuli auxquels sont soumis les sujets. Dans la mesure du possible, ces simulateurs doivent faire intervenir l'ensemble des modalités sensorielles impliquées dans l'évaluation du confort.

La réalisation d'expériences en milieu artificiel place bien entendu le sujet dans un état cognitif différent de celui d'une situation réelle (absence de tâche de conduite, modification des attentes vis-à-vis de la situation, etc.). Dans ces conditions il est donc nécessaire de mesurer l'influence intrinsèque de cet environnement simulé sur les évaluations.

Les modalités sonores et vibratoires constituent les bases de l'immersion. Elles font l'objet de l'essentiel du dispositif expérimental à déployer et doivent être nécessairement maîtrisées de manière très fine. Mais, des contraintes matérielles (coût d'exploitation et contrôle des stimuli) limitent la reproduction à l'identique d'un habitacle automobile. Dès lors, de nombreux éléments demeurent absents des simulations (restitution immersive du champ de vision, tableau de bord, vibration du volant et des pédales, etc.).

L'association d'une scène visuelle à des stimuli vibratoires et sonores constitue une piste d'amélioration très nette des conditions de la simulation. En effet, la simple projection de vidéos sur un écran rapproche, à moindre coût, l'environnement restitué en laboratoire de la réalité. Mais, si l'hypothèse que la modalité visuelle n'intervient pas directement dans les évaluations de confort vibro-acoustique peut être avancée, celle-ci apporte sans aucun doute des informations contextuelles sur la situation qui sont susceptibles d'influencer les évaluations de confort.

Ainsi, avant d'étudier en détail les contributions au confort automobile des modalités vibratoires et sonores, il paraît indispensable de s'interroger sur le rôle de l'immersion et de l'information apportée par la modalité visuelle.

2 Théorie

2.1 Confort et perception

2.1.1 Notion de confort

D'un point de vue fondamental, il est légitime de supposer que le confort de roulage d'un véhicule ainsi que le confort vibro-acoustique d'une situation font partie intégrante du concept général de confort [QUEH 01]. La définition du confort est très large. Il s'agit d'un état mental positif (ou d'une absence d'état mental négatif) créé par des éléments environnementaux. Le confort est donc une notion très subjective à laquelle sont principalement associés le bien-être mental et physique, l'aisance, le plaisir, la relaxation et la satisfaction. Selon les conditions, la sensation de confort peut également provenir de l'absence de gêne ou de source de distraction, ou encore de la présence d'éléments matériels apportant, dans une situation donnée, du soutien ou de la satisfaction.

La majorité des recherches menées sur le confort concerne l'environnement de travail ou le domaine des transports. Comme le confort est fortement lié aux propriétés physiques des éléments avec lesquels un individu interagit, il existe une grande quantité d'études ergonomiques dont le but est d'adapter les propriétés physiques des objets pour apporter un état optimal à la personne confrontée à une situation [HELA 87] [EBE 00]. Pour autant, le confort ne dépend pas uniquement des ressources matérielles dont dispose un individu mais reste surtout lié aux performances de ces dernières par rapport à ses attentes, ainsi qu'aux avantages qu'il en retire. Les aspects d'assistance et de praticité d'un objet deviennent alors essentiels à la compréhension du terme confort.

Les attentes d'un individu dépendent de chaque situation : par exemple, le confort à domicile est plus important que le confort au travail et les critères de confort sont plus sévères dans une automobile que dans les transports publics [GRIF 96]. L'état cognitif du sujet est également primordial (focalisation sur une tâche, humeur, etc.) [VAST 04]. Enfin, le confort de certaines situations peut être très difficile à évaluer. À ce propos Ebe et al. déclarent que la seule définition appropriée du confort d'assise d'un siège ne peut être donnée qu'en termes d'absence de qualités négatives [EBE 00]. Dans ce cas, seules les variations d'inconfort sont mesurées.

La complémentarité des notions de confort et d'inconfort est délicate et la transition de l'une à l'autre n'est pas « bijective ». S'il est admis que la sensation d'inconfort est liée principalement à la présence de conditions environnementales dégradées, l'inconfort peut être diminué par la suppression de ces contraintes. Mais cela n'induit pas forcément une sensation de confort car celle-ci nécessite d'éprouver une sensation de bien-être. À l'inverse, la simple absence de bien-être ne conduit pas à de l'inconfort car la présence de contraintes extérieures est indispensable [ZHAN 96]. Ainsi, même si l'inconfort est réduit, du confort peut être ressenti. Mais, si l'inconfort est augmenté alors la sensation de confort est systématiquement diminuée. Il en résulte que le confort peut donc être interprété comme une dimension subjective bipolaire (confort/inconfort). Celle-ci est fortement liée à l'environnement physique (et à ses variations) dans lequel est placé le sujet.

L'objectif de cette étude est d'évaluer le confort de roulage d'une automobile circulant à basse vitesse sur une route dégradée. Il s'agit par définition d'une situation inconfortable puisque les passagers sont soumis à des stimuli vibratoires et acoustiques créés par les déformations de la chaussée. Une sensation de confort peut tout de même se dégager d'une telle situation. En dehors de la satisfaction apportée par les différents équipements du véhicule, la sensation de confort est alors intimement liée à la capacité du véhicule à isoler son occupant des sollicitations extérieures. Cette capacité de filtrage est elle-même fortement dépendante des attentes des passagers vis-à-vis du véhicule. L'absence de gêne devient alors essentielle. L'indispensable sensation de bien-être peut, par exemple, être induite par la protection que procure le véhicule face à l'environnement extérieur. L'évaluation du confort dépend alors essentiellement de la nature et de l'intensité des stimuli renvoyés par le véhicule.

Il est important de préciser que les attentes des passagers quant aux aptitudes du véhicule à isoler et à protéger ses occupants peuvent dépendre du niveau de gamme annoncé. Les exigences des passagers sont plus hautes lorsqu'il s'agit d'un véhicule haut de gamme alors que ces mêmes personnes peuvent être plus tolérantes pour un véhicule bas de gamme. Le même

phénomène peut apparaître entre une berline « classique » et sa version sportive. Une même situation peut alors être jugée tantôt confortable, tantôt inconfortable. Tous ces éléments devront forcément être pris en compte lors des évaluations par l'utilisation d'une échelle d'évaluation graduée de l'inconfort au confort.

Enfin, la notion de confort contient des aspects psychologiques relatifs aux attentes d'un individu vis-à-vis de sa situation. Ainsi, dans le cas du confort de roulage automobile, la vue de la route apporte des informations sur les conditions de circulation du véhicule. Ces informations sont susceptibles de modifier les attentes du passager et, par conséquent, d'influencer les évaluations de confort.

L'essentiel des recherches publiées sur les modalités vibratoires, sonores et visuelles, est constituée d'explorations individuelles de chacun de ces sens, le plus souvent réalisées dans des conditions très éloignées du domaine de l'automobile. Or, de par sa définition très complexe, l'étude du confort de roulage à basse vitesse doit s'effectuer dans les conditions les plus proches possibles de celles d'un habitacle automobile. Ainsi, la nature même de l'environnement dans lequel se trouve l'occupant d'un véhicule fait qu'il est essentiel de tenir compte de la nature multi-sensorielle de celui-ci. Il apparaît alors indispensable d'intégrer la multi-modalité de la perception humaine à l'étude du confort automobile.

2.1.2 *Multi-modalité de la perception*

Les activités de la vie quotidienne demandent la participation simultanée et interactive de tous les sens, même si l'homme ne prête que peu d'attention à ces interactions (conversation, conduite d'un véhicule, etc.). Le plus souvent, l'homme n'est pas conscient de ces processus perceptifs et cognitifs implicites. Toutefois, pour être perçus, la plupart des objets et des événements de notre environnement mobilisent plusieurs modalités sensorielles. Les informations issues des diverses sources perceptives fusionnent alors pour aboutir à une représentation mentale de l'environnement [NEIS 76] [DRIV 00] [SPEN 02]. Les échanges entre individu et environnement sont donc fondamentalement multimodaux.

Certains systèmes sensoriels donnent accès aux mêmes propriétés des objets, par exemple : la vision et le toucher appréhendent la forme, la texture ou le volume, mais dans la plupart des cas, chacun d'entre eux prélève les informations qui lui sont propres (la lumière n'est pas palpable et les sons ne se voient pas). La perception n'est pas une simple photographie de la réalité. Ainsi, les fragments d'informations recueillis doivent faire l'objet d'une intégration et d'une harmonisation pour que l'organisme puisse répondre de

façon adéquate à une situation [JIME 97]. Pour permettre cette harmonisation, des mécanismes complexes toujours mal connus régissent les interactions entre les modalités qui s'exercent dans des situations très variées.

Physiologiquement, l'intégration des modalités s'effectue grâce à un substrat de cellules de convergences corticales et sous-corticales qui répondent à l'excitation de plusieurs modalités. Cependant, l'ensemble des études menées chez l'homme et chez l'animal confirment le caractère profondément adaptateur des interactions intermodales [BESL 07] qui nous permettent de percevoir de manière stable et unifiée notre environnement.

Les approches modernes accordent un rôle dominant à l'information contenue dans l'environnement mais à laquelle on accède par les sens et le cerveau [BERT 03]. La variété des modalités sensorielles soulève néanmoins la question de l'accès à une expérience unique à travers des réalités perceptives différentes [DELO 03]. Ce type d'approche s'oppose à des théories plus classiques selon lesquelles il existerait une perception directe des propriétés de l'environnement à partir des stimuli eux-mêmes. En d'autres termes, le monde lui-même serait directement perçu et non pas simplement appréhendé à travers sa représentation mentale [GIBS 66].

Loin d'être unitaires, les données sensorielles s'avèrent, à l'analyse, très différentes les unes des autres. Tous les sens n'accèdent pas à toutes les dimensions du réel. Aussi faut-il considérer que chacun des sens a sa spécialité et peut accéder à une facette du réel. Leurs différences ne dépendent pas seulement des structures des organes récepteurs qui les génèrent ou de la nature des stimuli auxquels elles réagissent normalement. Les modalités se distinguent aussi par la nature de l'information qu'elles extraient de l'environnement et par leur stratégie de recherche [DELO 03]. Par exemple, les modalités visuelles [COUR 07] et acoustiques [MCAD 93] présentent chacune des spécialisations propres et des compétences exclusives. C'est également le cas de la modalité sonore qui, contrairement à la modalité tactile par exemple, fait apparaître une capacité très prononcée des individus à reconnaître et à discerner une variété importante de propriétés d'objets (forme, taille, poids) et de situations (rebond, rupture) qui reflètent les plus importantes de ses propriétés physiques [SPEN 06].

Les psychologues de la perception ont trouvé un instrument d'étude révélateur des processus perceptifs. Ces derniers émergent de situations expérimentales précises et sont analysés sous le concept de l'inter modalité. Une revue détaillée des premières expériences de psychologie expérimentale traitant de ces interactions est proposée par Gribenski [GRIB 78]. Ces interactions ne seront pas analysées ici car elles vont bien au-delà du cadre de cette étude. Cependant, la synthèse faite par l'auteur rapporte de nombreux cas

d'interactions entre différentes modalités : odeur, douleur, son, etc. De plus, les études relatives à l'audition et à la vision montrent que bon nombre de leurs caractéristiques propres se voient modifiées lors d'une situation multimodale : acuité visuelle, vision des couleurs, temps de réponse, etc.

Parmi tous les paradigmes utilisés, l'étude des illusions perceptives est particulièrement intéressante. Ces phénomènes sont souvent rencontrés lorsque le sujet est placé en situation conflictuelle, c'est-à-dire en situation dans laquelle deux modalités perceptives renvoient des informations divergentes sur l'environnement. Les résultats observés sont souvent révélateurs des processus cognitifs associés. Deux d'entre elles seront détaillées ici à titre d'exemple car elles constituent des étapes élémentaires dans l'analyse des phénomènes perceptifs. Il s'agit de deux manifestations de l'effet ventriloque. Ces illusions perceptives concernent l'audition et la vision et traduisent la prédominance souvent observée de la modalité visuelle sur les autres.

L'« Effet Marionnette » repose sur le fait que le langage parlé implique un mouvement des lèvres d'un locuteur. Si tel n'est pas le cas, le système perceptif fait l'hypothèse d'une erreur de fonctionnement et la corrige en conséquence. Ainsi, alors que la marionnette d'un ventriloque remue la bouche pendant que le ventriloque parle sans mouvoir les lèvres, l'attention est totalement capturée par les mouvements de la marionnette et non par la voix du ventriloque qui est perçue en provenance de la bouche de la marionnette.

L'« Effet Mc Gurk » illustre la modification de la perception sonore par la vision [MCGU 76]. Dans un film, un acteur prononce deux fois une syllabe, synchronisée avec une bande sonore sur laquelle est enregistrée une autre syllabe, également répétée. En l'absence d'image, les sujets entendent correctement ce que dit la bande sonore. Lorsqu'ils regardent l'écran, ce qu'ils déclarent entendre diffère à la fois de ce qui est enregistré sur la bande sonore et de ce qui est prononcé sur l'écran. L'effet ne s'atténue pas avec les répétitions et le simple fait de fermer les yeux entraîne le retour à une perception non-modifiée.

Ces deux expériences reflètent la diversité des interactions qui existent entre la modalité sonore et la modalité visuelle. Dans le premier cas, l'exposition simultanée aux informations visuelles et auditives entraîne un changement dans la localisation du son, sans modifier son contenu sémantique. Dans le second, l'information contenue dans le message sonore est directement impactée par la modalité visuelle. Il est généralement admis que le résultat de la stimulation d'un récepteur sensoriel (stimulation principale) peut être accru ou au contraire diminué lorsqu'un autre récepteur est également stimulé (stimulation accessoire). Le sens et l'effet produit peuvent dépendre des caractéristiques du stimulus accessoire (intensité, relation temporelle avec le

principal, etc.) et des conditions dans lesquelles se déroule l'interaction (contexte, tâche réalisée par le sujet, etc.) [GRIB 78].

En conclusion, étant donné le caractère profondément intégrateur de la perception humaine et la spécificité de l'environnement dans lequel est immergé l'occupant d'un véhicule, une étude psychophysique classique qui consiste à étudier séparément les modalités vibratoires et sonores est à proscrire pour l'étude du confort de roulage automobile. Une étude isolée de ces deux modalités se focaliserait sur la perception de stimuli de l'une d'entre elles et occulterait alors totalement la capacité des personnes à intégrer des stimuli provenant de la seconde. L'approche la plus pertinente vis-à-vis de la problématique reste alors celle la plus écologiquement valide, au risque de limiter fortement la généralisation des résultats à des situations différentes [SPEN 06].

2.1.3 Approche écologique de l'évaluation du confort

Dans un véhicule réel, l'évaluation du confort s'effectue dans un contexte global qui ne peut être négligé dans les expérimentations en laboratoire. Indissociable, l'étude in situ implique, par ses enjeux forts, des restrictions non négligeables sur les protocoles expérimentaux. La complémentarité de ces deux types d'études n'est effective que si les liens entre les résultats obtenus in situ et en laboratoire sont connus [BEZA 07].

À ce propos, Genuit et al. présentent une expérience intéressante puisqu'elle correspond précisément au cadre de cette étude [GENU 07]. Ils comparent des évaluations de bruits de véhicules, effectuées in situ, en simulateur (son + vibrations, vibrations seules) et en laboratoire d'écoute (sons seuls). Les résultats révèlent une forte corrélation entre les expériences. Des différences d'utilisation de l'échelle de notation apparaissent. Les sujets utilisent ainsi une plus petite dynamique de notation dans le simulateur que dans le véhicule. Les résultats sont également très proches de ceux obtenus lorsque les sujets n'évaluent que les vibrations en simulateur. Enfin, l'échelle de notation a été considérablement réduite lors de l'évaluation des sons seuls. L'auteur souligne également que les différences contextuelles (tâche de conduite, absence de force d'inertie, scène visuelle, etc.) sont une explication possible de la dispersion constatée dans les résultats. Malgré ces observations, les évaluations en simulateur demeurent proches de celles réalisées sur le terrain.

Plusieurs études rapportent également une influence significative de la contextualisation sur les évaluations d'une modalité.

Ainsi, dans une expérience en laboratoire, Viollon et al. évaluent comment le jugement d'environnement sonore urbain peut être affecté par la présentation simultanée de scènes visuelles représentant des niveaux différents

d'urbanisation [VIOL 02]. De manière générale, il apparaît, sur les deux échelles d'évaluations (caractère agréable et caractère stressant), que le bruit est d'autant moins apprécié qu'il est associé à un environnement plus urbain. Cependant, cet effet n'est pas identique pour tous les sons testés et dépend de son contenu sémantique : l'effet est marquant pour les sons naturels et absent pour les sons d'origine humaine.

Dans le domaine automobile, Ellermeier et al. évaluent également l'influence de la contextualisation visuelle sur l'évaluation de sons en laboratoire [ELLE 06]. Les sujets doivent ainsi évaluer le caractère puissant de séquences sonores associées à des images de véhicule plus ou moins puissant. Il apparaît que le visuel d'un véhicule puissant induit un biais positif dans les évaluations, à l'inverse des véhicules peu puissants. Les sujets intègrent donc la modalité visuelle dans leurs évaluations, même lorsqu'il leur est explicitement demandé d'évaluer la seule modalité sonore.

Vastfjall et al. évaluent quant à eux l'effet des attentes et de l'humeur de l'auditeur sur l'évaluation de la préférence et de la gêne de sons d'aspirateurs et d'avions [VAST 04]. Ainsi, la mise en condition du sujet avant les évaluations entraîne une modification des jugements. Cependant, aucune tendance générale ne peut être observée. Les effets sont propres à chaque type de bruit.

En conclusion, les effets du contexte dans lequel se situe un sujet lors d'une évaluation sont significatifs et varient d'une expérience à l'autre. Ces effets, mêmes s'ils sont majoritairement documentés entre les modalités visuelles et acoustiques, n'en affectent pas moins la modalité vibratoire et les autres modalités [WARR 83].

2.2 Modalité vibratoire

Les effets des vibrations sur l'homme ainsi que le confort vibratoire sont étudiés très précisément. Après s'être attaché à la description des phénomènes vibratoires ainsi qu'à leurs mécanismes de perception, nous décrivons les procédures d'évaluation des vibrations globales du corps.

2.2.1 Vibrations

2.2.1.1 Définition

Une vibration mécanique est un mouvement oscillatoire d'un milieu fluide ou solide autour de sa position d'équilibre statique ou dynamique. Les déformations subies par un milieu solide mis en vibrations peuvent comporter plusieurs composantes directionnelles à la fois (grandeur vectorielle). Une vibration peut être quantifiée par la mesure de l'accélération [$m.s^{-2}$], de la

vitesse [$m \cdot s^{-1}$] ou du déplacement [m] qu'elle entraîne. Le passage de l'une à l'autre de ces grandeurs s'effectue par dérivation ou par intégration temporelle. Cependant, seule la valeur d'accélération est communément utilisée pour la représentation de phénomènes vibratoires [ISO-2041] [ISO-8041] [NF-13059]. La description de l'évolution au cours du temps de chacune des composantes i d'une accélération s'effectue donc sous la forme de la série temporelle $a_i(t)$ souvent notée $a(t)$ (Annexe A).

Il existe bien entendu une infinité de mouvements vibratoires possibles. Toutefois, ils peuvent être regroupés en différentes catégories selon leurs caractéristiques temporelles ou fréquentielles (mouvement déterministe ou aléatoire, stationnaire ou transitoire, périodique ou non périodique, etc.).

Dans le domaine automobile, l'information historiquement la plus importante (et donc la plus répandue) qui concerne les signaux vibratoires est celle relative à son amplitude. Parmi les indicateurs les plus utilisés se trouvent la valeur crête A et la valeur crête-à-crête A_{cc} du signal. Il s'agit respectivement de la plus grande valeur prise par le signal au cours du temps, et du plus grand écart entre le maximum et le minimum du signal. Ces valeurs sont très souvent utilisées pour la description de mouvements sinusoïdaux. En effet, ces informations permettent, dès lors que l'on connaît la fréquence du mouvement, de déterminer l'amplitude de l'accélération à n'importe quel instant. Pour des signaux asymétriques, on peut introduire la notion de valeur crête positive A^+ et négative A^- . Il s'agit alors respectivement des maximums d'amplitude atteints par l'accélération de chaque côté de sa valeur moyenne. Ce type d'indicateur de niveau est très adapté à la description de signaux stationnaires mono-fréquentiels mais n'est cependant pas suffisant pour des signaux plus complexes.

Il convient alors d'employer un indicateur reflétant plus globalement les écarts d'un signal par rapport à sa valeur moyenne : la valeur efficace ou valeur r.m.s. (« root mean square »). Il s'agit de la racine carrée de la moyenne des carrés des valeurs d'un signal. La valeur r.m.s. est donc sensible à l'écart à la moyenne de l'ensemble des points d'un signal entre un temps t_1 et un temps t_2 . Il décrit donc avec plus de précision le niveau global d'un signal que les valeurs crêtes. Dans le cas d'un mouvement vibratoire (signal à valeur moyenne nulle), il est égal à l'écart-type σ (moment statistique d'ordre 2). Dans le cas d'un mouvement harmonique, il est relié à la valeur crête par la relation : $a_{rms} = \frac{A}{\sqrt{2}}$.

Les amplitudes vibratoires sont le plus souvent représentées sur une échelle logarithmique (décibel - dB) à cause de l'importante dynamique rencontrée dans les mesures. Dans ce cas, on définit dans ce cas le niveau $L_a = 20 \cdot \log\left(\frac{a}{a_0}\right)$ comme étant le niveau vibratoire. a_0 représente l'accélération de référence à laquelle est comparée la valeur a . Cette valeur a été standardisée

à $10^{-6} m.s^{-2}$ [ISO-1683]. Le niveau vibratoire s'exprime donc en *dB* référencés à $a_0 = 10^{-6} m.s^{-2}$ (Tableau 1). Cette référence ne correspond pas à un seuil de perception contrairement à l'exception du niveau de pression dans l'air ($p_0 = 2.10^{-5} Pa$, contre $p_0 = 10^{-6} Pa$ dans tous les autres fluides). Le seuil de perception des vibrations verticales du corps entier (sujet assis) est de l'ordre de 80 dB [GRIF 96]. Les niveaux d'exposition rencontrés dans le domaine des transports ne dépassent que très rarement les 140 dB et varient le plus souvent entre 100 et 120 dB.

Accélération ($m.s^{-2}$)	Niveau (dB ref. $10^{-6} m/s^2$)
0,000001	0
0,00001	20
0,0001	40
0,001	60
0,01	80
0,1	100
1	120
10	140
100	160

Tableau 1 : Expression du niveau vibratoire en dB

2.2.1.2 Sources vibratoires

Les vibrations auxquelles sont soumis les passagers d'un véhicule proviennent essentiellement du moteur ou d'intermédiaires mécaniques entre le moteur et les roues, de la rotation des roues (balourd) ainsi que du sol. En phase de roulage basse vitesse sur une route dégradée, les vibrations du siège provenant de la rotation des roues et du moteur sont masquées par les sollicitations dues aux irrégularités de la route [CHIE 64]. Ces dernières imposent aux roues des mouvements dont la composition en fréquence, la nature et l'amplitude dépendent du profil de terrain et de la vitesse de circulation. Tout se passe alors comme si le véhicule était fixe et se trouvait excité par un processus vibratoire [BERT 66].

On suppose que le terrain peut fournir successivement ou simultanément trois sortes d'excitations :

- des excitations uniques : il s'agit de chocs ou d'oscillations courtes susceptibles de provoquer une réponse transitoire du véhicule. Ce type de sollicitation peut par exemple être causé par le passage d'une roue du véhicule sur une irrégularité très marquée de la chaussée (plaque d'égout, bande rugueuse, saignée dans le revêtement, etc.) ;

- des excitations périodiques : ce type de sollicitations correspond au passage du véhicule sur un revêtement présentant lui-même des propriétés périodiques généralement dues à sa structure (plaques de goudron ou de béton raccordées, bandes « bruyantes » sur le côté des routes, etc.) ;
- des excitations aléatoires : celles-ci peuvent être constituées par des excitations du premier type, plus ou moins rapprochées et dont les caractéristiques varient de façon imprévisible. Elles peuvent également correspondre à un état globalement dégradé du revêtement. Les études réalisées par divers auteurs à ce sujet ont montré que l'hypothèse d'une excitation aléatoire, stationnaire, gaussienne, rendait compte d'un très grand nombre de cas [CHIE 62].

Il est possible de caractériser une route et son revêtement à partir de son spectre de rugosité. Ce type de tracé présente les fréquences de variation spatiale du profil vertical de la route dans la direction de circulation du véhicule. Le spectre de rugosité exprime ainsi la densité spectrale $\varphi(F)$ en fonction de la fréquence spatiale $F = \frac{1}{Z}$, Z étant la longueur d'onde de la chaussée (m). L'unité de φ est le m^2 divisé par la fréquence spatiale (m), c'est-à-dire le $m^2/m^{-1} = m^3$. Si Z est la longueur des ondulations de la surface, les fréquences temporelles f et spatiales F sont liées par une fonction linéaire de la vitesse v du passage du véhicule : $f = F.v$.

Ces irrégularités de surfaces sont classées par Berthoz en quatre domaines selon leur longueur d'onde et de leur amplitude [BERT 66] :

- l'uni : ce type d'irrégularité dépend du réglage des engins de mise en œuvre et de leur système de guidage, du nivellement et de la déformation du sol support de la chaussée. On distingue plusieurs catégories : l'uni grandes ondes ($Z = 15 - 50 m, A = 1 - 20 cm$), l'uni ondes moyennes ($Z = 5 - 15 m, A = 1 - 20 mm$) et l'uni ondes courtes ($Z = 0,5 - 5 m, A = 1 - 20 mm$). Les défauts d'uni de grandes et de moyennes longueurs d'ondes ont un effet néfaste sur le confort dynamique (variation d'accélération très basses fréquences) et la stabilité du véhicule, notamment à vitesse élevée. Les défauts d'uni de courtes longueurs d'ondes réduisent les capacités de freinage du véhicule ;
- la méga-texture : sa longueur d'onde varie de 5 à 50 cm et son amplitude de 1 à 50 mm verticalement. C'est une caractéristique liée au type de revêtement, à sa méthode de mise en œuvre, à sa dégradation et à son traitement ponctuel. Ces irrégularités ont une influence défavorable sur le contrôle et la stabilité du véhicule, les vibrations du pneumatique et les bruits basses fréquences ;

- la macro-texture : elle correspond à des longueurs d'ondes comprises entre 0,5 et 50 mm et des amplitudes comprises entre 0,2 et 10 mm. C'est une caractéristique liée à la méthode d'élaboration, à la dimension des granulats, au traitement des surfaces et à la mise en œuvre (compactage) du revêtement de la route. Elle a une influence favorable sur l'adhérence à moyenne et haute vitesse sur chaussée mouillée, les propriétés optiques du revêtement et les projections d'eau. Elle a une influence défavorable sur les bruits basses et hautes fréquences et sur la résistance au roulement ;
- la micro-texture : la longueur d'onde de la micro-texture varie de 0 à 0,5 mm. Son amplitude est comprise entre 0 et 0,2 mm. C'est une caractéristique qui dépend de la pétrographie du granulat et du procédé d'élaboration. Elle influence favorablement l'adhérence sur chaussée sèche et mouillée mais entraîne une augmentation de l'usure du pneumatique et du bruit haute fréquence.

Les méga-textures et macro-textures représentent les irrégularités les plus sensibles en ce qui concerne le confort de roulage à basse vitesse. Elles induisent notamment une mise en vibration des roues qui se propage à travers la structure et trouvent du résonnant dans le comportement dynamique du véhicule.

A. Dynamique véhicule

Il n'est malheureusement pas possible d'étudier le comportement vibratoire d'un véhicule directement à partir du profil d'un sol et de la vitesse du véhicule. Si ces deux paramètres suffisent à caractériser le processus vibratoire qui sollicite le véhicule, elles sont insuffisantes pour l'étude des oscillations du système véhicule-siège-homme. En effet, ces dernières sont en effet fortement liées aux propriétés mécaniques de ce système. De plus, un même profil de route ne fournit pas des excitations identiques d'une expérience à l'autre.

Il convient alors de connaître, indépendamment du type de sollicitation, le comportement vibratoire du système mécanique formé par le véhicule, son siège et son passager. Pour cela, on utilise des modèles « masse-ressort-amortisseurs » plus ou moins simplifiés qui représentent le véhicule et son occupant (Figure 1). Crandall et al. démontrent à partir de l'étude de tels modèles que la réponse d'un véhicule à une excitation aléatoire gaussienne à bande limitée (qui rend compte d'un grand nombre de cas) est une oscillation gaussienne à bande étroite dont le spectre comporte autant de fréquences de résonance que le système a de modes de vibrations [CRAN 63]. Ces pointes sont d'autant plus étroites que l'amortissement du système est faible. Les caractéristiques géométriques et mécaniques des véhicules déterminent donc un

certain nombre de modes fondamentaux de mouvements (Tableau 2). Les constructeurs concentrent leurs efforts de développement sur la maîtrise des fréquences de résonance de ces modes, qu'ils cherchent en grande majorité à augmenter lorsque c'est possible (exemple : mode de rebond de roue). Enfin, les modes de vibration d'un véhicule sont regroupés en deux catégories, liées à leur origine mécanique :

- les modes de corps rigide : modes vibratoires où des masses indéformables entrent en résonance sur différentes fixations élastiques (mode de moteur, mode de rebond de roue ou battement, mode de train avant et arrière, etc.) ;
- les modes de structure : modes vibratoires où la structure elle-même se déforme. Il s'agit généralement de mouvements de torsion ou de flexion du châssis, ou des éléments de carrosserie.

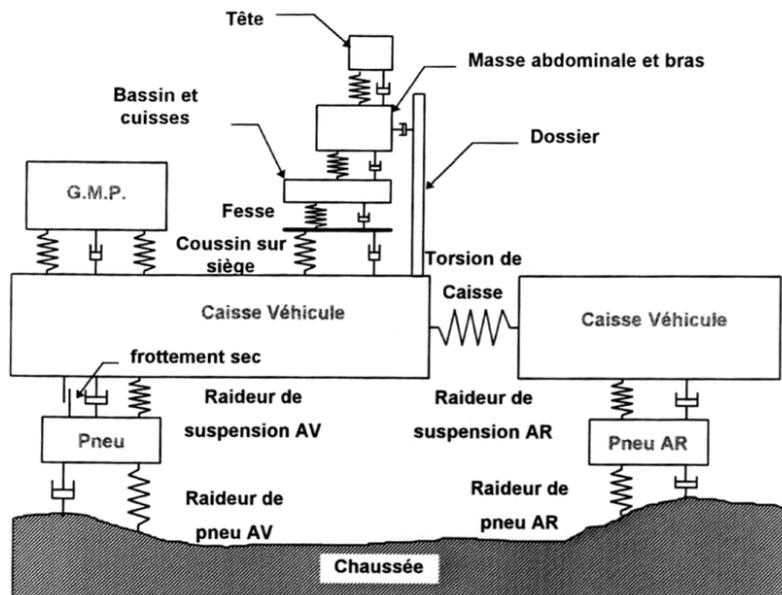


Figure 1 : Modèle simplifié du système "homme-siège-véhicule" [CITR 91]

Fréquence (Hz)	Mode de vibration
0 - 5	Masse suspendue du véhicule sur la raideur verticale de suspension
3 - 8	Masse suspendue du véhicule sur la raideur des pneumatiques Passager sur son siège
8 - 20	Moteur sur ses supports (roulis, pompage, tangage, lacet, etc.) Masses non suspendues des roues sur la raideur des pneumatiques (Battement)
13 - 20	Masses non suspendues sur la raideur longitudinale des liaisons avec la structure (articulations élastiques des bras, liaisons caisse-cadre)
10 - 40	Modes de structure (torsion et flexion de caisse) Modes de trains roulants

Tableau 2 : Principaux modes de vibration d'un véhicule [CITR 91]

En conclusion, les résultats d'études théoriques mettent en évidence l'extrême dépendance du comportement du système véhicule-siège-homme par rapport à l'excitation du terrain. Les caractéristiques du système sont des facteurs d'une influence déterminante sur la fréquence et la nature des mouvements oscillatoires. Même lorsque les fréquences limites du spectre de sol varient beaucoup, la réponse du véhicule reste fixée à des modalités précises et prévisibles par le calcul [BERT 66].

B. Niveaux d'exposition

La Figure 2 présente, à titre d'exemple, les dynamiques des niveaux d'exposition aux vibrations dans différents modes de transports. Les niveaux rencontrés dans l'automobile sont du même ordre de grandeur que ceux des avions ou des trains. La Figure 3 révèle que le contenu spectral des vibrations automobiles est plus chargé que celui des avions pour des fréquences supérieures à 8 Hz. Enfin, la Figure 4 présente les niveaux vibratoires moyens mesurés au niveau de la glissière et de l'assise de 5 véhicules selon les directions Ox, Oy et Oz des repères liés au siège. Ces valeurs sont calculées sur des accélérations mesurées dans des conditions de circulation différentes.

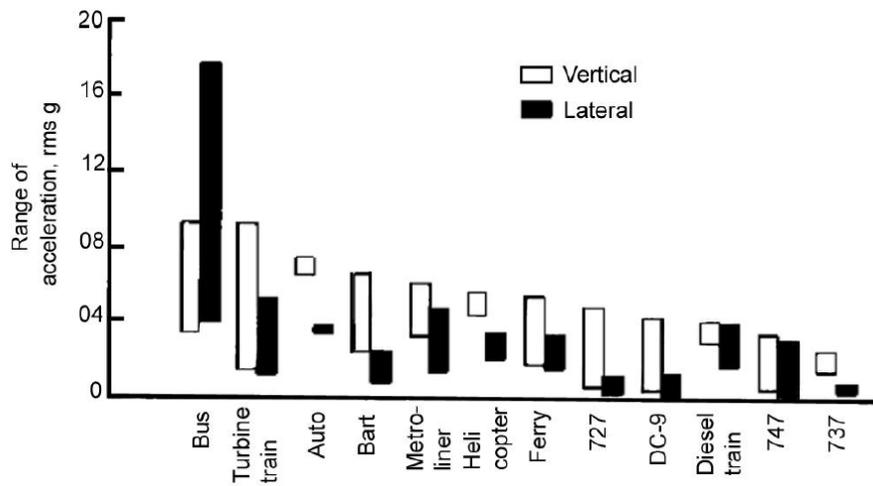


Figure 2 : Niveaux vibratoires de différents véhicules ($1g = 9,81 \text{ m/s}^2$) [STEP 92]

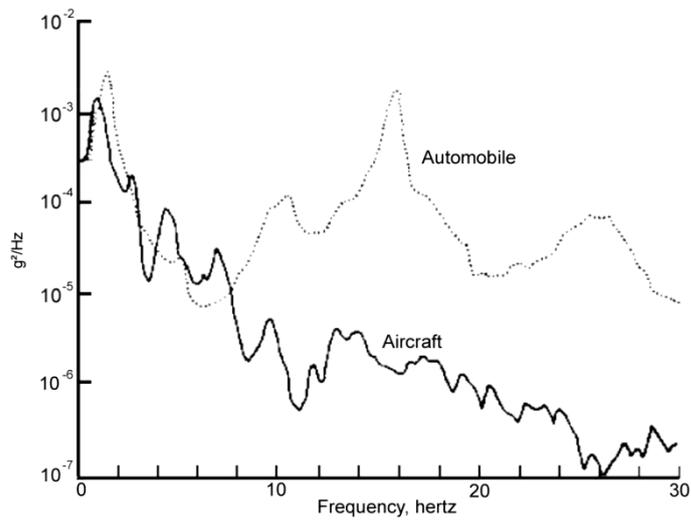


Figure 3 : Densité spectrale des accélérations d'un avion et d'une voiture ($1g = 9,81 \text{ m/s}^2$) [STEP 92]

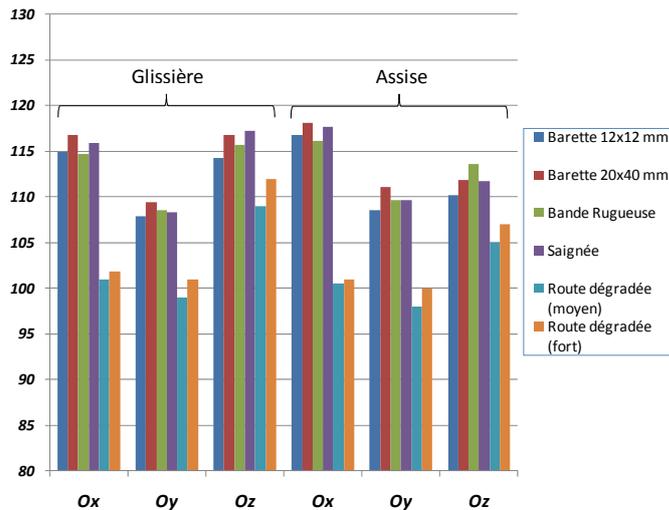


Figure 4 : Niveaux vibratoires automobiles (glissière et assise du siège)

2.2.2 Sensation vibratoire

2.2.2.1 Perception des vibrations

Il n'existe pas d'organe propre à la perception des vibrations mais un ensemble de capteurs sensoriels susceptibles d'être sollicités par une stimulation mécanique. Les effets physiologiques des vibrations sur l'homme sont dus aux déformations et aux déplacements relatifs que subissent les organes ou les tissus à certaines fréquences. Ainsi, la perception des vibrations résulte de la combinaison de perceptions d'excitations de zones particulières du corps, détectées par des capteurs appartenant à différents systèmes perceptifs. Les informations de ces capteurs donnent naissance à une sensation permettant d'évaluer l'état vibratoire dans lequel se trouve le corps.

Les systèmes perceptifs impliqués dans la perception des vibrations sont dédiés à la perception générale du mouvement, à l'orientation et à la détection de la position du corps dans l'espace. Il est possible de les classer dans les catégories suivantes :

- système vestibulaire : il permet l'orientation de la tête et par extension celle du corps dans l'espace. Il permet la détection de mouvements vibratoires en translation ou en rotation. Il est sensible aux variations d'accélération de fréquences très basses ($f = 0,1-4 \text{ Hz}$) ;
- système somesthésique : il est lui-même décomposable en sous-systèmes (cutané, kinesthésique et viscéral). C'est le système le plus sollicité par les vibrations automobiles. On considère que son domaine de sensibilité s'étend de quelques Hertz à plusieurs centaines en fonction des parties du corps sollicitées ;

- système auditif : il est composé de l'oreille et des mécanismes de traitement de l'information auditive. Il peut permettre la détection de vibrations à une intensité plus faible que celle détectable par les autres systèmes perceptifs, notamment par conduction osseuse. Sa sensibilité commence aux alentours de 20 Hz ;
- système visuel : il est composé des yeux et des mécanismes d'intégration de l'information visuelle. Il peut entrer en jeu dans la perception des vibrations par la détection de mouvements relatifs entre des objets et le corps.

Cette classification n'est pas exhaustive et ne reflète pas les importances relatives de chacun de ces systèmes dans la perception des vibrations globales du corps. L'ensemble de ces capteurs du corps humain sont eux même complexes et interagissent. Chacun d'eux possède ses propres caractéristiques et fournit une somme d'informations qui sont intégrées au niveau du système nerveux central. L'ensemble perceptif ainsi construit permet d'élaborer une représentation unifiée des relations du corps avec son environnement.

Pour comprendre la perception des vibrations globales du corps dans le contexte automobile, il est nécessaire de prendre en compte la nature des vibrations, le comportement du siège ainsi que le comportement du corps humain. Le siège est une structure en partie connue du point de vue de ses caractéristiques mécaniques et de son comportement vibratoire. Le corps humain est en revanche une structure beaucoup plus complexe dont le comportement vibratoire n'est pas parfaitement établi. Dans notre cas, la perception des vibrations du corps est fonction :

- de la zone de contact entre le corps et le siège (forme, raideur et amortissement du matériau) ;
- des caractéristiques physiques des vibrations (amplitude, fréquence, direction) ;
- de la posture et de la morphologie du sujet (taille, poids, tonus musculaire) ;
- de sa sensibilité aux vibrations ;
- de l'environnement du sujet (bruit, température) ;
- du contexte dans lequel se situe le sujet (consigne, activité cognitive).

Pour terminer, l'étude de la perception des vibrations globales du corps dans le milieu automobile nécessite d'une part la description du comportement mécanique du corps humain, et d'autre part la description des systèmes sensoriels sollicités. En effet, les propriétés biomécaniques du corps impliquent en effet que certaines zones ou systèmes sensoriels soient sollicités

plus que d'autres. L'étude du fonctionnement des différents systèmes sensoriels permet alors d'en comprendre les réactions.

A. Biomécanique du corps humain

L'étude du comportement dynamique du corps humain soumis à des vibrations globales est historiquement liée à l'étude de l'impact des vibrations sur la santé, et donc à la médecine du travail. De nombreuses études ont été effectuées, d'abord sur les maladies liées à la surexposition aux vibrations, puis sur les liens entre les caractéristiques dynamiques du corps humain et les troubles observés [DENN 01]. Si, dans le domaine automobile, les amplitudes de vibrations transmises au passager restent relativement faibles et ne constituent pas un risque pour la santé, les déformations qui causent les dégénérescences observées dans les maladies du travail sont les mêmes, à moindre échelle, que celles qui provoquent l'inconfort. Les résultats relatifs à la dynamique du corps humain, obtenus lors de l'étude de l'impact des vibrations sur la santé, sont donc très importants pour la compréhension de l'évaluation du confort automobile.

Les vibrations peuvent être transmises au corps par de nombreuses voies en fonction de l'activité d'un individu. La transmission peut se faire à l'ensemble du corps par l'intermédiaire de la surface de support (pieds d'une personne debout, séant d'un individu assis ou surface en contact avec une structure vibrante), ou uniquement de manière limitée à la partie du corps directement en contact avec la source (poignées ou pédales d'une machine vibrante, de véhicules ou d'outils perforatifs) [NF 90-400]. Dans le domaine automobile, comme la direction verticale est la direction principale de transmission des vibrations à l'organisme (Figure 2, Figure 4), seule l'étude du comportement du corps humain en position assise, soumis à des vibrations verticales, est retenue dans cette étude.

Le comportement biomécanique du corps humain influence la perception des vibrations du corps entier à travers les résonances du corps. Il est généralement admis que le corps humain, soumis à des vibrations, peut être considéré comme un système très complexe qui présente des réponses biophysiques liées à son anatomie. Son comportement dynamique a été largement étudié selon des approches mécaniques classiques (notamment par des mesures d'impédance et de transmissibilité). On considère que la réponse du corps humain est sensiblement linéaire dans la gamme d'amplitude rencontrée dans la vie courante ($A < 5 \text{ m/s}^2$). Il peut être assimilé à des masses élémentaires suspendues (tête, thorax, bassin, organes) réunies entre elles par des systèmes de ressorts et d'amortisseurs (ligaments, muscles, disques intervertébraux). Le comportement dynamique d'un tel oscillateur fait apparaître, à certaines fréquences, des phénomènes de résonances qui ne sont

pas sans conséquence. Il s'agit de fréquences auxquelles les amplitudes des oscillations des différents éléments du corps humain sont maximales. Ces fréquences de résonances sont comprises entre 1 et 100 Hz. On observe une tendance de la littérature à séparer les résonances du corps humain en deux catégories. La première regroupe les mouvements des grandes masses corporelles, tandis que la seconde concerne les sous-ensembles de masses moins importantes dont les mouvements sont plus localisés.

Le Tableau 3 synthétise les fréquences de résonances des principales parties du corps (une forte variabilité est observée selon les auteurs). Au-dessous de 2 Hz, le corps réagit comme une masse unique sans résonance interne. Chez l'homme assis, les premières résonances apparaissent entre 3 et 6 Hz puis entre 8 et 14 Hz. La première résonance correspond à des mouvements du rachis, de la tête, du thorax, des viscères ainsi que des tissus fessiers (mouvements relatifs entre le thorax et le bassin). La colonne vertébrale est fortement sollicitée puisque les mouvements de la partie supérieure du tronc peuvent être amplifiés d'un rapport de 1,5 à 4 [NF 90-400]. La seconde correspond à une compression axiale du torse et serait liée à des mouvements de rotation du bassin [DENN 01]. Concernant les fréquences de résonances de parties plus localisées du corps, un modèle simplifié des fréquences de chaque organe est présenté par la Figure 5. Des fréquences de résonances sont observées entre 4 et 5 Hz pour l'estomac, 4 et 8 Hz pour le foie, 5 et 6 Hz pour le cœur et 6 et 12 Hz pour les reins. On considère également que les vibrations de fréquences supérieures à 20 Hz sont atténuées par les parties molles du corps humain.

Partie du corps	Fréquence (Hz)
Ventre et viscères	3
Homme debout	4 – 6
Pelvis	10 – 12
Tête	20 – 30
Thorax	3 – 7
Masse Thoraco-Abdominale	4 – 8
Bassin	4 - 9

Tableau 3 : Fréquences de résonances des principales masses corporelles

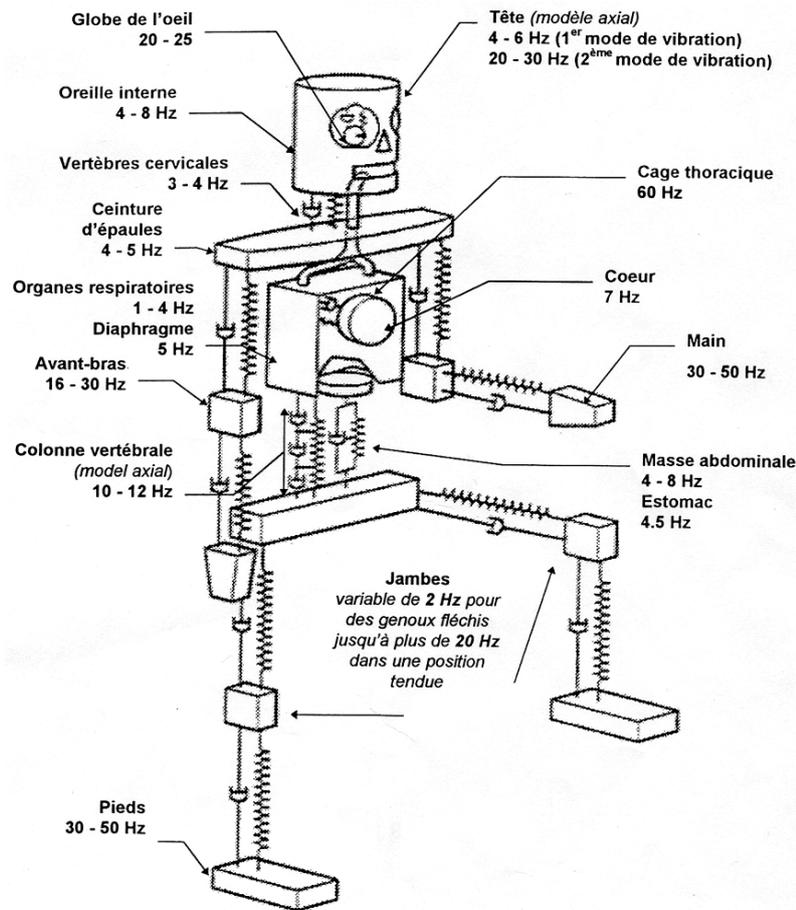


Figure 5 : Modèle théorique des principales fréquences de résonance du corps humain [GRIF 96]

Dans le cadre de l'évaluation du confort automobile, ces zones correspondent aux parties du corps principalement sollicitées et réagissent différemment en fonction du contenu fréquentiel des accélérations subies. Elles font donc émerger les zones de gêne les plus probables liées à un signal accélérométrique donné [WHIT 78].

B. Vibrations et systèmes sensoriels

B.a Réponse du système somesthésique

Dans le domaine automobile, le système somesthésique est le système le plus impliqué dans la perception des vibrations. Il recouvre un ensemble de structures réceptrices responsables de la sensibilité somatique générale. On peut délimiter trois niveaux sensoriels au sein de la somesthésie : un niveau extéroceptif, un niveau proprioceptif et un niveau intéroceptif. Le premier recouvre la sensibilité tactile codée par les mécanorécepteurs cutanés, la

sensibilité thermique et la sensibilité à la douleur ou nociceptive. Le second correspond à la sensibilité profonde musculo-articulaire, et le dernier décrit la sensibilité viscérale.

A l'exclusion des sensibilités thermiques et nociceptives, chaque niveau de sensibilité est susceptible de produire certains indices de mouvement du corps créés par des vibrations. L'étude présentée dans ce document se limite aux sous-systèmes tactiles, proprioceptifs et intéroceptifs. En effet, c'est à travers ces systèmes que sont ressenties la grande majorité des vibrations rencontrées dans un véhicule.

- Mécano-réception cutanée :

La perception de vibrations appliquées sur la peau a été étudiée en tant que sujet de psychophysique fondamentale. Elle dépend de nombreux paramètres : fréquence, aire de contact, pression, température de la peau, âge, état de santé et zone du corps sollicitée. Des études ont même démontré que des interactions entre ces paramètres existent. Verrillo rapporte par exemple une variation fréquentielle de la perception en fonction de la zone corporelle sollicitée [VERR 85].

De la surface vers la profondeur de la peau, se trouvent respectivement la couche cornée (formée de cellules mortes), l'épiderme, le derme et le tissu sous cutané (Figure 6). Les récepteurs responsables de la sensibilité mécano-réceptrice cutanée se trouvent en majorité dans le derme et le tissu sous-cutané, même si quelques-uns d'entre eux peuvent être localisés dans l'épiderme. La classification de ces mécano-récepteurs somatiques cutanés est fonction du tissu innervé, de la structure du récepteur terminal, de la fibre nerveuse afférente, ainsi que de la nature de l'information relayée par la fibre vers le système nerveux central. Ainsi, le niveau de sensation (seuil de perception) de ce système sensoriel ne dépend pas exclusivement de la sensibilité des capteurs qui le composent, mais également de la manière dont l'information est transmise au système nerveux central [BELL 02].

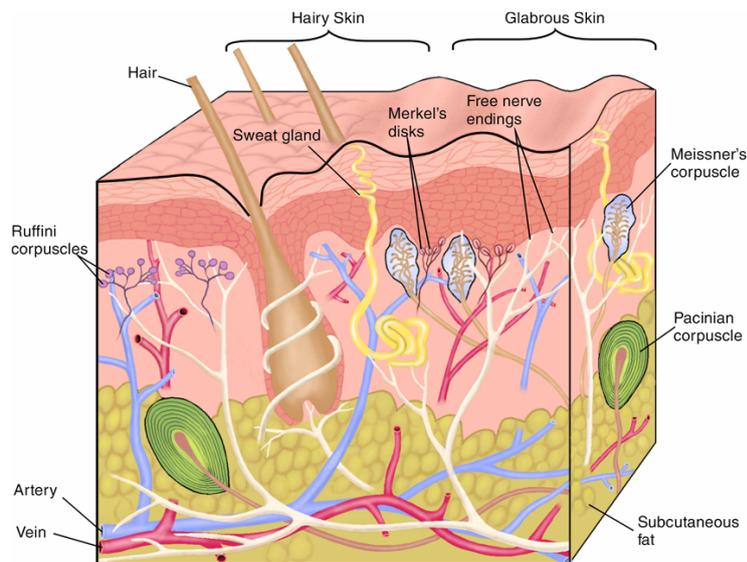


Figure 6 : Coupe schématique de la peau

Les mécano-récepteurs de la peau peuvent être classés en récepteurs de contact, de pression et de vibrations en fonction de leurs caractéristiques (Tableau 4). La perception des vibrations peut être influencée par les stimulations transitoires de tous les mécano-récepteurs de la peau. La sensibilité à la fréquence de ces récepteurs varie en fonction de leur temps de réponse. Les récepteurs à adaptation lente interviennent dans la perception des fréquences les plus basses. Les corpuscules et terminaisons nerveuses de Merkel sont sensibles entre 0 et 5 Hz, tandis que les bulbes de Ruffini sont sensibles aux vibrations entre 8 et 16 Hz [PRIE 04]. Les récepteurs à adaptation rapide sont sensibles à des plages de fréquences plus élevées. Ils participent majoritairement à la sensation vibratoire rencontrée en milieu automobile. Il s'agit des corpuscules de Pacini et des corpuscules de Meissner.

Les corpuscules de Pacini sont des récepteurs phasiques qui ne répondent ni à la vitesse ni à la durée de la stimulation. Ils sont sensibles uniquement aux variations rapides d'intensité d'un mouvement et, en conséquence, à l'accélération de la déformation cutanée. Du fait de leurs importantes propriétés d'intégration temporelle, la sensibilité de ces récepteurs varie fortement avec la fréquence. Elle est optimale pour des fréquences de vibrations de 300 Hz. Cependant, ces récepteurs qui sont localisés dans le tissu adipeux sous-cutané, les tendons, les articulations, ou les muscles de la face répondent également dans une gamme de fréquence allant de 40 à 1 500 Hz [LOFV 84]. Enfin, concernant les vibrations rencontrées dans le domaine automobile, il est généralement admis que les corpuscules de Pacini interviennent pour les fréquences supérieures à 40 Hz.

Les corpuscules de Meissner, situés immédiatement sous l'épiderme, sont couplés mécaniquement aux tissus environnants. Ce sont des récepteurs superficiels à adaptation rapide particulièrement sensibles à la vitesse d'établissement du stimulus. Ils sont localisés dans la peau glabre et détectent les variations de contact léger des objets avec la peau. Ils sont sensibles aux vibrations pour des fréquences comprises entre 5 et 200 Hz. Leur amplitude de réponse est toutefois moins dépendante de la fréquence que celle des corpuscules de Pacini. Pour l'automobile, il est admis qu'ils contribuent majoritairement à la perception des vibrations aux fréquences inférieures à 40 Hz.

	Structure du récepteur Type de réponse	Information relayée
Zones Glabres	Terminaisons nerveuses de MERKEL (Récepteurs superficiels à adaptation très lente)	Indentation cutanée prolongée Détecteurs de position et de vitesse $f < 5$ Hz
	Bulbes terminaux de RUFFINI (Récepteurs profonds à adaptation lente)	Indentation cutanée prolongée Détecteurs de position (sensibilité 10 fois supérieure aux précédents) Détecteurs de vitesse $8 < f < 16$ Hz
	Corpuscules de MEISSNER (Récepteurs superficiels à adaptation rapide)	Indentation cutanée Détecteurs de vitesse Détecteurs transitoires de vibrations $f < 40$ Hz
	Corpuscules de PACINI (Récepteurs profonds à adaptation très rapide)	Détecteurs transitoires de vibrations $f > 40$ Hz
Zones Pileuses	Corpuscules de MERKEL (Récepteurs à adaptation lente type I)	Indentation de la peau Détecteurs de position et de vitesse
	Bulbes terminaux de RUFFINI (Récepteurs à adaptation lente type II)	Indentation de la peau Détecteurs de position et de vitesse
	Terminaison folliculaires G et T (Récepteurs à adaptation rapide)	Mouvement du poil Détecteurs de vitesse
	Terminaison folliculaires D (Récepteurs à adaptation rapide)	Mouvement du poil Détecteurs de vitesse
	Mécanorécepteurs de type C	Mouvement lent sur la peau Détecteurs de vitesse
	Corpuscules de PACINI (Récepteurs profonds à adaptation très rapide)	Détecteurs transitoires de vibrations

Tableau 4 : Classification des mécano-récepteurs [PRIE 04]

- Proprioception :

La transmission des vibrations au corps humain peut être aussi liée à la perception de tissus plus profonds que ceux de la peau. A travers les résonances du corps humain ou lors de débattements de forte amplitude, les muscles interviennent quelquefois dans la perception des vibrations par la proprioception.

Responsable de la sensibilité profonde de l'appareil locomoteur, le système proprioceptif permet de connaître la position de notre corps dans

l'espace et celle de nos membres par rapport à notre corps. Il se divise en deux sous-ensembles de récepteurs [BUSE 82]. Ainsi, il est possible de distinguer, d'une part des mécanorécepteurs sensibles aux variations de longueurs et tensions musculaires (Figure 7), et d'autre part des mécanorécepteurs qui vont coder des informations sur les angles extrêmes des articulations.

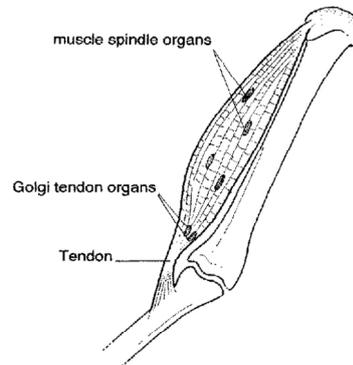


Figure 7 : Mécano-récepteurs musculaires

La première catégorie de récepteurs directement liés au muscle comprend les terminaisons des fuseaux neuromusculaires (« muscle spindle ») et les organes tendineux de Golgi. Les fuseaux neuromusculaires sont sensibles à l'étirement des muscles. L'information relayée par ces capteurs dépend naturellement du type de fibre afférente ainsi que de la nature et de la morphologie du récepteur. Les organes tendineux de Golgi présentent une sensibilité dynamique très développée et renseignent le système nerveux central sur les variations de la force contractile du muscle (capteur de force en série avec le muscle). Ils sont responsables de la gêne musculaire que peut ressentir le passager d'un véhicule en phase de roulage (muscles abdominaux, des jambes, des bras, etc.).

Les récepteurs situés au niveau des articulations sont, eux, composés des corpuscules de Ruffini et des corpuscules de Pacini dans les capsules articulaires, des corpuscules de Golgi dans les ligaments, et de terminaisons libres. Là encore, la différence structurale de ces récepteurs induit des sensibilités spécifiques. Les corpuscules de Ruffini, les plus nombreux, sont connus pour coder à la fois des positions et des mouvements articulaires. Toutefois, ils ne répondent à ces stimulations que dans une certaine limite d'angle appelé « angle d'activation », situé autour des positions de flexion ou d'extension maximale [BUSE 82]. Il s'agit de récepteurs à adaptation lente, dont la sensibilité est par conséquent maximale entre 8 et 16 Hz. Cependant, dans le domaine automobile, ils ne sont que peu sollicités.

B.b Réponse du système vestibulaire

Le rôle principal de l'appareil vestibulaire est de détecter l'ensemble des mouvements de la tête selon les six degrés de liberté de l'espace (trois en rotation, trois en translation). En tant qu'organe sensible aux accélérations, il peut bien sûr intervenir dans la perception des vibrations.

De chaque côté de la tête, encastré dans l'ossature de l'oreille interne, un ensemble très complexe d'organes sensoriels s'appelle les labyrinthes (Figure 8). Chaque labyrinthe comprend la cochlée, organe de l'audition, trois canaux semi-circulaires et deux organes otolithiques : le saccule et l'utricule. Les canaux semi-circulaires et les otolithes sont indépendants des fonctions auditives et constituent l'appareil vestibulaire. Alors que les canaux semi-circulaires sont des récepteurs dynamiques répondant au changement de vitesse angulaire, les otolithes ont à la fois une fonction dynamique et statique. Ils signalent les changements d'orientation qui accompagnent les mouvements angulaires, les changements de vitesse linéaire au niveau de la tête, mais aussi l'orientation statique de la tête par rapport à la gravité [BENS 90].

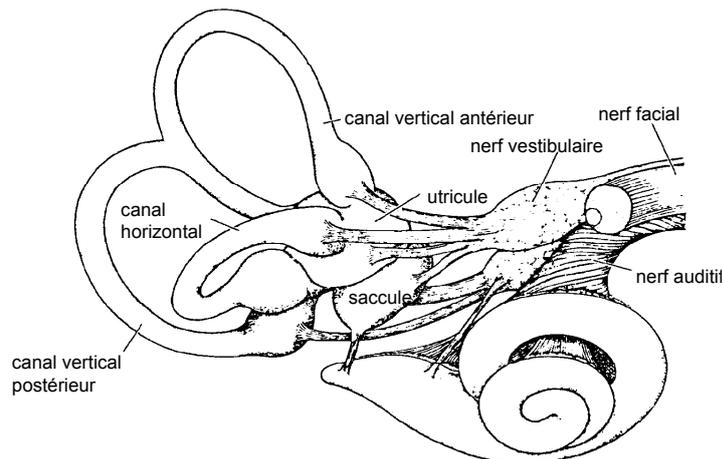


Figure 8 : Système vestibulaire

La description du fonctionnement des otolithes et des canaux semi-circulaires permet de comprendre les mécanismes qui peuvent intervenir dans la perception des vibrations au niveau de la tête. Même si dans le domaine automobile ils sont peu sollicités, les otolithes et les canaux semi-circulaires contribuent à la sensation de vibrations par la détection de très basses fréquences créées par les mouvements du corps humain (battements, non-linéarités).

- Les organes otolithiques :

Les organes otolithiques permettent de détecter des mouvements de translation. Ils prennent la forme de deux « sacs » comprenant chacun une plaque

d'épithélium sensoriel, la macula. Ces macules comportent des cellules sensorielles munies de cils dont la pointe s'enfonce dans une membrane gélatineuse baignant dans un liquide visqueux, l'endolymphe (Figure 9). De nombreux cristaux de calcite sont incrustés dans la membrane. Lorsque la tête est inclinée, la membrane glisse le long de la macula.

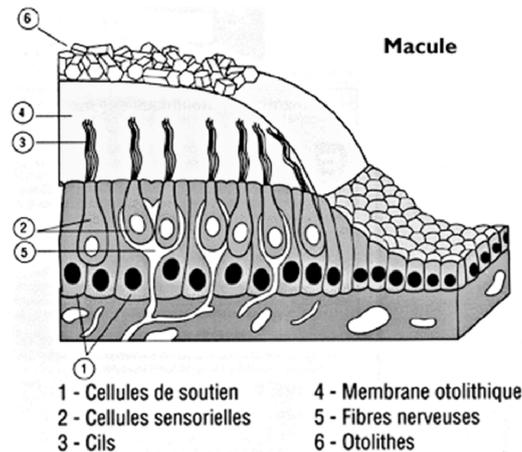


Figure 9 : Organes otolithiques

Lorsqu'une accélération est appliquée dans le plan de la macula, les cristaux, par inertie, se déplacent moins vite. Une force de cisaillement s'exerce alors entre les cristaux et la base, induisant un mouvement des cils qui provoque des décharges nerveuses dans les cellules sensorielles. Ces décharges, conduites par le nerf vestibulaire, renseignent le cerveau sur l'amplitude de l'accélération.

Ce principe de fonctionnement s'applique aux deux organes otolithiques, le saccule et l'utricule. Ceux-ci ne diffèrent que par leur orientation. Lorsque la tête est tenue droite, les macules utriculaires se trouvent dans un plan approximativement horizontal et les macules sacculaires dans un plan vertical. La combinaison des informations émanant de l'ensemble des macules permet au système nerveux central d'être renseigné sur les forces inertielles s'exerçant sur la tête, quelles que soient leurs directions.

Les seuils de détection des accélérations linéaires sont très bas. Dans l'obscurité, une accélération constante de $0,6 \text{ m/s}^2$ peut être perçue dans les deux directions horizontales. Ce seuil correspond à une durée d'accélération de l'ordre de 5 secondes. Des expériences ont également montré que la réponse maculaire à des accélérations dépend fortement de leur contenu spectral [BENS 89] [BENS 90]. Le seuil d'accélération auquel sont sensibles les otolithes apparaît en effet plus bas ($0,5 \text{ m/s}^2$) pour un profil d'accélération en forme d'échelon de Heaviside [GIAN 96], que pour des profils d'accélération en rampe ($0,12 \text{ m/s}^2$) ou parabolique ($0,16 \text{ m/s}^2$).

Ces organes sont capables de détecter des vibrations dans toutes les directions de l'espace. Walsh met en évidence, grâce à l'étude de sujets déficients, l'importance de cet organe dans la perception d'oscillations longitudinales et transversales du corps entier. Dans son expérience, les sujets sont allongés et la fréquence des vibrations utilisées est de 0,4 Hz [WALS 61]. Il s'avère que les sujets sont surtout sensibles aux vibrations basses fréquences. Leur sensibilité est très grande ($0,2 \text{ m/s}^2$) et leur réponse est constante entre 0,3 et 5 Hz.

- Les canaux semi-circulaires :

Les canaux semi-circulaires sont des détecteurs d'accélération angulaire. Chaque canal présente un arc et une ampoule, zone renflée située près de l'utricule et remplie d'endolymphe (Figure 10). L'ampoule contient une formation sensorielle, la crête ampullaire. Cette crête est formée d'une assise de cellules ciliées, ressemblant de très près aux cellules des macules utriculaires et sacculaires, et disposées en dôme. Les cils de ces cellules sont emprisonnés dans la cupule, volet gélatineux qui s'étend de la surface de la crête à la paroi opposée de l'ampoule, obturant complètement la lumière du canal. La cupule est plus mobile en son centre qu'au niveau de ses attaches périphériques avec les parois de l'ampoule. Elle est aussi plus dense que l'endolymphe, d'où une inertie importante du système cupulo-endolymphe, dont le fonctionnement est assimilable à celui d'un oscillateur amorti.

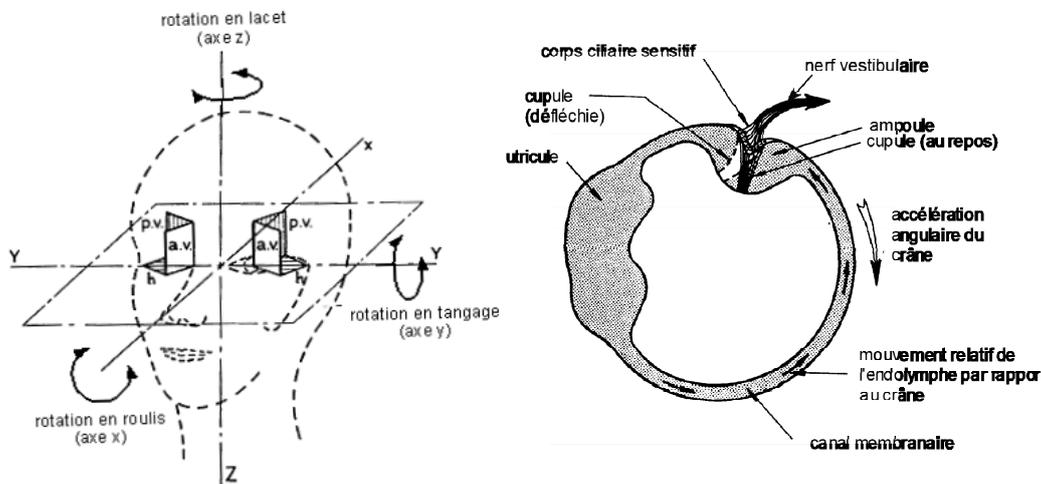


Figure 10 : Canaux semi-circulaires

Les trois canaux semi-circulaires sont situés dans des plans presque orthogonaux. Il s'agit du canal vertical postérieur, du canal vertical antérieur et du canal horizontal. Bien que les axes des canaux semi-circulaires ne correspondent pas exactement aux axes de référence des mouvements de la tête,

on désigne souvent les canaux d'après ces axes : les canaux horizontaux sont les canaux des mouvements en lacet, les canaux verticaux postérieurs sont les canaux des mouvements en roulis et les canaux verticaux antérieurs sont les canaux des mouvements en tangage.

Les canaux horizontaux sont les plus sensibles et peuvent détecter une accélération de $0,14 \text{ }^\circ/\text{s}^2$. Pour les autres canaux, le seuil moyen est de $0,5 \text{ }^\circ/\text{s}^2$ [PRIE 04]. En conclusion, les canaux semi-circulaires, comme les otolithes, interviennent dans la perception des rotations de très basses fréquences (réponse constante entre 0,3 et 5 Hz) et possèdent une sensibilité élevée.

B.c Réponse du système visuel

La vision participe à l'évaluation du mouvement et peut par conséquent intervenir dans la perception des vibrations. Les centres cérébraux chargés d'analyser l'information fournie par l'œil sont organisés en deux systèmes. L'un est essentiellement chargé de localiser les objets, de repérer les lieux et les positions, et l'autre est chargé de les identifier, d'analyser leur forme et leurs qualités [SCHN 69]. Cette distinction fonctionnelle prend son point de départ dans la rétine. En effet, les photorécepteurs sont localisés dans la rétine. Sa partie centrale, ou fovéa, est celle qui permet la discrimination fine. C'est là que l'acuité est maximale. Elle est donc particulièrement bien adaptée à l'analyse des détails d'un objet fixé. A l'opposé, la rétine périphérique couvre un champ visuel large, mais sa résolution spatiale est faible. Les cellules qui la composent sont plus adaptées à la détection des changements de luminance, c'est-à-dire des mouvements, perçus en périphérie.

Un mouvement devient visuellement apparent quand il est perceptible par la rétine de l'œil, c'est-à-dire un changement de la distribution de l'illumination. La perception visuelle du mouvement d'un objet dépend principalement de l'amplitude et de la vitesse de déplacement de l'image se formant sur la rétine. Ceci peut venir d'un mouvement de la tête, d'un mouvement de l'œil, du mouvement d'un objet relativement à un autre à l'intérieur du champ de vision.

Plus concrètement, la perception de vibration par le système visuel est principalement créée par des mouvements apparents de surfaces, des oscillations au niveau de sources lumineuses, ou bien des reflets sur des surfaces en mouvements. Dans ce dernier cas, les mouvements d'amplitudes extrêmement faibles peuvent conduire à des variations d'illumination très importantes sur la rétine. Dans le contexte automobile, il peut s'agir par exemple de mouvements visibles de la planche de bord par rapport à l'environnement extérieur, ou encore de vibrations des rétroviseurs. De plus, en très basses fréquences, le contrôle vestibulaire du mouvement des yeux (reflexe

vestibulo-oculaire) peut conduire à une amplification des vibrations perçues par le globe oculaire [PRIE 04]. La sensibilité du système vestibulo-oculaire s'étendrait jusqu'à 6 Hz [NF 90-400].

B.d Réponse du système auditif

La perception acoustique de vibrations peut découler soit d'une transmission aérienne soit d'une transmission osseuse du son. Dans le cas d'une transmission aérienne, il se peut qu'une structure vibrante en contact ou située dans l'entourage d'un sujet donne naissance à un rayonnement sonore. L'oreille, au même titre que les yeux en présence d'un visuel en mouvement, informe alors le sujet de la présence de vibrations. Dans le cas d'une transmission osseuse des vibrations vers l'appareil auditif, les structures cochléaires sont mises en mouvement sans l'intervention de la chaîne tympano-ossiculaire. Le tube osseux vibre et, malgré l'absence de mouvement de l'étrier, la propagation des vibrations le long de la membrane basilaire est identique à celle existant en conduction aérienne [LOTH 97]. La structure même de l'oreille moyenne réduit cependant la transmission des vibrations osseuses à la cochlée [MOOR 03]. L'orientation des osselets par rapport au crâne et la proximité du centre de gravité de la chaîne ossiculaire de leur axe de rotation font que toute la chaîne d'osselets vibre avec le crâne. Ce comportement dynamique atténue la transmission des mouvements à la cochlée, qui n'a lieu que s'il existe un mouvement différentiel entre les osselets et le crâne.

Le seuil de l'audition en conduction osseuse demeure plus élevé qu'en conduction aérienne, soit environ 35 dB de plus [ISO-8253-1]. Ainsi a-t-il été rapporté par Griffin qu'un sujet pouvait détecter les vibrations, d'une surface rigide sur laquelle il était assis, à un seuil 10 fois inférieur à celui requis pour la sentir [GRIF 96]. La fréquence des vibrations utilisées dans cette expérience est de 63 Hz. Cette fréquence appartient au domaine de sensibilité de l'oreille humaine (20 - 20000 Hz). Toutefois, cette dernière peut intervenir dans la détection de vibrations de plus basses fréquences. En effet, à travers les résonances et les non-linéarités du corps, des vibrations de fréquences inférieures à 20 Hz peuvent donner naissance à des mouvements de fréquences plus élevées (« body-born sound »). La grande sensibilité de l'oreille permet alors d'entendre une vibration d'amplitude inférieure au seuil de perception vibratoire. Toutefois, si la majeure partie de l'énergie vibratoire d'une automobile est dissipée dans le corps de son occupant dans une gamme de fréquences susceptibles de faire apparaître ce type de phénomène, les niveaux d'expositions n'atteignent que très rarement les amplitudes nécessaires à une non-linéarité de la réponse du corps. Ce phénomène n'intervient donc quasiment pas dans la perception des vibrations automobiles.

C. Synthèse

La perception des vibrations du corps, considérée comme une modalité à part entière dans cette étude, repose sur un ensemble de systèmes perceptifs complexes. Ses propriétés résultent de la structure même des sous-systèmes qui le composent, de leur sensibilité et de leur dépendance fréquentielle. Ainsi, la sensation vibratoire dépend véritablement de l'intégration des informations issues des sous-systèmes cutanés, vestibulaires, visuels et auditifs. Leur sollicitation reste elle-même dépendante du type de stimulus et des résonances du corps humain.

Dans le domaine automobile, à cause du contenu fréquentiel des vibrations rencontrées, la sensation vibratoire ressentie par le passager d'un véhicule en phase de roulage dépend essentiellement de la réponse du système somesthésique. Composé de capteurs très différents implantés dans plusieurs parties du corps (peau, muscles), les propriétés perceptives de ce système sont très délicates à évaluer, car elles dépendent fortement des conditions de stimulation. Par exemple, si les seuils de perception des mécano-récepteurs de la peau du doigt peuvent être déterminés très précisément en laboratoire, ce n'est pas le cas pour des récepteurs plus profonds, situés dans les muscles, en situation réelle. Elles ne permettent donc pas de prédire avec précision les sensibilités de l'occupant d'un véhicule et ne peuvent être directement reliées au domaine automobile.

L'étude de la perception des contraintes imposées à l'occupant d'un véhicule passe alors par une approche psychophysique de sa situation. Morioka et al. parviennent ainsi, par la comparaison des seuils de perceptions de vibrations horizontales et verticales (du corps, de la main et des pieds), à associer très précisément la forme particulière de l'ensemble des seuils au rôle des corpuscules de Pacini dans le fonctionnement du système somesthésique [MORI 08].

2.2.2.2 Psychophysique

Comme tous les sens physiologiques (vue, ouïe, toucher, perception du temps ou du mouvement, etc.), la perception vibratoire a fait l'objet de nombreuses études psychophysiques pour déterminer les liens qui existent entre l'exposition à un stimulus physique et la sensation qui en résulte. De nombreux travaux, principalement issus de l'acoustique, cherchent à établir précisément les relations quantitatives entre les propriétés physiques des vibrations et leur perception. Si le nombre et la richesse des études existantes sur les vibrations sont faibles en comparaison de l'acoustique [MOOR 03], ces recherches n'en sont pas moins essentielles à la compréhension de l'évaluation du confort vibratoire automobile. En effet, bien que celles-ci ne tiennent pas compte de la composante cognitive des évaluations de confort vibratoire liée à

l'environnement automobile, elles permettent de quantifier le ressenti d'un individu face à une situation donnée et peuvent être intégrées aux processus de conception des véhicules.

A. Seuils absolus

Les seuils de perception et les fonctions psychométriques constituent la base de l'étude psychophysique de la perception des vibrations. Leurs définitions sont intimement liées. La fonction psychométrique décrit la réponse d'un individu ou d'un groupe d'individus à l'amplitude d'un stimulus. Dans le cas de la perception des vibrations par l'ensemble du corps, elle prend la forme de la probabilité $P(L)$ de détection correcte d'un mouvement vibratoire en fonction de son niveau global. La détermination de cette fonction nécessite de mesurer la dépendance de la détection d'une vibration pour de nombreux niveaux. De plus, la fonction psychométrique dépend des propriétés physiques des stimuli utilisés (contenu fréquentiel, durée). La généralisation des résultats conduit donc à des études très longues à mettre en place. Une approche plus pratique consiste à ne mesurer qu'un seul point de la fonction psychométrique pour plusieurs fréquences. Il s'agit de la mesure des seuils. Une probabilité de détection de stimuli en fonction de son niveau (par exemple $P(L) = 50\%$) est ainsi définie comme étant le seuil de perception. Ce seuil est alors mesuré directement pour différentes fréquences par des méthodes psychophysiques spécifiques.

Contrairement à la modalité acoustique, il n'existe pas de standard international concernant le niveau liminaire de référence pour la perception des vibrations. Seule la norme ISO-2631 stipule que « 50% des personnes alertes et aptes arrivent tout juste à détecter une vibration pondérée W_k d'une intensité crête de $0,015 \text{ m/s}^2$ ». La norme souligne également qu'il y a de grandes variations entre les individus concernant leur capacité à percevoir les vibrations. Selon cette norme, le seuil de perception médian est de l'ordre de $0,015 \text{ m/s}^2$ alors que l'écart interquartile des réponses peut aller de $0,01 \text{ m/s}^2$ à $0,02 \text{ m/s}^2$ (accélération de crête).

De nombreuses synthèses de la littérature sur la détermination des seuils de perception des vibrations globales du corps ont été effectuées [HANE 70] [MCKA 72] [GUND 78] [HOWA 89]. Les études présentées concernent les vibrations du corps dans les directions verticales (O_z) et horizontales (O_x et O_y) dans les positions debout, assise et allongée. Seules les études relatives aux vibrations verticales du corps assis concernent directement l'étude du confort automobile. Cependant certaines études effectuées sur des sujets debout sont toutefois commentées car leurs résultats sont souvent proches de ceux de la posture assise. Enfin, seules les expériences qui font intervenir des méthodes psychophysiques établies et qui présentent des détails suffisants sur les stimuli sont commentées.

A.a Méthodes de mesure

Plusieurs méthodes psychophysiques déterminent les seuils de perception des vibrations verticales du corps. Elles diffèrent par leur protocole et par les analyses qui leur sont associées, et introduisent ainsi des biais qui peuvent être à l'origine des écarts observés dans les résultats. Par exemple, la présentation répétée d'un stimulus vibratoire d'amplitude proche du seuil de perception entraîne chez un même sujet une réponse non constante. Ainsi, le sujet indique certaines fois « sentir le stimulus » et certaines fois « ne pas le sentir ». De plus, les individus diffèrent à la fois par leur capacité à ressentir les stimuli de faibles amplitudes, et à la fois par leur tendance à déclarer la certitude de leur ressenti (certains signalent une sensation sans la moindre hésitation tandis que d'autres hésitent à se prononcer). Pour toutes ces raisons, les différentes méthodes de mesures de seuil tendent à produire des résultats différents. Il convient alors d'écrire, de manière précise, chacune de ces méthodes.

La méthode d'ajustement consiste à faire augmenter ou diminuer l'amplitude d'un stimulus directement par le sujet qui répète l'opération jusqu'à son seuil de perception. L'amplitude du stimulus peut également être augmentée ou diminuée par l'expérimentateur selon que le sujet indique « qu'il perçoit » ou « qu'il ne perçoit pas » le stimulus. Dans les deux cas, la valeur retenue est la plus petite valeur d'amplitude à partir de laquelle le sujet déclare percevoir le stimulus. Une autre méthode consiste aussi à utiliser une échelle de notations sur laquelle le sujet doit indiquer sa sensation (exemple : « juste perceptible », « perceptible », « facilement perceptible », etc.). Toutes ces méthodes sont relativement faciles à mettre en oeuvre mais le principal inconvénient est que leurs résultats dépendent fortement de l'interprétation des instructions par les sujets.

La méthode des limites consiste à présenter en premier un stimulus ayant une forte probabilité de détection. Si une réponse positive est donnée par le sujet, l'amplitude du stimulus suivant est réduite. Si la réponse est de nouveau positive, l'amplitude est réduite dans la même proportion. Cette procédure est répétée tant qu'une réponse négative n'est pas donnée par le sujet. La valeur moyenne de l'amplitude des 2 derniers stimuli est alors retenue comme valeur de seuil. Il existe d'autres variations pour cette méthode. L'une d'entre elles consiste par exemple à présenter en premier un stimulus de niveau trop faible pour être perçu et d'augmenter son niveau au fur et à mesure. Il est même possible de combiner les approches ascendantes et descendantes pour augmenter la fiabilité des résultats. Cette méthode est utilisée lorsqu'une estimation rapide du seuil de perception est recherchée. Comme pour la méthode des stimuli constants (présentée ultérieurement), son principal inconvénient est la précision qui reste liée aux paramètres expérimentaux.

La méthode des stimuli constants implique que la présentation de stimuli de niveaux différents soit faite dans un ordre aléatoire pour éviter que le sujet identifie la séquence de présentation des stimuli [GELF 98]. La tâche du sujet consiste à indiquer s'il perçoit ou pas chaque stimulus. Cette méthode est utilisée pour déterminer la fonction psychométrique d'un sujet. La dynamique d'amplitude présentée et les différences d'amplitudes entre deux stimuli sont identiques pour tous les sujets. Dans le cas de la mesure du seuil perceptif, ils doivent être choisis de manière à approcher au maximum la valeur du seuil. Ils doivent donc avoir été déterminés lors d'expériences préliminaires. Les phases d'ajustement de ces paramètres sont très importantes. Le choix du pas de différence d'amplitude conditionne la précision du résultat (une valeur trop élevée peut conduire à une imprécision importante sur la valeur du seuil). La dynamique des niveaux présentés aux sujets conditionne la durée de l'expérience. Il convient donc d'utiliser une plage d'amplitude très proche du seuil pour ne pas évaluer une trop grande partie de la fonction psychométrique. L'avantage de cette méthode est de proposer une plus grande précision que la méthode d'ajustement et que la méthode des limites. Son principal inconvénient est le grand nombre d'échantillons qu'elle nécessite, ce qui la rend très longue à mettre en place.

Toutes ces méthodes introduisent un biais (dispersion inter-individus) dans les résultats car elles sont fortement dépendantes de la consigne donnée au sujet et de la manière dont il l'interprète. Parson et al. rapportent ainsi que l'amplitude la plus faible à partir de laquelle les sujets déclarent pouvoir ressentir de manière sûre une vibration (« definitely feel ») est à peu près 2 fois plus élevée que celle à partir de laquelle ils déclarent être sûrs de ne plus la ressentir (« definitely not feel ») [PARS 88].

La théorie de détection du signal peut également être utilisée pour mesurer un seuil de perception absolu [LICK 64]. Il s'agit d'une théorie mathématique de la détection d'un stimulus par un sujet qui permet de s'affranchir de sa tendance plus ou moins marquée à se prononcer sur sa perception. L'hypothèse avancée est que la détection d'un signal dans un bruit suit une loi normale. Un taux de répartition des détections correctes et des fausses détections est défini. A partir de ce taux, on décide que la répartition n'est plus aléatoire, mais liée à la détection d'un signal. Dans le cas de la mesure d'un seuil, pour un niveau de stimulus donné, les nombres de détections correctes, de rejections correctes, de faux négatifs et de faux positifs sont comparés à un taux établi. Lorsqu'il y a accord, l'amplitude du stimulus est considérée correspondre au seuil de perception. Parsons et al. ont comparé les résultats de la méthode d'ajustement et de la théorie de détection du signal [PARS 88]. Dans ce cas particulier, la mesure du seuil à partir de la théorie de détection du signal (75% de détections correctes et 25% de faux positifs)

conduit à une courbe de seuil proche de celle obtenue par méthode d'ajustement pour le critère « definitely not feel » [PARS 88]. Cette observation illustre l'importance du biais introduit par les autres méthodes.

Enfin, il existe des méthodes de type « up-down » ou « AFC » (Alternative Forced Choice) [LEVI 71]. Ces méthodes figurent de nos jours parmi les méthodes de références pour la mesure des seuils de perception vibratoire. Comme pour la méthode des limites et la méthode d'ajustement, il s'agit d'une méthode dans laquelle les amplitudes et le nombre de stimuli présentés aux sujets dépendent de leurs réponses. Il existe plusieurs variantes. La plus simple d'entre elles permet d'estimer le seuil de perception de manière très efficace ($P(L) = 50\%$). Comme pour la méthode des limites, l'amplitude des stimuli est réduite après chaque réponse positive. Cependant, l'expérience n'est pas stoppée dès la première réponse négative. Un stimulus dont l'amplitude est ré-augmentée est alors présenté au sujet jusqu'à la nouvelle obtention d'une réponse positive. Il est recommandé de continuer cette procédure pour au moins six inversions successives. Cette technique a l'avantage d'être très efficace : les échantillons convergent rapidement vers la valeur du seuil propre à chaque sujet. Elle permet également de tenir compte d'une éventuelle variation de la grandeur mesurée au cours du test. Toutefois, elle nécessite, comme la méthode des stimuli constants, un choix judicieux des paramètres de pas et d'amplitude initiale, au risque de perdre en efficacité. Cette difficulté peut être contournée en utilisant un pas décroissant au fur et à mesure de l'expérience, assurant ainsi un taux de convergence maximal à la méthode. Les méthodes « up-down transformées » (« x down – y up ») utilisent ainsi un critère différent pour modifier l'amplitude des stimuli suivants. Elles sont utilisées pour déterminer d'autres points de la fonction psychométrique. Les valeurs classiquement utilisées dans la littérature sont « 2 down – 1 up » et « 3 down – 1 up ». Elles permettent de mesurer respectivement les points de la fonction psychométrique tels que $P(L)=70\%$ et $P(L)=80\%$.

A.b Etat de l'art

Les seuils de perception des vibrations verticales du corps rapportées dans les expériences faisant référence à ce sujet sont présentés sur la Figure 11. Quelques tendances générales se dessinent malgré les disparités observées selon les auteurs. Les différences de posture, les caractéristiques des stimuli et les méthodologies employées expliquent en grande partie la dispersion des résultats.

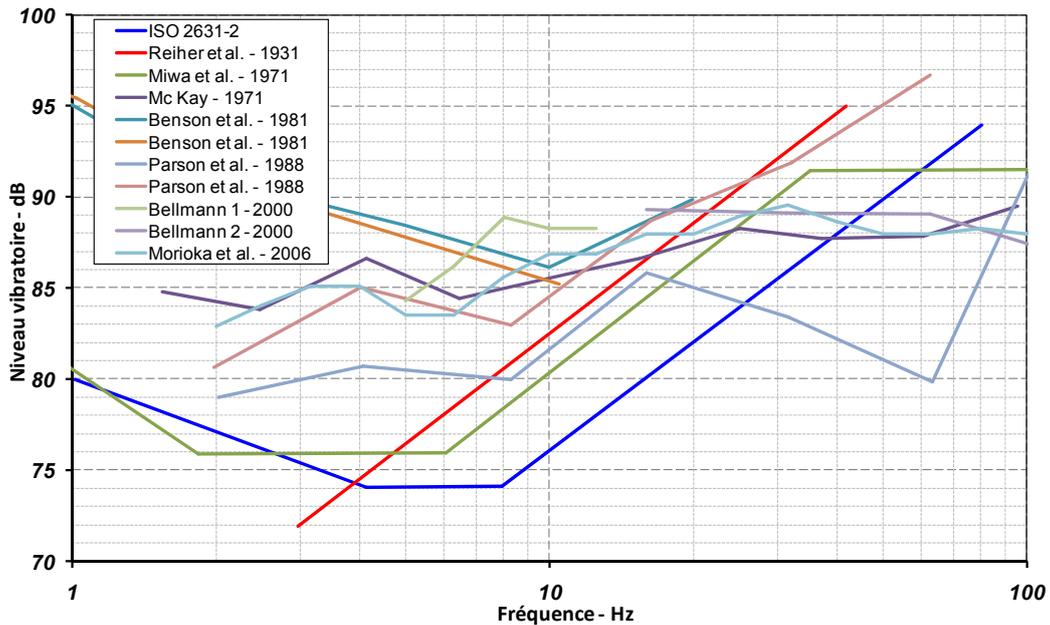


Figure 11 : Seuils de perception des vibrations verticales du corps (position assise)

La Figure 11 présente la courbe de seuil de perception des vibrations verticales publiée par Reiher et al. [REIH 31]. Ces auteurs ont étudié les seuils de perception des vibrations selon les directions O_x , O_y et O_z en position assise et debout. Dix sujets ont été exposés à des vibrations sinusoïdales de fréquences comprises entre 3 Hz et 70 Hz et d'amplitudes comprises entre 0,001 mm et 10 mm. La durée d'exposition aux stimuli est de 5 minutes. Les sujets évaluent les vibrations sur l'échelle sémantique suivante : « Non perceptible », « Faiblement perceptible », « Facilement perceptible », « Fortement perceptible », « Déplaisant » et « Fortement déplaisant ». Les résultats sont divisés en sections en traçant les lignes de frontières entre les différents indicateurs sémantiques. Le seuil de perception est ainsi défini comme la courbe la plus basse, c'est-à-dire la limite entre les indicateurs « Non perceptibles » et « Faiblement perceptibles ». Les auteurs ne fournissent de détails ni sur le type de données traitées ni sur la méthode employée pour déterminer la position de la courbe frontière. Ils avancent cependant l'hypothèse que la courbe de seuil correspond à un produit « amplitude x fréquence » constant, ce qui signifierait que le seuil est proportionnel à la vitesse des mouvements. Malgré le manque de précision des méthodes utilisées par les auteurs pour l'obtention de cette courbe, il semble opportun de l'inclure à cette étude de par ses similitudes importantes avec la norme ISO 2631-2. En effet, la courbe de seuil révèle, à des fréquences supérieures à 8 Hz, une dépendance fréquentielle identique à celle du standard international en vigueur, même si elle indique une plus grande sensibilité aux accélérations.

Miwa et al. évaluent les seuils de perception de sujets assis, debout et allongé [MIWA 71]. Les directions verticales et horizontales de mouvement sont étudiées pour des fréquences comprises entre 0,5 et 300 Hz (position assise). Les sujets sont exposés à des vibrations sinusoïdales d'amplitude constante suivies d'une pause. Après la pause, le stimulus est répété avec une amplitude amplifiée de 0,1 dB. La durée des stimuli est de 3 secondes pour les fréquences supérieures à 10 Hz et de 6 secondes pour les fréquences plus basses. Les résultats se présentent sous la forme de courbes de seuil ajustées sur les points mesurés. Les contours sont constitués de droites à accélération, vitesse et déplacement constants. Le seuil ainsi obtenu est similaire à celui proposé par la norme ISO-2631-2 mais légèrement décalé en fréquences.

Mc Kay étudie également le seuil de perception des vibrations verticales du corps en position assis ou levé dans une bande de fréquence comprise entre 1.5 Hz et 100 Hz [MCKA 72]. La consigne des sujets consiste à évaluer la durée d'une exposition à un stimulus vibratoire. Une série de stimuli d'amplitude croissante (+ 0,001 g) est présentée aux sujets pour chaque fréquence. Deux critères de perceptions sont comparés : la plus faible accélération pour laquelle deux jugements corrects sur trois sont faits par les sujets, et la plus faible accélération à laquelle 100 % de jugements positifs sont consignés. Le seuil obtenu varie peu dans la bande de fréquence considérée. La norme ISO-2631-2 laisse apparaître une plus forte dépendance du seuil que celle que les auteurs obtiennent.

Benson et al. déterminent le seuil de perception de sujets assis, exposés à des vibrations verticales de fréquences comprises entre 0.2 et 20 Hz [BENS 81]. La méthode utilisée consiste à présenter en ordre aléatoire deux séries de sinusoides de même fréquence dont l'amplitude varie par palier. La première série commence à un niveau supérieur au seuil et décroît. L'autre commence à un niveau inférieur au seuil pour s'accroître au fur et à mesure. Ainsi, lorsqu'un sujet indique qu'il peut percevoir un stimulus, l'amplitude plus basse du palier suivant lui est présentée. Au contraire, lorsque le sujet ne perçoit pas le stimulus, le suivant lui est présenté avec une amplitude plus grande. Cette procédure est répétée jusqu'à ce que les amplitudes croissantes et décroissantes convergent. La valeur de seuil obtenue est plus élevée que celle de la norme ISO 2631-2 mais la dépendance fréquentielle est très proche.

Parson et al. comparent plusieurs méthodes d'évaluation d'un seuil perceptif [PARS 88]. Pour cela, ils emploient la théorie de détection du signal pour évaluer le seuil de perception des vibrations verticales de sujets assis et debout entre 2 et 100 Hz. Les sujets sont ainsi interrogés sur leur perception des vibrations à des instants particuliers (bien qu'ils puissent y être soumis ou pas). Le seuil est fixé à l'amplitude pour laquelle 75% de bonnes réponses et 25% de fausses bonnes réponses sont observées. Le seuil de perception ainsi obtenu

indique plus de sensibilité à l'accélération pour des fréquences supérieures à 31,5 Hz et moins de sensibilité pour des fréquences inférieures à 31,5 Hz que ne l'indique la norme ISO-2631-2. Les auteurs utilisent aussi la méthode d'ajustement pour déterminer le seuil. Pour les fréquences inférieures à 31,5 Hz, le seuil est situé entre 5 et 10 dB au-dessus de celui obtenu par détection du signal. Cette méthode fait également apparaître une moins grande sensibilité aux fréquences supérieures à 31,5 Hz. Une telle dépendance fréquentielle est proche de celle donnée par la norme ISO-2631-2.

Bellmann étudie le seuil de perception des vibrations globales du corps par la méthode « adaptive AFC 1 up – 2 down » [BELL 02]. 17 sujets sont soumis à des vibrations sinusoïdales de fréquences comprises entre 5 et 200 Hz. La taille des incréments de niveau varie de 8 dB à 1 dB au fur et à mesure de l'expérience. La courbe de seuil obtenue est très différente de la norme ISO-2631-2. Le seuil de perception est largement plus élevé pour les fréquences inférieures à 31,5 Hz. Sa dépendance fréquentielle ne varie pas de plus de 5 dB sur l'ensemble de la bande de fréquence mesurée.

Morioka et al. mesurent également les seuils de perception dans les trois directions de l'espace [MORI 06]. Les sujets sont assis sur un siège rigide et soumis à des vibrations sinusoïdales de fréquences comprises entre 2 et 315 Hz. La méthode utilisée est de type « 3 down – 1 up » et la valeur de seuil est retenue après 6 inversions consécutives. Là encore, la valeur de seuil dans la direction verticale augmente significativement avec la fréquence même si la pente est plus faible que pour d'autres études. Toutes les valeurs sont également plus élevées que celles des autres études. Selon les auteurs, ces différences sont d'origines méthodologiques. Par exemple, Miwa et al. utilisent une méthode à choix forcé dans laquelle les sujets choisissent dans une paire de stimuli celui qu'ils ressentent, alors que la tâche des sujets consiste ici, comme dans l'expérience de Parson et al., à détecter la présence d'un stimulus [MIWA 71] [PARS 88]. Enfin, Morioka et al. soulignent que des différences de sièges (forme, soutien, posture, etc.) peuvent être à l'origine des écarts entre les différentes études [MORI 06].

A.c Synthèse

La Figure 11 fait apparaître une grande disparité dans les mesures de seuils de perception des vibrations verticales du corps entier. Cette dispersion est évoquée à de nombreuses reprises dans la littérature relative aux mesures de seuils de perceptions de vibrations du corps entier (indépendamment de la posture ou de la direction des vibrations). La description détaillée des expériences par chaque auteur permet de montrer que la plus grande partie de ces différences s'expliquent par les paramètres expérimentaux ainsi que par les critères utilisés par les sujets pour répondre. Selon Griffin, l'utilisation de

stimuli plus longs permettrait par exemple de diminuer l'écart entre la courbe de seuil de Benson et al. et les autres [BENS 81] [GRIF 96]. La comparaison des méthodes de détection du signal et d'ajustement faite par Parson et al. conduit également à la construction de deux courbes de seuils parmi les plus éloignées [PARS 88].

Tous les résultats sont comparés aux courbes décrites par la norme ISO-2631-2 et une certaine cohérence apparaît à ce niveau. Dans un premier temps, tous les seuils ont le même ordre de grandeur. Il paraît donc raisonnable de considérer une valeur de $0,01 \text{ m/s}^2$ pour une première approximation du seuil, valeur indépendante de la fréquence ou du type de sièges (forme du siège rigide ou siège automobile). Concernant la dépendance fréquentielle, il peut aussi être conclu que la norme ISO-2631-2 surestime la sensibilité du corps aux vibrations verticales. En effet, elle définit un seuil plus faible que ce que rapporte la littérature pour des fréquences inférieures à 40 Hz. À l'inverse, pour les fréquences supérieures à 40 Hz, les études révèlent une plus grande sensibilité des sujets que le standard (le seuil de la norme est trop élevé).

B. Seuils différentiels (JND)

Contrairement au seuil de perception absolu (qui définit l'amplitude minimale d'un stimulus pour que sa présence soit détectée), le seuil de différence (« difference threshold » ou « Just Noticeable difference - JND ») marque le changement minimal détectable d'un stimulus par un sujet humain. Il s'agit d'une étape fondamentale dans l'étude psychophysique de la perception humaine qui est réalisée pour de nombreux sens : vue, toucher, chaleur et ouïe. Le caractère sur lequel porte le changement du stimulus est variable (amplitude, fréquence, etc.). Dans le cas d'un changement de l'amplitude d'un stimulus, E. H. Weber observe que la relation entre la plus petite différence d'amplitude absolue détectée ($\Delta\varphi$) et l'amplitude absolue (φ) est très souvent décrite par l'Équation 1. Le seuil de différence absolu est donc une fraction constante de l'amplitude d'un stimulus. En d'autres termes, plus l'amplitude absolue (φ) d'un stimulus est importante, plus la différence d'amplitude absolue ($\Delta\varphi$) juste nécessaire à une détection est élevée. La fraction de Weber (c) dépend de la modalité étudiée. Dans le domaine automobile où les niveaux vibratoires sont le plus souvent supérieurs au seuil absolu, la connaissance de c est indispensable à l'amélioration du confort puisqu'elle permet de connaître les progrès nécessaires à ce qu'une diminution du niveau vibratoire soit perçue.

$$\frac{\Delta\varphi}{\varphi} = c$$

Équation 1 : Loi de Weber

B.a Etat de l'art

Très peu d'études des seuils de différence existent pour les vibrations verticales du corps et seuls les effets du niveau global sont documentés. Les données existantes concernent à la fois des sujets placés sur des chaises rigides ou sur des sièges automobiles. Elles sont obtenues à partir de signaux de synthèse ou de signaux réels. Comme toutes les mesures de seuil, ces valeurs varient en fonction du sujet, des caractéristiques des stimuli utilisés ainsi que de la méthode de mesure employée.

Morioka et al. estiment les seuils de différence de sujets assis sur un siège rigide et exposés à des vibrations verticales sinusoïdales [MORI 00]. Deux amplitudes ($100 \text{ dB} - a = 0,1 \text{ m/s}^2$ et $114 \text{ dB} - a = 0,5 \text{ m/s}^2$) et deux fréquences (5 et 20 Hz) sont testées sur 12 sujets. La durée des signaux est de 4 secondes. Les auteurs utilisent une méthode « 2 – AFC 3 down – 1 up » ($P(L) = 80\%$). Pour les 2 fréquences, le seuil de différence (absolu) est multiplié par 5 lorsque l'amplitude passe de 0,1 à $0,5 \text{ m/s}^2$. La fraction de Weber est d'environ 1 dB (10%) et ne diffère pas significativement d'une amplitude ou d'une fréquence à l'autre. Les auteurs concluent donc que la loi de Weber est respectée et que, pour être perçue, une oscillation verticale du corps assis sur une chaise rigide doit être réduite d'au moins 10%.

Bellmann mesure les seuils de différence pour des vibrations verticales du corps (siège rigide) pour des fréquences comprises entre 5 et 50 Hz dont le niveau de référence est de 96 dB ($a = 0,063 \text{ m/s}^2$) [BELL 02]. Il utilise la méthode « 3 – AFC 2 down – 1 up » ($P(L) = 70\%$). A chaque fois, 16 sujets sont soumis à trois vibrations sinusoïdales de même fréquence (deux avec le niveau référence et une avec le niveau testé). La durée des signaux est de 1 ou 2 s. La valeur relative du seuil de différence ainsi mesurée est d'environ 1,5 dB (19 %) et ne varie pas avec la fréquence. Les seuils individuels varient de 0,5 à 2,5 dB. Les données obtenues par Bellmann ne sont pas directement comparables à celles de Morioka et al.. D'une part, les amplitudes de référence sont différentes (100 et 114 dB pour Morioka et al. contre 96 dB pour Bellmann). D'autre part, les méthodes psychométriques utilisées par les 2 auteurs conduisent à la mesure de points différents de la courbe psychométrique ($P(L) = 80\%$ pour Morioka et al. et $P(L) = 70\%$ pour Bellmann). Si l'on retient l'hypothèse selon laquelle les seuils relatifs de différence restent constants en fonction de l'amplitude, alors les valeurs de Morioka devraient être significativement supérieures. Or, même si les intervalles de confiance se recouvrent, les JND mesurées par Bellmann sont supérieures à celles obtenues par Morioka et al. Il apparaît ici une contradiction de la littérature sur les mesures de seuils différentiels. Bellmann les attribue hypothétiquement (et sur la base de cette unique comparaison) à une dépendance des JND au niveau de référence, ce qui impliquerait un non respect de la loi de Weber.

Les autres études disponibles dans la littérature concernent des sièges automobiles. Là encore, la comparaison est difficile du fait de la complexité des vibrations transmises au corps par ce type de siège. Néanmoins, certaines tendances comparables aux résultats sur siège rigide se dessinent malgré les différences entre chacun des sièges et les différents types de signaux présentés aux sujets.

Pielemeier et al. déterminent les seuils de différence de perception de vibrations verticales transmises par un siège automobile [PIEL 97]. Seulement trois sujets sont soumis à l'expérience et les stimuli utilisés sont des bruits filtrés en bandes étroites dont les fréquences centrales sont 4, 8 et 15 Hz. Le niveau de référence est de 98 dB ($a_{rms} = 0,08 \text{ m/s}^2$). Étant donné le faible nombre de sujets ayant participé à l'expérience, les moyennes ou médianes des résultats n'ont pas de valeur statistique. Les valeurs rapportées varient entre 0,6 dB (7,5%) et 1,8 dB (22,5%).

Mansfield et al. étudient également les seuils différentiels pour des vibrations verticales transmises au corps par un siège automobile [MANS 00]. Dans leur expérience, 20 sujets sont exposés à des vibrations verticales enregistrées dans des véhicules en phase de roulage. Les signaux correspondent à plusieurs vibrations mesurées sur route goudronnée et sur route pavée (contenu spectral large bande entre 0 et 30 Hz). Les signaux sont égalisés en amplitude et présentés aux niveaux de 106 dB ($a = 0,2 \text{ m/s}^2$), 112 dB ($a = 0,4 \text{ m/s}^2$) et 118 dB ($a = 0,8 \text{ m/s}^2$). Dans ce cas, les seuils différentiels absolus augmentent de $0,025 \text{ m/s}^2$ à $0,093 \text{ m/s}^2$ quand la référence passe de $0,2 \text{ m/s}^2$ à $0,8 \text{ m/s}^2$. Ces données correspondent à un seuil relatif d'environ 1 dB (13%), indépendant du niveau vibratoire de référence et du contenu spectral des signaux. Ces résultats sont en accord avec la loi de Weber.

Weber et al. mesurent les seuils de différence sur un siège automobile [WEBE 00]. À cet effet, ils utilisent une méthode « 3 – AFC 2 down – 1 up » ($P(L) = 70\%$). Les stimuli sont des accélérations sinusoïdales de fréquences comprises en 12,5 et 80 Hz et de niveau de référence égal à 100 dB ($a = 0,1 \text{ m/s}^2$). Les auteurs concluent à une valeur moyenne de seuil différentiel de 1,6 dB (20%) également constante tout au long du domaine fréquentiel testé.

Enfin, les seuils différentiels sont déterminés par Bellmann pour un sujet assis sur un siège automobile [BELL 02]. Dans cette expérience, des vibrations verticales sinusoïdales de 16 et 31,5 Hz sont présentées à 15 sujets selon le protocole de la méthode « 3 – AFC – 2 down – 1 up » ($P(L) = 70\%$). Le niveau de référence est de 100 dB ($a = 0,1 \text{ m/s}^2$). L'auteur rapporte une valeur de seuil de 1,5 dB (19%). Les résultats sont une fois de plus indépendants de la fréquence.

B.b Synthèse

Toutes les expériences présentées rapportent des mesures de seuil de différence de perception de vibrations globales du corps en position assise. Elles concernent à la fois des sièges rigides [MORI 00] [BELL 02] et des sièges automobiles [PIEL 97] [MANS 00] [WEBE 00] et [BELL 02]. La surface de contact du corps humain est très différente d'un type de siège à l'autre. La transmission des vibrations par un siège de véhicule introduit notamment des composantes non verticales dans les mouvements du corps.

Les stimuli utilisés ont également un contenu fréquentiel très varié. Ils sont, soit constitués de sinusoïdes [WEBE 00] [BELL 00], soit de bruit [PIEL 97], ou soit de signaux réels modifiés [MANS 00]. En raison des phénomènes de résonance du corps humain, les vibrations sont ressenties dans différentes parties du corps [WHIT 78]. Pourtant, cela ne semble pas avoir introduit de grandes différences dans les JND pour les fréquences testées. Un phénomène similaire est observé dans le cadre d'une étude psychophysique plus fondamentale menée par Gesc et al. [GESC 90]. Dans cette expérience, la mesure du seuil de différence vibrotactile au niveau du doigt n'apparaît pas dépendante de la fréquence (25 et 250 Hz).

Enfin, les expériences présentées font intervenir des méthodes psychophysiques différentes. Il s'agit principalement des variantes « 3 down -1 up » et « 2 down 1 up » de la méthode AFC. Compléter les observations précédemment effectuées concernant les différences méthodologiques à celles faites sur des études au niveau du doigt s'avère très intéressant. Ainsi, Gesch et al. observent une influence significative de la méthode de présentation des stimuli sur les JND [GESC 90]. Dans une seconde expérience, ces auteurs mettent également en évidence l'importance du délai entre les présentations de stimulus [GESC 96].

En conclusion, les études disponibles dans la littérature ne sont pas strictement identiques d'un point de vue méthodologique. Les résultats décrits sont donc difficilement comparables. Toutefois, toutes les études donnent des courbes très proches, ayant pour point commun une dépendance fréquentielle nulle. Pour des stimuli d'amplitudes comprises entre 96 – 118 dB et de fréquences inférieures à 80 Hz, il peut donc sembler raisonnable de considérer que le seuil différentiel de perception des vibrations du corps est de 1,5 dB (20%). Cette approximation convient pour des chaises rigides ou des sièges automobiles, et pour des types de signaux différents (sinusoïde ou contenu spectral large bande).

C. Iso-perception

C.a Amplitude, sensation, confort

La sensation produite par les vibrations globales du corps dépend notamment de la fréquence et de l'amplitude des vibrations. Or, une amplitude vibratoire constante ne produit pas la même sensation pour toutes les fréquences vibratoires. Les effets de la fréquence des vibrations sur la perception et sur les évaluations sont donc étudiés par la détermination de courbe représentant une sensation équivalente (« equivalent contours »).

Les courbes d'iso-perception définissent la manière dont évolue la sensation avec la fréquence des vibrations. Elles expriment les amplitudes vibratoires nécessaires à produire un inconfort similaire pour chaque fréquence vibratoire. Une courbe élevée correspond ainsi à une sensation forte tandis qu'une courbe basse correspond à un ressenti plus faible.

Dans la littérature, des courbes d'iso-sensation, d'iso-niveau, d'iso-perception, ou d'iso-confort existent [GRIF 96] [HOWA 89]. Les dénominations varient d'un auteur à l'autre mais il s'agit en réalité du même type de courbes. S'il est généralement admis qu'une augmentation du niveau vibratoire entraîne une augmentation de l'intensité perçue des vibrations et par conséquent de l'inconfort ou de la gêne provoquée, les différences entre toutes ces courbes ne résident alors que dans la consigne donnée au sujet. Il est malgré tout important de préciser que l'utilisation du terme confort est problématique pour la réalisation de ce type de courbes. En effet, il s'agit d'une dimension perceptive et non d'une propriété physique du signal. Il s'agit d'une source de biais dans les résultats parce qu'il n'existe pas de définition standard du confort ou de l'inconfort [QUEH 01]. De plus, les attentes des sujets varient fortement d'un individu à l'autre et également en fonction de la situation.

C.b Effets de l'amplitude

La relation entre un stimulus physique et la sensation s'exprime souvent grâce à la loi de Stevens [STEV 75]. L'amplitude objective ϕ et l'amplitude subjective ψ d'un stimulus sont reliées par la relation $\psi = k \cdot \phi^n$. La valeur de l'exposant n détermine la croissance de la sensation par rapport à celle du stimulus et dépend du type de stimulus (fréquence). k dépend de l'unité de mesure employée.

De nombreux auteurs estiment la valeur de l'exposant n pour des fréquences principalement comprises entre 2 et 80 Hz. Le détail des résultats de tous ces auteurs est présenté par Griffin [GRIF 96].

Miwa détermine la valeur de n pour les fréquences 5, 20 et 60 Hz pour différentes amplitudes [MIWA 68]. Il observe pour toutes les fréquences une réduction de l'exposant quand l'amplitude des stimuli augmente (0,46 pour $a_{rms} \leq 1 \text{ m/s}^2$ et 0,6 pour $a_{rms} \geq 1 \text{ m/s}^2$).

Shoenberger et al. déterminent l'exposant pour des fréquences comprises entre 3,5 et 20 Hz. Ils obtiennent une valeur significativement plus importante à 5 Hz qu'à 7, 15 ou 20 Hz [SHOE 71].

Jones et al. observent une variation de n entre 0,88 et 0,99 pour des fréquences comprises entre 5 et 80 Hz. Ils suggèrent d'utiliser une valeur moyenne de 0,93 pour décrire la sensation vibratoire [JONE 74].

Clarke et al. estiment la valeur de n pour des fréquences comprises entre 3 Hz et 50 Hz [CLAR 75]. Leurs résultats montrent une diminution de n de 1,8 à 0,82 à mesure que la fréquence augmente.

Leatherwood et al. mesurent la valeur de n pour des fréquences comprises entre 2 et 30 Hz [LEAT 76]. Les résultats sont compris entre 1,40 et 1. On observe une tendance décroissance globale de la valeur de l'indice lorsque les évaluations concernent l'inconfort. Ce n'est pas le cas lorsque les évaluations subjectives concernent l'intensité des stimuli.

Howarth et al. déterminent la valeur de n pour des amplitudes comprises entre 0,04 et 0,4 m/s^2 [HOWA 88]. La bande de fréquence considérée s'étend de 4 à 63 Hz. Ils n'observent aucune dépendance fréquentielle de la valeur de n pour des vibrations verticales du corps alors que pour les vibrations horizontales (augmentation avec la fréquence) cette dépendance existe.

Enfin, Morioka et al. déterminent la valeur de l'exposant n pour des fréquences comprises entre 2 Hz et 316 Hz [MORI 06]. Les valeurs varient entre 0,39 et 0,90 et diminuent avec la fréquence à partir de 100 Hz.

Bien que les différences méthodologiques des expériences présentées (principalement la méthode d'estimation d'amplitude ou la méthode d'ajustement) soient susceptibles d'introduire des biais significatifs dans les résultats, la plupart des études indiquent une valeur de l'exposant n de la loi de Stevens proche de 1 pour des fréquences comprises entre 2 Hz et 80 Hz. La dépendance fréquentielle de l'exposant indique également que le taux d'augmentation de la sensation varie avec la fréquence. La forme de la courbe d'iso-sensation varie donc avec l'amplitude des stimuli.

C.c Effets de la fréquence

Les études de la variation fréquentielle de la perception des vibrations conduisent à la réalisation de courbes de sensations équivalentes. Comme dans le domaine automobile, les vibrations peuvent difficilement être réduites au-dessous du seuil de perception [HOWA 89], les contours de perception équivalente prennent un rôle primordial dans l'étude de l'impact des vibrations.

- Méthodes d'évaluation :

De nombreuses méthodes permettent d'établir une série de courbes de sensations équivalentes évaluées par un individu. Le but est de mesurer un point de la fonction psychométrique pour des fréquences différentes. Ce point doit correspondre à la même sensation de niveau ou de confort. Les techniques employées sont proches de celles utilisées pour la mesure de seuils, absolus ou différentiels. Leurs protocoles sont donc modifiés pour répondre à cet objectif. Les deux principales approches pour la détermination des courbes d'iso-confort sont de types « évaluation absolue » ou « évaluation relative ».

Dans les études les plus anciennes, la méthode d'évaluation absolue est la plus utilisée. Les sujets utilisent alors une échelle de notation pour décrire leurs sensations (exemple : « Non perceptible », « Faiblement perceptible », « Facilement perceptible », « Fortement perceptible », « Déplaisant », [REIH 31]). Chacune de ces études fait intervenir des dénominations différentes pour chaque item des échelles d'évaluation. Les résultats obtenus d'une étude à l'autre sont donc extrêmement différents [HANE 70]. Par exemple, dans une étude, un stimulus qualifié d'« extrêmement déplaisant - intolérable » possède une amplitude vibratoire dix fois moins importante qu'un autre qualifié de « moyennement gênant » dans une autre expérimentation [GRIF 96].

Les méthodes d'évaluations absolues indiquent bien si un stimulus entraîne une certaine sensation mais, il est probable que des personnes distinctes donnent une définition différente de chaque notion [ISO-2631]. Dans ce cas, une grande variabilité interindividuelle est observée. Un autre risque est de comparer des résultats proches d'un sujet à l'autre alors qu'ils reflètent, en réalité, des définitions différentes d'un même terme. Il en résulte une faible variabilité inter sujet, interprétée, à tort, comme le reflet d'un consensus élevé dans les évaluations. La technique d'évaluation absolue possède tout de même l'avantage d'être facile à mettre en œuvre dans un environnement réel. En outre, les différents sujets peuvent communiquer leurs réponses en même temps.

La méthode d'évaluation relative est principalement adaptée aux études en laboratoire. Elle consiste habituellement à obtenir les résultats de l'évaluation d'une paire de stimuli par un sujet. Il peut s'agir de méthodes de comparaison par paires ou d'autres techniques basées sur la méthode des stimuli constants (comparaison à un stimulus de référence). La tâche proposée aux sujets peut varier d'une expérience à l'autre. Cependant les sujets doivent le plus souvent ajuster l'amplitude du stimulus comparé et établir la correspondance avec le stimulus de référence (méthode d'ajustement). Des méthodes d'évaluation relatives aux limites peuvent également être employées. Dans ce cas, c'est l'expérimentateur qui adapte l'amplitude des stimuli jusqu'à

ce que le sujet déclare retrouver la même sensation que celle du stimulus de référence.

De nombreuses autres variantes de toutes ces méthodes relatives existent encore, et chacune d'elles possède des avantages et des inconvénients. Par exemple, la méthode d'ajustement inter-modalité consiste à demander au sujet d'ajuster le niveau vibratoire d'un stimulus jusqu'à ce qu'il corresponde au niveau d'un son [HOWA 90]. Pour évaluer un stimulus, il est également possible de demander aux sujets de positionner un curseur sur une échelle graduée de « confortable » à « inconfortable ». Enfin, la méthode d'estimation d'amplitude (« magnitude estimation ») permet au sujet de donner un nombre correspondant à leurs sensations. Ainsi, un grand nombre de contours peuvent être déterminés simultanément par des méthodes de régression (utilisation de rapports de proportionnalité des notes).

Au final, les méthodes d'évaluations absolues ou relatives permettent de déterminer les courbes de sensation équivalente, mais introduisent toutes des biais différents. Ces biais sont souvent significatifs et doivent obligatoirement être pris en considération dans l'interprétation et la comparaison des résultats. La plupart du temps, s'il est conseillé d'utiliser une échelle relative faisant intervenir un stimulus de référence, la comparaison de stimuli de fréquences trop éloignées les unes des l'autres peut être difficile car un stimulus peut provoquer des sensations très différentes. Aussi les fréquences des stimuli de référence sont le plus souvent choisies au milieu de la bande de fréquence testée, de manière à minimiser l'écart entre les deux fréquences les plus éloignées [BELL 02]. Parfois, il peut même s'avérer nécessaire de découper le domaine des fréquences étudiées en différentes sensations à l'aide de méthodes d'analyse sensorielle, puis de déterminer indépendamment les contours d'équivalence pour chacune de ces sensations [SAUV 08].

- Etat de l'art :

De très nombreuses études traitent le sujet des vibrations, dans des directions horizontales et verticales, à travers des positions du corps debout, assis ou encore allongé [GRIF 96]. Une nouvelle fois, seule la configuration la plus pertinente pour le confort automobile est retenue pour cette étude : il s'agit des vibrations verticales du corps en position assise. Cela inclut des contours déterminés pour les individus, des groupes d'individus (valeurs moyennes ou médianes) ou des courbes simplifiées pour les besoins de normalisation (ISO-2631).

Les contours présentés sont principalement issus de méthodes d'évaluations relatives car on considère qu'elles n'introduisent que peu de biais dans les résultats. Toutefois, certaines études plus anciennes sont ajoutées pour

rendre compte, d'une part de la variété des résultats disponibles, et d'autre part de l'extrême dépendance méthodologique de ce type de courbes (Figure 12).

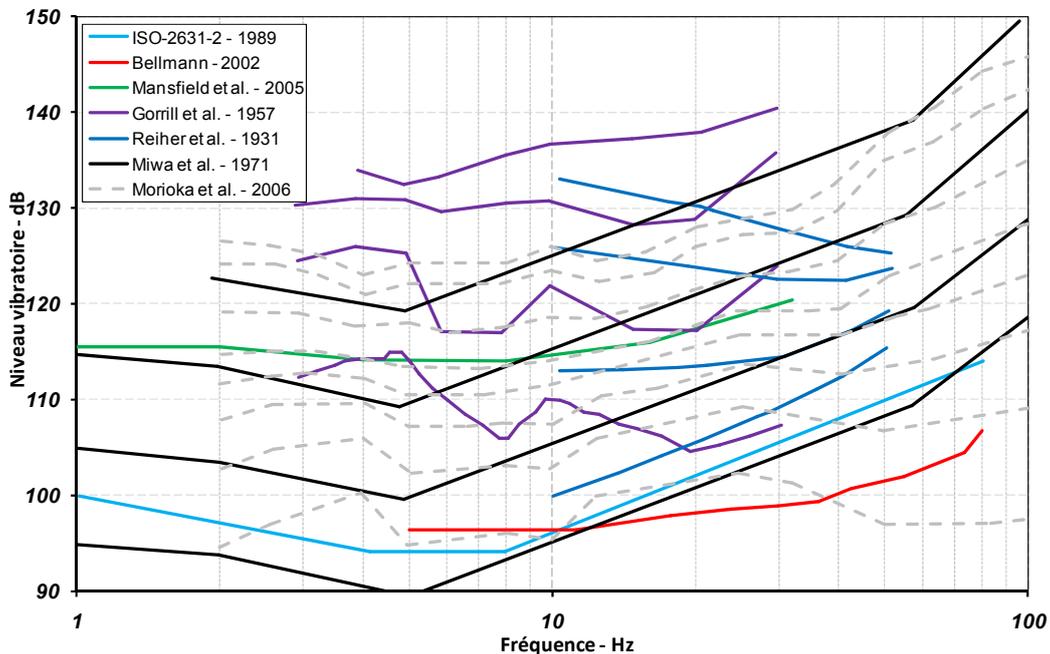


Figure 12 : Courbes d'iso-perception vibratoire (vibrations globales du corps, position assise, direction verticale)

Reiher et al. sont parmi les premiers à étudier les contours d'iso-confort [REIH 31]. Comme pour leurs mesures de seuils de perception, ils appliquent une méthode d'évaluation absolue de vibrations sinusoïdales de fréquences, comprises entre 3 Hz et 70 Hz. Ils utilisent une échelle sémantique qui s'étend de « Faiblement perceptible » à « Très déplaisant, supposé dangereux sur de courtes périodes ». Pour les amplitudes les plus faibles, la sensibilité à l'accélération est plus importante pour les basses fréquences que pour celles les plus élevées. En ce qui concerne les amplitudes les plus élevées, la sensibilité à l'accélération semble augmenter avec la fréquence. Les auteurs suggèrent également que chacune des courbes soit décrite par un critère de perception dépendant de la vitesse des vibrations et de la description sémantique associée.

Gorrill et al. utilisent une méthode d'évaluation absolue pour déterminer les courbes d'iso-contours de vibrations sinusoïdales comprises entre 3 Hz et 30 Hz [GORR 57]. Des étiquettes allant de « Sûrement ou facilement perceptible » à « Intolérable » sont alors employées. La forme des contours est très proche d'une courbe à l'autre, et la dépendance fréquentielle des contours est peu marquée. Toutefois, les sujets semblent être plus sensibles

aux hautes fréquences pour les amplitudes les plus faibles et, à l'inverse, plus sensibles aux basses fréquences pour les amplitudes les plus hautes.

Miwa et al. utilisent ensuite une méthode d'ajustement d'amplitude pour déterminer les courbes d'iso-confort pour des vibrations verticales [MIWA 71]. Pour cela, ils se servent de vibrations sinusoïdales de fréquences comprises entre 0,5 et 300 Hz, qui sont comparées à un signal de référence de 20 Hz d'amplitude fixe. Les auteurs obtiennent ainsi quatre contours d'accélération, équivalents à quatre amplitudes (pas de 6 dB) du signal de référence. Les résultats sont ajustés pour correspondre à des zones de jerk, d'accélération, de vitesse et de déplacement constant. La variation fréquentielle ne semble pas dépendre de l'amplitude.

La méthode utilisée par Bellmann est de type « AFC 1 up – 1 down » [BELL 02]. Elle permet de déterminer les courbes d'iso-niveau de vibrations verticales du corps entier. Des vibrations sinusoïdales de 12 fréquences réparties par tiers d'octave entre 5 et 80 Hz sont étudiées. Le stimulus de référence est une sinusoïde de 20 Hz et 100 dB d'amplitude. La sensibilité diminue avec la fréquence de manière quasi-constante sur la totalité du domaine fréquentiel testé. La variation est moins importante que dans la plupart des autres études disponibles dans la littérature.

Mansfield et al. déterminent une courbe d'iso-sensation verticale par la méthode d'ajustement d'amplitude [MANS 05]. Les stimuli sont des vibrations sinusoïdales du corps entier dont les fréquences sont comprises entre 1 Hz et 32 Hz. Le stimulus de référence est une sinusoïde de 8 Hz et de $0,5 \text{ m/s}^2$ d'amplitude. La variation de la sensibilité est conforme aux autres données de la littérature. Enfin, les auteurs soulignent (en tenant compte du comportement dynamique du corps humain) que l'expression de ces contours fait apparaître une sensibilité linéaire à 1, 2 et 4 Hz alors que ce n'est pas le cas pour les fréquences supérieures.

Enfin, Morioka et al. déterminent des courbes d'iso-sensations dans les directions horizontales et verticales [MORI 06]. Les sujets sont assis et soumis à des vibrations de fréquences comprises entre 2 et 315 Hz, dont la vitesse varie entre 0,05 m/s et 1,25 m/s, par pas de 3 dB. La méthode d'estimation d'amplitude permet alors, pour chaque fréquence, d'associer une valeur numérique qui caractérise la comparaison d'un stimulus donné à un stimulus de référence (vibration sinusoïdale de fréquence 20 Hz et d'amplitude $a_{\text{rms}} = 0,05 \text{ m/s}^2$). La construction d'un grand nombre de courbes d'iso-sensation est rendue possible à partir de chacune de ces valeurs. La variation fréquentielle des résultats est en cohérence avec celles des études les plus récentes : la sensibilité est plus importante pour les basses fréquences que pour les hautes. Par contre, l'aplatissement des courbes avec l'amplitude n'est pas mis en évidence.

Les courbes de variations de la sensation avec la fréquence, présentées en Figure 12, sont très différentes les unes des autres. Ces disparités sont principalement d'origine méthodologique et expérimentale. Toutefois, il se dégage une tendance commune des études les plus récentes ([MIWA 71] [BELL 02] [MANS 05] [MORI 06]). Toutes révèlent que la plupart des contours augmentent entre 1 et 4 Hz, pour diminuer ensuite entre 4 et 10 Hz, puis ré-augmenter pour les fréquences les plus élevées. Ce phénomène traduit une diminution de la sensibilité du corps avec l'augmentation de la fréquence, même si l'allure des variations est très variable d'une étude à l'autre. Cette tendance globale est en conformité avec les pondérations fréquentielles définies dans la norme ISO-2631-1. Seule la courbe de Bellmann diffère considérablement de la norme (croissance monotone).

Enfin, chacune de ces études révèle que la forme des lignes d'iso-perception est fortement liée à l'amplitude des stimuli. Si aucun point commun n'apparaît entre les différents auteurs, toutes les courbes d'une même étude sont systématiquement différentes d'une amplitude à l'autre. Les courbes diffèrent totalement des pondérations standardisées de la norme ISO-2631. Cette norme propose, pour des raisons de simplification, que la dépendance fréquentielle du seuil de perception soit la même que celle de la réaction d'un individu à toute les amplitudes de mouvement supérieures au seuil. Les courbes d'iso-perception sont alors de simples gabarits, et sont translatées pour correspondre à un niveau de référence donné.

- Synthèse :

Outre les indéniables effets de la posture et du type de siège, Griffin propose une explication biomécanique à ces tendances [GRIF 96]. En effet, l'étude biomécanique du corps humain montre, qu'à des fréquences inférieures à 2 Hz, les forces s'exerçant sur le corps sont approximativement proportionnelles à l'accélération imposée au corps. Le corps tout entier oscille de la même manière. Pour des fréquences légèrement supérieures, les résonances tendent à amplifier le mouvement. L'inconfort qui en résulte est créé par des sensations produites dans différentes parties du corps, au fur et à mesure que la fréquence augmente. Si la fréquence augmente encore, le corps humain atténue alors fortement la propagation des vibrations. L'inconfort est fréquemment associé à des zones du corps proches de celles qui ont été sollicitées par la source vibratoire.

Les vibrations automobiles sont généralement de faible amplitude ou juste au dessus du seuil de perception [HOWA 89]. Aussi, pour estimer la dépendance des réactions aux vibrations, il est nécessaire de considérer à la fois le seuil de perception et les courbes d'iso-sensation. L'importante variabilité expérimentale impose que cette comparaison se limite aux résultats d'une même

étude les ayant mesurés simultanément (exemple : [MORI 06] [REIH 31] [BELL 02]). De ce point de vue, la plus intéressante des méthodes est celle de Bellmann. D'une part, elle concerne un niveau vibratoire de référence couramment rencontré dans l'automobile ($L_a = 100$ dB) et, d'autre part, elle présente l'une des différences les plus élevées entre la courbe de seuil et la courbe d'iso perception (Figure 12). Ainsi, bien que l'iso-niveau soit mesuré seulement à 10 dB au-dessus du seuil, les deux courbes sont considérablement différentes : le seuil de perception est quasiment constant à partir de 8 Hz alors que la courbe d'iso-niveau ne cesse de monter à partir de cette même fréquence. Ces différences ne s'expliquent pas par une dépendance fréquentielle des JND, estimés constants par Bellmann à 1,5 dB, dans tout le domaine fréquentiel considéré [BELL 02]. Même si les différences entre le seuil et les contours sont moins marquées chez les autres auteurs, les résultats sont très souvent non concordants. Les recommandations, imposées par la norme ISO 2631, qui consistent à appliquer des gabarits identiques simplement translatés en niveaux, semblent donc peu adaptées à la description du confort vibratoire automobile.

2.2.2.3 Evaluation des vibrations

Les études psychophysiques montrent que la perception des vibrations dépend de nombreux paramètres vibratoires (niveau, composition spectrale, durée, zones d'exposition, etc.). Pour décrire objectivement ces variables avant d'en mesurer leurs effets sur l'homme, des estimateurs ainsi que des protocoles d'évaluation doivent être mis en place.

A. Indicateurs physiques

Même s'il joue un rôle très important dans la description du confort, le niveau vibratoire n'est pas suffisant pour décrire l'ensemble des caractéristiques d'un signal. Les aspects liés à la stationnarité ou à la périodicité d'une vibration sont complètement masqués par cet indicateur. Deux signaux complètement différents (et entraînant des sensations très différentes) peuvent ainsi avoir des niveaux comparables. D'autres indicateurs sont aussi utilisés pour rendre compte de telles propriétés [GRIF 96]. Les expressions mathématiques des principaux indicateurs rencontrés dans la littérature sont données en annexe (Annexe A).

Le facteur de crête (« Crest factor ») est défini comme le rapport de la valeur de crête et de la valeur efficace. Il ne donne pas d'informations sur le niveau absolu d'un signal mais compare son niveau maximum à son niveau moyen. A ce titre, il renseigne sur les non stationnarités d'un signal. Par exemple, une valeur élevée de facteur de crête signifie soit que le signal laisse apparaître des oscillations transitoires élevées par rapport à son niveau moyen (valeur de crête élevées), soit qu'il possède de longues périodes où

l'accélération est faible (valeur r.m.s. faible). Le facteur de crête permet donc de comparer les significativités des indicateurs d'amplitude de crête et d'amplitude efficace. Dans le cas d'un mouvement sinusoïdal, la valeur du facteur de crête est de $\frac{1}{\sqrt{2}}$. Il vaut approximativement 4 pour un bruit blanc.

Au même titre que la valeur *r.m.s.*, la valeur *r.m.q.* (« root mean quad ») est un indicateur de niveau global. Sa définition est identique à celle de la valeur efficace mais il fait intervenir des puissances plus élevées de l'accélération (4 au lieu de 2). Cet indicateur possède donc une sensibilité plus importante aux valeurs élevées de l'accélération. Ainsi est-il plus adapté que la valeur r.m.s. dans le cas d'un signal possédant un facteur de crête élevé (notamment dans le cas de vibrations stationnaires faisant occasionnellement apparaître des chocs répétés). Pour un mouvement sinusoïdal d'amplitude A , la valeur du niveau r.m.q. est de $\sqrt[4]{\frac{3}{8}} \cdot A$.

Dans le domaine temporel, il est également possible de caractériser les signaux en étudiant la distribution de leur amplitude. Pour cela, des moments statistiques d'ordres différents sont utilisés. Le coefficient de dissymétrie (« Skewness ») est un moment statistique d'ordre 3. Il est calculé à partir du cube des écarts à la moyenne et mesure le manque de symétrie d'une distribution. Un coefficient de dissymétrie positif indique une queue de distribution étalée vers la droite alors qu'un coefficient négatif indique une queue de distribution étalée vers la gauche. Ce coefficient prend une valeur nulle pour toute distribution symétrique comme par exemple pour un mouvement sinusoïdal ou un bruit blanc.

La seconde des caractéristiques de forme d'une distribution est donnée par le coefficient d'aplatissement (« Kurtosis »). Il correspond à une mesure de l'aplatissement, ou a contrario de la pointicité, de la distribution des amplitudes d'un signal. En dehors des effets de dispersion donnés par l'écart-type, il mesure la disposition des amplitudes autour de la moyenne. Un coefficient d'aplatissement élevé indique que la distribution est plutôt pointue en sa moyenne, et qu'elle possède des queues de distribution épaisses. À l'opposé, un coefficient d'aplatissement proche de zéro indique une distribution relativement aplatie (pour un même écart-type). Le coefficient d'aplatissement d'un signal sinusoïdal vaut 1,5, celui d'un signal carré vaut 1 et celui d'un bruit blanc est de 2,9. Une valeur de coefficient d'aplatissement supérieure à 2,9 signifie donc qu'une vibration contient des accélérations plus grandes que celles que contiendrait un bruit blanc de même niveau.

Aucun des indicateurs présentés jusqu'à présent ne tient compte de la durée des signaux. On introduit pour cela le *VDV* (« Vibration Dose Value ») [GRIF 96]. Cet indicateur est équivalent au niveau r.m.q. multiplié par la durée d'exposition aux vibrations. Il s'agit donc d'une mesure cumulative. Pour un

mouvement sinusoïdal d'amplitude A et de durée T_s , le VDV vaut $0,7825 \cdot A \cdot T_s^{1/4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1.75}$.

Pour finir, il est essentiel d'analyser le contenu fréquentiel d'un signal vibratoire. Une telle caractérisation peut-être effectuée par de nombreuses méthodes (filtrage numérique, transformée de Fourier ou densité spectrale). Le contenu fréquentiel $A(f)$ d'un signal est alors présenté sur un spectre qui synthétise la manière dont l'amplitude des accélérations varie avec la fréquence. Les représentations classiquement utilisées font intervenir des bandes d'octave ou de tiers d'octave centrées sur des fréquences appelées fréquences centrales (estimation spectrale par filtrage, fft ou dsp). Le spectre donne alors le niveau (r.m.s. ou crête) du signal contenu dans chaque bande. Les niveaux vibratoires peuvent également être présentés pour chaque valeur de fréquence si la résolution fréquentielle souhaitée est importante (fft ou dsp). Quoi qu'il en soit, un grand soin doit être apporté aux choix des paramètres de l'estimation spectrale au risque de biaiser fortement les résultats.

Les indicateurs présentés permettent aussi bien la description de l'amplitude, du contenu fréquentiel, que celle d'aspects plus complexes liés à la stationnarité ou au contenu impulsionnel. Ils sont très variés et permettent donc une caractérisation très précise de nombreux signaux. Tous ces indicateurs sont cependant très synthétiques dans la mesure où ils résument l'ensemble d'une série temporelle à une seule valeur. Ainsi, dans le cas où l'exposition complète aux vibrations comprend plusieurs périodes possédant des caractéristiques différentes, il peut être nécessaire d'analyser séparément ces différentes périodes [ISO-2631]. C'est souvent le cas dans le contexte automobile. Une bonne pratique consiste alors à éviter une démarche « à l'aveugle » consistant à calculer des indicateurs sur la totalité des mesures disponibles. Il est plus pertinent de ne sélectionner que les stimuli représentant au mieux l'application étudiée. Ainsi, pour utiliser les indicateurs avec le plus de justesse possible, les objectifs de l'étude des signaux doivent être établis très soigneusement.

D'autres outils du traitement du signal peuvent être utilisés pour réaliser cette tâche. L'un des plus simples consiste à déterminer la valeur efficace mobile $a(k)$ (running r.m.s.). Il s'agit simplement d'une succession de valeurs efficaces calculées sur des segments d'un signal. Le découpage s'effectue arbitrairement à partir de la valeur de la constante d'intégration (par exemple : $\tau = 1 \text{ s}$). Cet estimateur tient compte des chocs occasionnels et des vibrations transitoires en faisant intervenir une constante de temps d'intégration courte. La valeur efficace mobile, au même titre que la fonction d'auto-corrélation d'un processus aléatoire, permet de bien mettre en évidence les différentes « périodes » dans un signal.

L'enveloppe temporelle des signaux peut également être évaluée. Elle est obtenue à partir de la transformée de Hilbert d'un signal. On calcule alors le

signal analytique dont la valeur absolue représente l'enveloppe. Elle peut être estimée sur un signal filtré passe-bas et permet alors d'observer les variations temporelles d'un signal de manière très macroscopiques. Cette mesure peut éventuellement être complétée par le calcul du spectre de modulation. Il est obtenu par transformée de Fourier de l'enveloppe temporelle du signal. Cet estimateur est très utile pour détecter des phénomènes de battements présents dans les signaux (modulation d'amplitudes basses fréquences).

Pour finir, il est possible d'estimer un spectrogramme qui présente simultanément les variations temporelles et fréquentielles d'un signal vibratoire. Cela permet par exemple de localiser finement les temps d'apparitions de transitoires et d'en estimer simultanément le contenu fréquentiel. Comme pour le spectre moyen, de nombreuses méthodes de calcul existent (fft, ondelettes, etc.).

B. Norme ISO-2631

Aucun des indicateurs présentés ne tient compte des propriétés de la perception humaine. Les variables physiques liées à l'amplitude ou à la fréquence des vibrations n'interviennent pas seules dans la perception des vibrations. La posture, les caractéristiques anthropomorphiques, la surface de contact et de nombreux autres paramètres influencent la réponse d'un individu aux vibrations.

Ainsi, pour permettre d'aborder le problème de l'évaluation des vibrations du corps avec toute la rigueur nécessaire, des procédures standardisées sont élaborées. Ces procédures font l'objet de nombreuses normes internationales et concernent toutes les étapes de l'évaluation des vibrations (capteurs, protocoles de mesure, conditionnement des signaux, évaluations, présentation des résultats) [ISO-5805] [ISO-2041] [ISO-8041] [ISO-8002] [NF-13059]. Des standards spécifiques sont également définis en fonction du domaine d'activité [ISO-5349] [ISO-10819] [ISO-8662]. Pour cette étude, seules les normes les plus pertinentes pour l'évaluation du confort vibratoire automobile sont retenues. C'est le cas de la norme ISO-2631 qui concerne les « Vibrations et choc mécaniques – Evaluation de l'exposition des individus à des vibrations globales du corps ». Cette norme a notamment pour objectif de définir les méthodes pour quantifier les effets des vibrations globales du corps par rapport à la santé humaine et au confort.

B.a Procédure d'évaluation

La norme ISO-2631 concerne de nombreux domaines (transports, travail ou activités quotidiennes) susceptibles d'exposer un individu à des vibrations globales du corps, à l'exception de celles transmises directement aux membres. Pour le confort des personnes assises, elle s'applique à l'évaluation des

vibrations périodiques, aléatoires et transitoires dans la gamme de fréquence allant de 0,5 à 80 Hz.

- Mesures :

Dans le cadre de sollicitations du corps humain, des repères standards ont été établis (Figure 13). Leur orientation dépend de celle du corps par rapport à la gravité. Ces repères définissent les 3 axes de translations (O_x , O_y et O_z) et les 3 axes de rotation (roulis, tangage et lacet) auxquels le corps humain est sensible. L'origine de ces repères doit avoir comme origine un point à partir duquel il est considéré que les vibrations entrent dans le corps humain. Le positionnement de ces repères est donc lié à la posture dans laquelle se trouve le sujet.

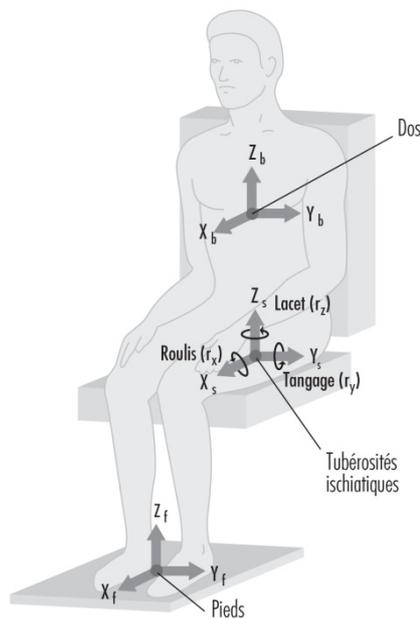


Figure 13 : Repères standards pour l'évaluation des vibrations du corps humain en position assise

Pour mesurer l'exposition du corps aux vibrations, des accéléromètres doivent être placés de manière à indiquer les vibrations au niveau de l'interface entre le corps humain et la source des vibrations. Les accéléromètres doivent être perpendiculaires les uns aux autres et doivent être aussi proches que possible. Trois zones principales peuvent être utilisées pour une personne assise dans un siège automobile : l'assise, le dossier et les pieds. Dans tous les cas, le point de mesure doit être clairement indiqué.

Pour une personne assise sur un siège automobile (plan d'assise incliné), il convient de déterminer l'orientation pertinente par les axes du corps,

sachant que l'axe des z ne sera pas nécessairement vertical (15° au maximum). Il convient de noter l'orientation des repères par rapport à la gravité.

Dans les cas où il n'est pas évident d'atteindre les zones de contact entre le corps et la surface vibrante, il est possible de mesurer les vibrations en se basant sur les mesures relevées sur une partie rigide de la source. L'évaluation de telles données demande cependant de prendre en compte les effets de la propagation des vibrations jusqu'au corps. Dans un véhicule, il est ainsi possible de mesurer les vibrations au niveau de la glissière du siège sur lequel est assis un passager. Cependant, il convient de connaître l'influence de ce dernier sur la transmission des vibrations au corps de l'individu (détermination de sa fonction de transfert et du couplage qu'il introduit entre l'axe vertical et l'axe transversal).

Enfin, la durée de mesurage doit être suffisamment longue pour assurer une précision statistique raisonnable et pour garantir que les vibrations soient caractéristiques des expositions en cours d'évaluation. La durée d'exposition doit être systématiquement indiquée.

- Pondérations fréquentielles :

La norme ISO-2631 recommande l'utilisation de pondération fréquentielles pour l'évaluation des vibrations globale du corps dans diverses situations. Ces courbes indiquent la façon dont ces vibrations affectent la santé, le confort et la perception. Ce sont donc des spécifications très générales qui peuvent être appliquées dans de nombreux domaines, notamment dans celui de l'automobile. Ces pondérations peuvent être appliquées aux signaux $a(i)$, soit par filtrage numérique dans le domaine temporel ($a_w(i)$), soit dans le domaine fréquentiel ($A_w(k)$) [ISO-8041].

Deux pondérations principales sont couramment utilisées dans le domaine du confort automobile : la courbe W_k pour des vibrations verticales (O_z), et la courbe W_d pour des vibrations horizontales (O_x et O_y). Elles sont présentées sur la Figure 14. Les dépendances fréquentielles des 2 pondérations correspondent à des filtres passe-bande dont les atténuations sont très fortes. La courbe W_z possède une sensibilité maximale entre 2 et 20 Hz. La courbe W_d présente une sensibilité maximale pour des fréquences inférieures (entre 0,5 et 3 Hz).

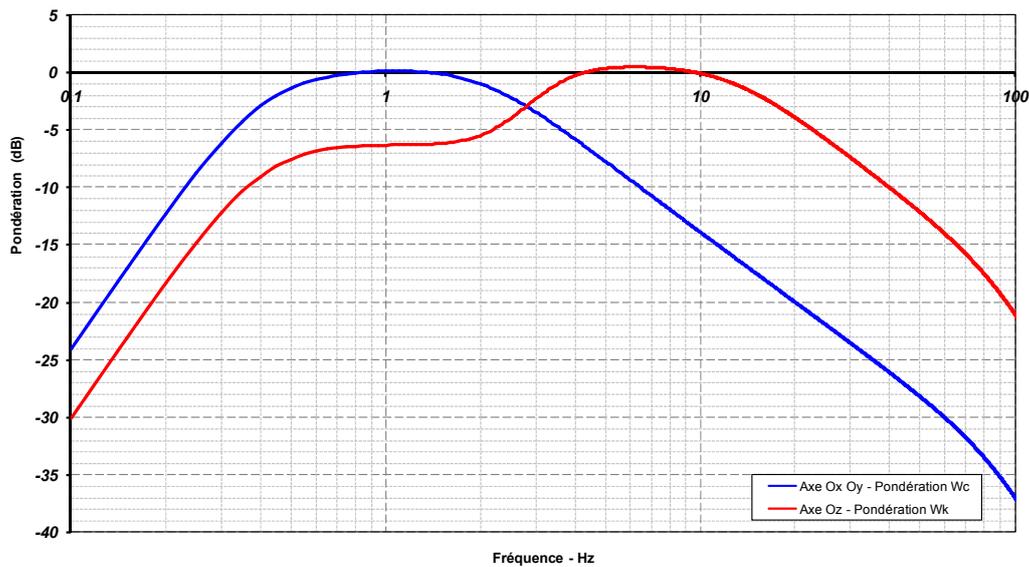


Figure 14 : Pondérations fréquentielles Wc et Wk [ISO-2631]

Enfin, si les vibrations incluent des composantes dans plusieurs directions, la valeur totale de vibration (vibration total value – a_v) des accélérations pondérées alors est définie par sommation géométrique :

$$a_v = \sqrt{a_{wx}^2 + a_{wy}^2 + a_{wz}^2}$$

Où :

- a_{wx}, a_{wy}, a_{wz} : accélérations pondérées selon les axes O_x, O_y et O_z .

B.c Méthodes d'évaluations

La norme ISO-2631 recommande l'utilisation de pondérations fréquentielles pour les calculs d'estimateurs physiques sur les signaux. Ainsi, les valeurs efficaces de l'accélération pondérée doivent être déterminées pour chacun des axes.

Il est également recommandé de calculer le facteur de crête sur des signaux pondérés. La valeur obtenue permet d'indiquer si la valeur efficace est suffisante pour décrire la sévérité des vibrations en fonction de ses effets sur les êtres humains. Il est généralement admis qu'un facteur de crête faible ($C_f \leq 9$) signifie que le niveau r.m.s. suffit pour évaluer une vibration. A l'inverse, une valeur élevée ($C_f \geq 9$) indique que la valeur efficace risque de sous-estimer la sévérité de l'inconfort résultant de l'exposition à des vibrations. Dans ce cas (ou en cas de doute), il convient de procéder à des évaluations complémentaires.

Il est alors recommandé d'évaluer la valeur efficace mobile sur les signaux pondérés. A la valeur efficace mobile est associé l'indicateur d'intensité des vibrations. Il représente le maximum de la vibration transitoire ($MTVV$) et correspond simplement à la valeur maximum de la valeur efficace mobile. L'expérience montre qu'un rapport $\frac{MTVV}{a_{rms}} \geq 1,5$ signifie que le signal étudié contient un taux élevé de transitoires. Dans ce cas, la mesure de la valeur efficace du signal n'est pas suffisante pour estimer l'inconfort d'une vibration. Il est également possible d'estimer le VDV sur les signaux pondérés. Dans ce cas, l'obtention d'un rapport $\frac{VDV}{a_w \cdot T_s^{1/4}} \geq 1,75$ signifie également que les accélérations transitoires du signal peuvent être importantes pour juger des effets d'une vibration sur l'être humain.

B.d Effets des vibrations

La norme ISO-2631 décrit enfin l'opinion généralement admise sur la relation entre l'intensité des vibrations et le confort de l'homme. Cette norme donne des indications sur les réactions probables aux différentes grandeurs totales de vibration globale dans les transports publics. Ainsi, le Tableau 5 présente le degré subjectif de sévérité de vibration en fonction du niveau global pondéré.

Niveau Pondéré	Effet
Moins de $0,315 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$	Pas du tout inconfortable
De $0,315 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ à $0,63 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$	Légèrement inconfortable
De $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ à $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$	Assez inconfortable
De $0,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ à $1,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$	Inconfortable
De $1,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ à $2,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$	Très inconfortable
Plus de $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$	Extrêmement inconfortable

Tableau 5 : Evaluation de l'inconfort dans les transports publics

Les dynamiques d'amplitudes données par la norme sont approximatives. Une condition vibratoire particulière peut être considérée comme provoquant un inconfort inacceptable dans une situation particulière tout en étant classée comme agréable, voire même enivrante dans un autre contexte. De nombreux facteurs se combinent pour déterminer les atteintes en matière de confort. En ce qui concerne le désagrément, les tolérances ne peuvent être évaluées correctement que par la connaissance de nombreux facteurs contextuels.

B.e Synthèse

Tous les outils méthodologiques présentés (indicateurs, protocole de mesures, procédure d'évaluation des réactions des individus) sont indispensables à

l'étude du confort vibratoire automobile. L'étude des propriétés des indicateurs physiques montre qu'il est nécessaire de calculer ces derniers sur des périodes de signal très spécifiques, c'est-à-dire des périodes durant lesquelles les propriétés du signal sont relativement constantes. Enfin, la norme internationale en vigueur ne donne qu'une échelle d'évaluation approximative du confort et précise la grande dépendance des réactions aux caractéristiques environnementales dans lesquelles sont placés les sujets.

Dans le domaine automobile, les niveaux d'exposition aux vibrations sont faibles par rapport au domaine d'application de la norme ISO-2631 (Figure 2). De plus, l'étude du confort de roulage basse vitesse exclut les conditions de circulations les plus sévères ou les chaussées trop dégradées (chemin de terre, routes pavées, etc.). Dans ces conditions, les accélérations vibratoires auxquelles sont soumis les occupants d'un véhicule sont d'amplitudes modérées [BELL 02]. Les valeurs totales des vibrations rencontrées sont de l'ordre de 0,5 à 1 m/s^2 au maximum [GRIF 96]. Ce type d'exposition est décrit comme « Assez inconfortable » par la norme ISO-2631.

2.3 Interaction sonore et vibratoire

Pour évaluer correctement un environnement vibro-acoustique dans lequel est placé un sujet, les modalités vibratoires et sonores doivent être prises en compte de manière simultanée [AMMA 05]. Ce principe largement admis s'applique à l'évaluation du confort de roulage automobile car la présence de sons dans l'habitacle est liée à celle des vibrations, et l'évaluation de l'une de ces modalités ne s'effectue jamais sans la présence de l'autre. L'étude de l'interaction entre ces deux modalités s'avère donc primordiale.

La littérature disponible à ce sujet concerne d'une part, les effets de chacune de ces modalités sur les propriétés perceptives de l'autre (seuils, JND) et d'autre part, les effets de chacune de ces modalités sur des évaluations de gêne ou d'inconfort sonore, vibratoire ou global. L'étude des effets des deux modalités sur les évaluations subjectives constitue la très grande majorité des recherches. Toutefois, celles-ci se limitent à des applications très spécifiques et concernent principalement les domaines de l'industrie ferroviaire ([HOWA 90a] [HOWA 90b] [HOWA 91]), aéronautique ([DEMP 76] [DEMP 79] [LEAT 79] [LEAT 80] [LEAT 90] [INGV 99] [QUEH 01] [VAST 02]), navale ([RICH 76] [JANS 79]) et plus récemment automobile ([PARI 04] [AMMA 07]). Toutes les synthèses effectuées sur ces recherches montrent que les effets observés sont extrêmement variables et fortement dépendants des conditions expérimentales [HOWA 89] [GRIF 96] [AMMA 05]. Les études les plus pertinentes pour

l'évaluation du confort de roulage automobile sont présentées en détail ci-dessous.

2.3.1 Effets sur la perception

Les rares études psychophysiques dédiées à l'influence de l'une des modalités sur l'autre concernent principalement des mesures de seuils (absolus ou différentiels). Ces recherches sont souvent effectuées pour estimer l'effet parasite du bruit de fonctionnement des pots vibrants.

2.3.1.1 Etat de l'art

Mc Kay étudie le seuil de perception des vibrations sinusoïdales verticales en présence et en absence de stimulations sonores [MCKA 72]. Lors de cette expérience, 48 sujets (assis et debout) sont soumis à des accélérations sinusoïdales de 10 fréquences différentes, comprises entre 1,5 et 100 Hz. Des stimuli de durée différente et d'amplitudes croissantes sont présentés jusqu'à ce que les sujets parviennent à estimer correctement leur durée pour deux présentations sur trois. L'amplitude initiale est de 0,001g et augmente par pas de 0,001 g. Ce protocole d'évaluation est répété deux fois pour chaque sujet : une fois alors qu'aucune source sonore n'est ajoutée au bruit ambiant du laboratoire ($L_p = 56 \text{ dB}(A)$), et une fois avec un bruit blanc de $86 \text{ dB}(A)$ pour masquer le bruit du pot vibrant. Les résultats révèlent une influence du bruit sur les seuils de perception identique pour 8 fréquences sur 10 : la sensibilité du corps aux vibrations diminue légèrement en présence de bruit. Les différences des valeurs de seuil sont de l'ordre de 0,001 g mais celles-ci sont tout juste non-significatives.

Weber et al. étudient l'influence du son sur les seuils de perception absolus et différentiels des vibrations verticales du corps en position assise [WEBE 00]. Des sujets assis dans un siège automobile sont soumis à des vibrations sinusoïdales de fréquences réparties par tiers d'octave entre 12 et 80 Hz. La durée des stimuli vibratoires est de 1 seconde. Ces stimuli sont présentés seuls ($L_p = 38 \text{ dB}(A)$) puis accompagnés d'un bruit blanc de $68 \text{ dB}(A)$, filtré passe-bande entre 50 Hz et 2000 Hz et présenté à l'aide d'un casque. Les méthodes employées pour mesurer les seuils absolus et les seuils différentiels sont identiques : il s'agit d'une méthode de type « 3 AFC 1up - 2down ». La mesure de seuil absolu est effectuée à 3 reprises sur 12 sujets. Le niveau des stimuli varie par pas de 8 dB à 1 dB. La mesure de JND est également répétée 3 fois sur 10 sujets. Le niveau initial des stimuli est de 110 dB et un stimulus de référence de 100 dB est utilisé. Les variations de niveaux sont comprises entre 4 et 0,5 dB. Les courbes de seuils ou de JND, obtenues à niveau sonore ambiant, sont très proches des données de la littérature, sauf pour $f = 80 \text{ Hz}$ où la valeur de seuil diminue très fortement (chute de 10 dB par rapport à 63 Hz).

Enfin, l'influence du bruit s'avère très faible sur le seuil (+1,6 dB en moyenne, même à $f = 80 \text{ Hz}$) et non significative pour les JND.

Bellmann étudie l'influence du son sur les seuils de perceptions de vibrations verticales du corps en position assise [BELL 02]. Le protocole est très proche de celui de l'étude précédente. Une méthode de type « 3 AFC 1up – 2down » est utilisée pour estimer à trois reprises les seuils perceptifs de 11 sujets. Ces sujets sont assis dans un siège automobile et soumis à des vibrations sinusoïdales de fréquences comprises entre 16 et 200 Hz. Le niveau vibratoire initial est de 110 dB et varie de 8 à 1 dB. Les mesures de seuils sont effectuées à niveau sonore ambiant ($L_p = 33 \text{ dB(A)}$) et, lors de la présentation d'un bruit blanc de 69 dB(A) , à l'aide d'un casque. Sans bruit supplémentaire, les mesures de seuils sont conformes à la littérature sauf à 63 Hz où une très nette augmentation de la sensibilité apparaît, sans doute à cause du bruit rayonné par le pot vibrant à cette fréquence. Cet effet disparaît en présence du bruit et la courbe de seuils correspond alors en tout point aux données de la littérature. Dans ce cas, l'influence du bruit n'est pas significative.

Enfin, dans le cadre de l'étude de l'influence de vibrations verticales du corps sur des évaluations de sonie, Parizet étudie les effets de la modalité sonore sur des évaluations de niveau vibratoire (position assise, siège rigide) [PARI 05]. Pour cela, 18 sujets sont soumis à 2 expériences dans lesquelles ils doivent successivement estimer l'amplitude de stimuli vibratoires (niveau) et sonores (sonie). La première expérience fait intervenir des vibrations sinusoïdales de fréquence $f = 28 \text{ Hz}$ ($L_a = 0 - 0,17 - 0,21 - 0,27 - 0,34 - 0,43 \text{ m/s}^2$), associées à des sons sinusoïdaux de fréquences $f = 1000 \text{ Hz}$ ($L_p = 60 - 64 - 71 - 81 - 84 - 89 \text{ dB}$). Le signal de référence est un son seul de niveau $L_p = 75 \text{ dB}$. La seconde fait également intervenir des vibrations sinusoïdales de fréquences $f = 28 \text{ Hz}$ ($L_a = 0 - 0,17 - 0,21 - 0,27 - 0,34 - 0,43 \text{ m/s}^2$), cette fois-ci associées à des sons de fréquence $f = 28 \text{ Hz}$ ($L_p = 70 - 75 - 87 - 89 - 94 \text{ dB}$). Le niveau sonore de référence est de $L_p = 82 \text{ dB}$. Les résultats ne révèlent aucune influence des vibrations verticales sur les évaluations de sonie (ni à $f = 28 \text{ Hz}$, ni à $f = 1000 \text{ Hz}$). A l'inverse, la présence du son de fréquence $f = 28 \text{ Hz}$ influence très significativement les évaluations de niveau vibratoire. L'effet observé est synergique : plus le niveau sonore présenté est fort, plus le niveau vibratoire estimé est élevé. Ces observations sont probablement liées aux effets physiologiques des sons basse-fréquence sur le corps humain.

2.3.1.2 Synthèse

Toutes les mesures de seuils absolus et de seuils différentiels effectuées « avec » et « sans bruit » ne révèlent « pas » ou que « très peu » d'effet de l'association d'un son sur la perception des vibrations. De plus, toutes les

valeurs correspondent à la littérature à l'exception de celles obtenues pour $f = 80 \text{ Hz}$ pour Weber et al. [WEBE 00] et pour $f = 63 \text{ Hz}$ pour Bellman [BELL 00]. Cette singularité dans les mesures peut être attribuée au bruit rayonné par les pots vibrants lors de leur fonctionnement à de telles fréquences. Les sujets détectent alors plus facilement la mise en vibration du dispositif, ce qui induit un biais dans la mesure de seuil. Pour Weber, le bruit n'atténue pas cet effet contrairement aux résultats de Bellmann. Ceci permet de supposer que le son de Weber ne masque pas complètement le bruit de fonctionnement du pot vibrant. Bellmann retient d'ailleurs un bruit légèrement plus fort que celui de Weber ($69 \text{ dB}(A)$ contre $68 \text{ dB}(A)$) alors que le niveau sonore ambiant est plus faible ($33 \text{ dB}(A)$ contre $38 \text{ dB}(A)$).

2.3.2 Effets sur les évaluations

Pour les évaluations subjectives du son et des vibrations, les recherches disponibles concernent à la fois trois aspects des interactions sonores et vibratoires : les effets des vibrations sur les évaluations du son, les effets du son sur les évaluations des vibrations, et les effets des deux modalités sur les évaluations globales de la situation. Ces études sont présentées ici par ordre chronologique.

2.3.2.1 Etat de l'art

Dans le but de mettre en évidence une éventuelle interaction, Miwa et al. étudient l'influence du son sur les évaluations subjectives des vibrations [MIWA 73]. L'étude concerne des vibrations globales du corps dans les directions verticales et horizontales. 10 sujets sont soumis à plusieurs combinaisons de stimuli réels et artificiels, modifiées en niveaux : des stimuli vibratoires réels seuls, des stimuli vibratoires réels accompagnés d'enregistrements sonores, et, enfin, des stimuli vibratoires artificiels accompagnés d'enregistrements sonores. Les stimuli vibratoires réels sont issus de mesures dans des engins de chantier diesel. Ils sont constitués d'impulsions passées en boucle pendant une durée de 1,5 secondes. La fréquence fondamentale de ces signaux est proche de 10 Hz. Les stimuli vibratoires artificiels sont des vibrations sinusoïdales. Plusieurs associations de stimuli sont présentées aux sujets dont la tâche consiste à évaluer la gêne vibratoire. Ils ajustent le niveau des stimuli vibratoires artificiels pour correspondre aux signaux vibratoires réels. Cette méthode d'ajustement permet d'établir des contours d'équivalence vibratoire subjective. Les auteurs étudient ainsi successivement l'effet de la variation du niveau sonore ($L_{ax} = 96 \text{ dB}$, $L_{az} = 100 \text{ dB}$, $L_p = 70 - 80 - 90 - 100 \text{ dB}(A)$) et du niveau vibratoire ($L_{ax} = 76 - 81 - 86 - 91 \text{ dB}$, $L_{az} = 80 - 85 - 90 - 95 \text{ dB}$, $L_p = 100 \text{ dB}(A)$) sur les évaluations des vibrations. Pour l'influence du niveau sonore, les contours

obtenus ne font apparaître aucun effet notable sur les évaluations vibratoires. Les profils sont majoritairement indépendants du niveau sonore présenté. Seul le profil qui correspond au niveau sonore le plus fort ($L_p = 100 \text{ dB}(A)$) entraîne une augmentation du niveau vibratoire équivalent (+1,5 dB). Cet effet reste malgré tout très faible. Enfin, pour l'influence de la variation du niveau vibratoire, à niveau sonore constant, les contours demeurent tous équivalents et les effets de masquage attendus ne sont pas observés.

Dans le cadre d'un important travail de recherche mené au centre d'études de la NASA sur plus de 20 ans, Dempsey et al. étudient l'inconfort lié aux bruits, aux vibrations verticales, aux bruits et aux vibrations que subit un occupant de cabine d'avion [DEMP 76]. 48 sujets assis sont soumis à des stimuli vibratoires de synthèse composés de bruits dans des bandes de fréquences de 5 Hz de largeur et centrés sur les fréquences $f = 3 - 5 - 7 - 9 \text{ Hz}$. Les niveaux vibratoires varient de 0,03 g à 0,12 g. Des stimuli sonores sont présentés aux sujets simultanément. Il s'agit de bruits blancs dans les bandes d'octaves centrées sur $f = 125 - 250 - 2000 - 4000 \text{ Hz}$. Les niveaux sonores sont compris entre 75 et 85 dB(A). La durée des stimuli est de 15 secondes et toutes les combinaisons possibles de ces paramètres sont évaluées sur 3 échelles graduées de « zéro inconfort » à « inconfort maximum », liées respectivement à l'environnement vibratoire, sonore et global du passager. Les résultats mettent en évidence la capacité des sujets à séparer les contributions sonores et vibratoires. Pour l'évaluation de l'inconfort global, les auteurs recommandent d'ailleurs l'utilisation simultanée d'échelles sonores et vibratoires distinctes. Les niveaux et contenus fréquentiels des stimuli à la fois sonores et vibratoires apparaissent tous essentiels à la prédiction du confort. Même si l'étude ne permet pas d'établir de véritable modèle, la contribution du vibratoire est environ 4 fois plus importante que celle du niveau sonore. Une interaction de très faible amplitude est enfin observée entre ces deux modalités.

Dempsey étudie ensuite l'inconfort total d'un passager d'avion par la modélisation des contributions vibratoires et sonores et la détermination de courbes prédictives d'iso-confort [DEMP 79]. 48 sujets comparent ainsi l'inconfort des vibrations et des sons à une référence. Pour cela, ils donnent une note sur une échelle linéaire. Les vibrations sont des sinusoïdes de 5 Hz ou des tirages de bruits dans une bande de fréquence de 5 Hz de largeur centrée à 5 Hz. 6 niveaux vibratoires sont sélectionnés et varient entre 0,02 et 0,13 g. Les sons sont des bruits dans des bandes d'octaves centrées sur 500 Hz et 2000 Hz. Leur niveau varie du niveau ambiant à 95 dB(A). De cette façon, les auteurs modélisent l'inconfort selon la formule : $Total_{DISC} = 0,337 + 32,1.g_{rms} + 10^{-41,9.g_{rms}-3,16+(0,0378+0,395.g_{rms})/L_p}$. L'inconfort total est donc une combinaison linéaire de l'inconfort vibratoire et de l'inconfort sonore, associée à une interaction de faible importance. La variation de l'inconfort vibratoire est

linéaire avec celle du niveau vibratoire alors que l'inconfort sonore varie de manière logarithmique avec le niveau sonore. L'interaction relevée prend la forme d'une dépendance de la contribution du niveau sonore à l'inconfort sonore qui dépend du niveau vibratoire. Celle-ci est très faible et par la suite négligée par les auteurs.

Leatherwood étudie également l'influence du son et des vibrations sur l'inconfort [LEAT 79]. Il parvient à établir un modèle et à prédire des contours de confort équivalents. 60 sujets en position assise comparent, par estimation d'amplitude, des associations de sons et de vibrations verticales à des vibrations seules. Ils utilisent une échelle numérique graduée. Les vibrations sont sinusoïdales de fréquences $f = 3 - 6 - 9 - 12 \text{ Hz}$ et d'amplitudes variant de 1 à 4 sur une échelle d'inconfort précédemment établie dans ses travaux de recherche. Les sons sont des bruits dans les bandes d'octaves centrées sur $f = 63 - 125 - 250 - 500 - 1000 - 2000 \text{ Hz}$ et 4 niveaux sont également retenus. Le modèle obtenu est complexe. Il révèle que les contributions respectives des modalités sonores et vibratoires dépendent de leur niveau respectif. Une interaction significative apparaît également entre ces deux paramètres. Ainsi, par exemple, pour des niveaux vibratoires suffisamment élevés pour produire beaucoup d'inconfort, l'ajout de bruit n'a que peu d'influence. Par contre, à niveau vibratoire faible, l'augmentation du niveau sonore augmente sensiblement l'inconfort. Enfin, ce modèle met en évidence que l'évaluation de l'inconfort global dépend fortement de la composition spectrale des bruits utilisés.

Leatherwood publie finalement une extension du travail de recherche de la NASA relatif au confort vibro-acoustique pour des occupants d'une cabine d'avion [LEAT 80] [LEAT 90]. La synthèse de l'ensemble des travaux de recherche, menés sur environ 3000 sujets, permet d'aboutir à un modèle de confort très poussé, tenant compte, en plus de l'influence du son et des vibrations, de paramètres tels que la direction des vibrations et de leur durée. Ce modèle n'est pas présenté en détail dans cette étude, mais son domaine d'application est l'évaluation du confort avec des stimuli vibratoires (bruits ou sinusoïdes) de niveaux allant jusqu'à $0,4 \text{ m/s}^2$ en présence de sons, de niveaux compris entre $65 \text{ dB}(A)$ et $100 \text{ dB}(A)$. Leatherwood fait apparaître un terme d'interactions d'importance significative entre le son et les vibrations. Enfin, l'influence du contenu fréquentiel des vibrations est intégrée au modèle par sommation des contributions individuelles de chaque fréquence.

Howarth et al. étudient la gêne provoquée par des vibrations et des sons enregistrés dans des habitations aux passages de trains proches [HOWA 90a]. 24 sujets doivent alors estimer la gêne vibratoire, sonore et globale provoquée en assignant une valeur numérique à chaque présentation de stimuli (méthode d'estimation). Six niveaux vibratoires ($VDV = 0,07 - 0,4 \text{ m/s}^{1,75}$) et

six niveaux sonores ($L_p = 54 - 79 \text{ dB}(A)$) sont retenus. Toutes les combinaisons sont présentées aux sujets et la durée des stimuli est de 24 secondes. Les auteurs observent que les vibrations n'influencent pas les évaluations sonores. À l'inverse, le son influence l'évaluation des vibrations, en fonction de l'amplitude relative des deux stimuli. Ainsi, la gêne provoquée par des vibrations de faibles amplitudes décroît pour les niveaux sonores les plus élevés, mais la gêne vibratoire provoquée par les vibrations les plus fortes augmente avec les niveaux sonores les plus élevés. Enfin, la gêne globale est liée aux niveaux relatifs des stimuli sonores et vibratoires. Les auteurs parviennent ainsi à établir un modèle de prédiction ($\psi = 15,9 + 260 \cdot \varphi_{vib}^{1,04} + 0,167 \cdot \varphi_{son}^{0,039}$) mais ils n'intègrent pas les interactions qu'ils décrivent au final comme faibles et non-systématiques.

Howarth et al. évaluent de nouveau les effets du son et des vibrations verticales de passages de trains sur la préférence [HOWA 90b]. Lors de la comparaison par paires de différentes associations de stimuli sonores et vibratoires, ils invitent 30 sujets à indiquer lequel des sons ou laquelle des vibrations devrait être réduits. Toutes les combinaisons de 6 niveaux sonores ($L_p = 48 - 73 \text{ dB}(A)$) et de 6 niveaux vibratoires ($VDV = 0,07 - 0,4 \text{ m/s}^{1,75}$) sont évaluées. Par cette méthode, les auteurs établissent des contours d'équivalences des stimuli sonores et vibratoires : ceux-ci sont jugés équivalents lorsque la moitié des sujets a préféré réduire le niveau des vibrations et l'autre moitié celui des sons. Ils aboutissent également à un modèle de préférence pouvant être utilisé pour prédire si la diminution des sons ou des vibrations aura un plus fort impact sur la gêne globale ($L_{AE} = 29,3 \cdot \log_{10}(VDV) + 89,2$). Les résultats montrent que la gêne globale dépend à la fois du son et des vibrations. L'augmentation du son a moins d'effet sur la gêne globale pour les niveaux vibratoires les plus forts que pour les niveaux vibratoires les plus faibles. Enfin, l'augmentation du niveau vibratoire a moins d'effet sur la gêne aux niveaux sonores les plus élevés.

Howarth et al. complètent ensuite leur étude de vibrations verticales mesurées dans des habitations proches de voies ferrées, par des recherches plus systématiques concernant la nature des stimuli utilisés [HOWA 91]. Ils font évaluer à 20 sujets des reproductions d'enregistrement (6 passages de trains de durée différente) de sons et de vibrations ($VDV = 0,056 - 0,4 \text{ m/s}^{1,75}$). Le protocole employé est identique à celui de l'expérience précédente et conduit au modèle suivant : $\psi = 22,7 + 243 \cdot \varphi_{vib}^{1,18} + 0,265 \cdot \varphi_{son}^{0,036}$. Les résultats sont proches de ceux de l'expérience précédente : le son et les vibrations contribuent tous deux à la gêne globale et aucune interaction significative n'apparaît.

Les études les plus récentes concernent le domaine automobile. Ainsi, Parizet et al. évaluent l'effet du son et des vibrations d'un habitacle automobile sur les évaluations de chacune de ces modalités [PARI 04]. 34 sujets sont

soumis à différentes combinaisons de vibrations verticales (du siège et du volant) et de sons enregistrés dans des véhicules fonctionnant au ralenti. Les niveaux sonores varient de 51 à 60 $dB(A)$ tandis que les niveaux vibratoires du siège sont compris entre 0,1 et 0,8 m/s^2 . La tâche des sujets consiste à comparer des paires de stimuli. Ils doivent successivement indiquer leur préférence en termes de gêne sonore pour des sons seuls et accompagnés de vibrations, ainsi qu'en termes de gêne globale en présence des deux modalités. Les comparaisons entre les évaluations de sons seuls et de sons évalués en présence de vibrations mettent en évidence que les vibrations ont une influence faible mais significative sur les évaluations sonores. Enfin, pour certains sujets, la gêne globale apparaît liée aux seules vibrations, alors que pour d'autres, elle est liée à la fois aux sons et aux vibrations.

Pour finir, Amman et al. évaluent les contributions respectives du son et des vibrations lors d'évaluations de différentes situations de roulage automobile reproduites en simulateur [AMMA 07]. Des stimuli vibratoires et sonores sont présentés, d'abord seuls, puis simultanément, à 24 sujets au cours de deux expériences. Chacune d'elle correspond à des situations de roulage différentes (stationnaires ou passage de petits obstacles). Les stimuli vibratoires incluent 6 degrés de liberté et leur durée est de 1 seconde. La tâche des sujets consiste à indiquer leur préférence parmi chaque paire de stimuli. Les résultats montrent que les contributions de chacune des modalités à l'évaluation globale sont équivalentes. Les auteurs attribuent cet équilibre à la forte corrélation entre les sons et les vibrations utilisés. Enfin, aucune interaction n'est observée.

2.3.2.2 Synthèse

Comme pour les mesures de seuils absolus, de seuils différentiels et de contours d'iso-perception, la comparaison de toutes ces études est très délicate. En effet, ces expériences font intervenir des stimuli, des dispositifs et des protocoles expérimentaux très variés. Cependant, la plupart des recherches s'accordent sur le fait que la gêne globale ou le confort d'une situation dépendent à la fois des modalités sonores et vibratoires. Le rôle de leur niveau est ainsi systématiquement souligné, même si leurs contributions relatives à l'évaluation globale de l'environnement varient fortement d'une étude à l'autre. Parfois, les vibrations dominent les évaluations [DEMP 76], alors que d'autres fois, le son est la principale modalité [LEAT 79]. L'équilibre ou le déséquilibre entre les deux modalités semblent liés aux conditions expérimentales [AMMA 07], à la nature des stimuli ainsi qu'aux domaines d'amplitudes étudiés. Enfin, certaines recherches révèlent que d'autres caractéristiques physiques des stimuli participent de manière très significative aux évaluations. Ainsi, Leatherwood intègre à son modèle un rôle prépondérant à la direction des vibrations et à leur contenu fréquentiel [LEAT 80], ce qui est cohérent avec la forte dépendance

fréquentielle des contours d'iso-confort ([MIWA 71] [BELL 02] [MANS 05] [MORI 06]). Des corrections de durée sont également intégrées aux modèles les plus complexes [LEAT 80] [HOWA 91].

La comparaison des études, menée avec précaution, montre la difficulté de prouver l'existence d'une interaction entre les modalités sonores et vibratoires. Aucune tendance claire ne se dégage de ce point de vue et les résultats diffèrent d'une étude à l'autre. Par exemple, deux études utilisant des stimuli réels [HOWA 90a] [HOWA 91] ne révèlent aucune interaction entre le son et les vibrations lors d'évaluation de la gêne globale. À l'inverse, Howarth et al. [HOWA 90b] rapportent qu'une augmentation du son a moins d'effet sur la gêne lorsque le niveau vibratoire est élevé, et qu'une augmentation des vibrations a moins d'effet à niveau sonore élevé. Ceci semblerait indiquer que la sensation globale est dominée par la plus gênante ou la plus forte des deux modalités, comme le suggèrent Parizet et al. [PARI 04]. Dempsey et al observent également sur des signaux réels une interaction significative [DEMP 79] [LEAT 79] [LEAT 80]. Quelques manifestations prouvent donc que l'évaluation des vibrations peut être influencée par le son alors que seuls certains travaux montrent une interaction significative pour les niveaux vibratoires et sonores les plus élevés. Ainsi, les preuves d'une interaction demeurent très minces car elles ne sont pas systématiques et s'avèrent souvent très faibles.

2.3.3 Conclusion

Quelques études psychophysiques montrent l'influence des modalités sonores et vibratoires sur leurs propriétés perceptives mais les effets d'interactions sont soit non significatifs, soit très faibles. Pour les évaluations de confort ou de gêne globale, toutes les recherches semblent s'accorder sur le fait que le son et les vibrations participent aux évaluations globales. Les contributions de chacune de ces modalités semblent dépendre des conditions expérimentales, et notamment de leur niveau. Parfois, des interactions se manifestent et peuvent se traduire par des effets antagonistes ou synergiques (l'augmentation du son peut réduire l'inconfort et inversement). Mais, tous ces effets, s'ils sont significatifs, restent très faibles.

Cette synthèse très détaillée de la littérature confirme les rôles essentiels des modalités sonores et vibratoires dans les évaluations de confort de roulage automobile. Des interactions sont de plus envisageables entre ces deux modalités et une grande attention doit être portée à la détermination de leurs contributions relatives au confort.

3 Approche choisie

Dans cette étude, le moyen d'essai utilisé pour l'étude du confort vibro-acoustique de roulage basse vitesse est constitué d'un banc vibratoire. Il s'agit d'une plate-forme excitable verticalement, support d'un siège de véhicule. Ce dispositif est placé dans un laboratoire équipé de matériel de restitution sonore et de projection d'images enregistrées dans les véhicules. Dans ce simulateur, un sujet peut donc être soumis à des vibrations verticales identiques à celles mesurées en voiture. Dans le même temps, il peut être exposé à un champ sonore au moyen d'un casque de précision ou de haut-parleurs avec un caisson de basse.

L'étude est menée dans des conditions de circulation sur route dégradée. Il s'agit de situations de conduite typiques et très intéressantes pour le développement des véhicules. Le choix des conditions de circulation est aussi guidé par la contrainte de faisabilité technique.

Certaines situations exigent, en plus des déplacements verticaux permis par le dispositif actuel, des excitations longitudinales qui induisent des modifications importantes du système. La restitution de petites percussions qui sollicitent le véhicule au passage d'obstacles marqués sur la chaussée impose, par exemple, la reproduction fidèle des vibrations dans les directions horizontales et verticales. De telles situations sont donc écartées de l'étude au privilège de conditions de roulage plus stationnaires. L'étude du confort de roulage automobile basse vitesse se limite aux seules routes dont le revêtement est uniformément dégradé.

Dans le but de mesurer l'influence de l'environnement simulé sur les évaluations de confort, la première étape du travail de recherche consiste en une évaluation de l'intérêt de la stimulation visuelle. Si la présentation simultanée d'images de la route à l'exposition aux bruits et aux vibrations améliore sensiblement l'immersion en simulateur, elle en complique considérablement la mise en œuvre expérimentale. L'intérêt de l'amélioration du contexte de la simulation apportée par ces images doit donc être évalué avec précision.

La littérature rend compte de plusieurs cas d'interactions significatives entre audition et vision. En ce qui concerne le confort de roulage automobile, il est légitime de s'attendre à ce que la vision préalable d'un défaut de la route modifie la gêne ressentie par le sujet au passage du véhicule. Dans ce cas précis, les images peuvent-elles modifier la sensation des sujets ou sont-elles simplement un lien utile pour rendre plus réaliste la situation ? Deux expériences sont mises en place pour mesurer les importances relatives des modalités vibratoires, sonores et visuelles sur les évaluations.

La première expérience traite du rôle de la modalité visuelle. Elle consiste à étudier l'influence du degré d'immersion et de contextualisation liés aux modalités vibratoires, acoustiques et visuelles sur les évaluations de confort de roulage en simulateur. Pour cela, des sujets sont exposés à différentes combinaisons de bruits, de vibrations et d'images de la route. Cette expérience permet d'optimiser la restitution en déterminant, notamment, si la modalité visuelle est indispensable aux évaluations.

La deuxième expérience consiste à mesurer l'influence du type de contexte visuel associé à des stimuli vibro-acoustiques. L'effet du type de scène visuelle sur les évaluations de confort global est étudié en détail. Des enregistrements acoustiques et vibratoires sont associés à des visuels très variés qui modifient l'attente du sujet vis-à-vis de la situation.

Les paramètres des signaux utilisés par les sujets pour leurs évaluations doivent alors être identifiés. D'une part, cette détermination passe d'une part par l'étude des contributions sonores et vibratoires au confort automobile, et d'autre part par la recherche d'une image perceptive des véhicules en termes de confort.

En effet, la littérature révèle que les effets des sons et des vibrations sur les évaluations du confort vibro-acoustique d'un environnement sont très variés. Les contributions de l'une ou l'autre des modalités dépendent fortement des conditions expérimentales et, des interactions peuvent parfois même apparaître. Il semble donc naturel de s'attendre à des phénomènes similaires dans le domaine automobile.

Une expérience est mise en place pour quantifier précisément les rôles des modalités sonores et vibratoires et pour modéliser les contributions des variations de niveaux aux évaluations de confort. Des signaux acoustiques et vibratoires mesurés dans des véhicules, et modifiés en niveaux, sont évalués en termes de confort par des sujets naïfs. Un modèle de confort vibro-acoustique automobile permet alors de prédire avec robustesse les évaluations en fonction des niveaux vibratoires et sonores mesurés dans un habitacle automobile.

Enfin, pour des conditions de circulation différentes, ainsi que pour des véhicules différents, il convient de déterminer si la sensation du passager varie ou reste relativement constante. Cette sensation dépend-elle essentiellement du système excité (la voiture) ou de l'excitation (la route) ? La réponse à cette question est apportée par un test de classement des vibrations mesurées dans plusieurs véhicules circulant sur des routes différentes, puis

égalisées en niveau avant d'être restituées dans le simulateur. Les résultats de la tâche de catégorisation réalisée par des sujets naïfs permettent d'affiner la connaissance des paramètres qui influencent les évaluations de stimuli automobiles en simulateur et, d'estimer l'acuité de jugement concernant la modalité vibratoire.

Enfin, les travaux de recherche s'orientent vers une problématique industrielle liée à la conception des véhicules : appréhender les liens entre les prestations du véhicule et le confort vibro-acoustique.

Les prestations offertes par un véhicule sont définies par l'ensemble des exigences auxquelles celui-ci doit répondre en termes de services proposés à ses occupants. Elles sont déclinées sous forme d'items de cotation et servent de référentiels tout au long du projet de développement d'un nouveau véhicule. Les principaux items de cotation liés au confort de roulage à basse vitesse définissent les attentes vis-à-vis du filtrage sonore et vibratoire du véhicule. Ces items de cotation sont évalués par des experts et définissent, dès la conception, l'environnement vibro-acoustique auquel sera soumis l'occupant du véhicule.

Pourtant les définitions de ces items ne sont pas issues d'approches d'analyse sensorielle et le lien entre le confort et les propriétés des stimuli est mal connu. Pour mettre en évidence les liens entre les prestations automobiles et le confort vibro-acoustique, des évaluations expertes sont comparées à des évaluations naïves, au sein de deux expériences perceptives.

Tout d'abord, la réalisation de l'épreuve perceptive d'évaluations expertes de stimuli vibratoires : elle consiste à faire évaluer des signaux artificiels par des experts en charge d'évaluations de prestations de véhicules. Ces signaux artificiels sont évalués selon les principaux items utilisés au sein du groupe pour décrire les vibrations. Le lien entre les paramètres de synthèse et les évaluations est établi.

Ensuite les évaluations de confort de stimuli vibratoires de synthèse sont recherchées : des sujets naïfs sont exposés à des signaux artificiels dont la composition est inspirée des résultats des évaluations expertes. L'analyse de ces données permet, d'une part de déterminer objectivement les liens entre le confort et les paramètres de synthèse utilisés, et d'autre part d'identifier les items de cotation les plus pertinents pour le confort.

Pour résumer, la Figure 15 synthétise la démarche scientifique adoptée lors de ce travail de recherche. Différentes hypothèses sont vérifiées,

hypothèses d'abord liées aux évaluations de confort en environnement simulé, puis s'orientant, au fur et à mesure, vers le domaine automobile.

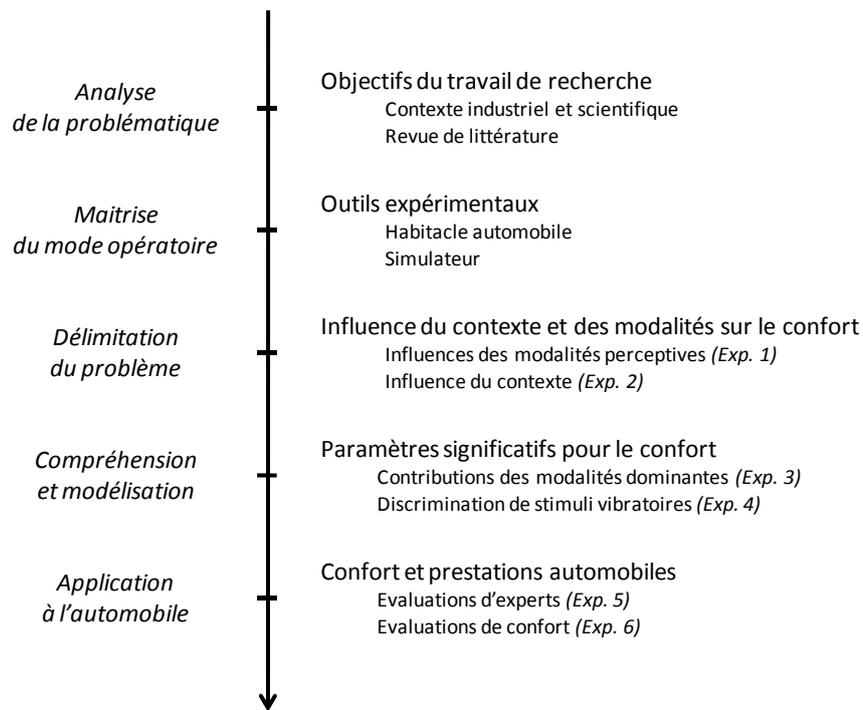


Figure 15 : Synoptique du travail de recherche

Partie 2

Outils expérimentaux

2

OUTILS EXPERIMENTAUX

1	Mesures en véhicule	84
1.1	Description	84
1.2	Chaîne de mesures	86
2	Restitution en laboratoire	86
2.1	Laboratoire	87
2.1.1	Description	87
2.1.2	Caractéristiques	87
2.2	Restitution sonore	89
2.3	Banc vibratoire.....	89
2.3.1	Description	89
2.3.2	Caractéristiques dynamiques	91
2.3.3	Influence du siège	92
2.4	Pilotage du simulateur	94
3	Conclusion.....	95

II Outils expérimentaux

L'étude de l'évaluation du confort vibro-acoustique passe par la réalisation d'un test perceptif en simulateur. La simulation doit permettre la reproduction fidèle des vibrations et des sons mesurés dans l'habitacle des véhicules, accompagnée de la projection des images qui correspondent au champ de vision du passager. La collecte des mesures en véhicule passe par la mise au point d'un protocole expérimental spécifique et le déploiement d'une chaîne de mesures adaptées. La restitution nécessite l'équipement d'un laboratoire et la conception d'un simulateur vibratoire. Enfin, Mc Kay observe que de nombreux paramètres expérimentaux modifient l'évaluation des vibrations en laboratoire (caractéristiques des stimuli, système de restitution, tâche du sujet, etc.) [MCKA 72]. Ainsi, pour permettre la comparaison des résultats obtenus avec d'autres expériences, le matériel, le protocole employé pour les mesures et la restitution sont présentés en détail.

1 Mesures en véhicule

Le dispositif déployé permet l'enregistrement synchronisé des stimuli visuels, acoustiques et vibratoires auxquels est soumis le passager d'un véhicule. Les vidéos enregistrées correspondent à son champ de vision. Le champ sonore est mesuré au niveau de sa tête et les vibrations sont mesurées au niveau de la glissière de son siège. Les choix effectués ainsi que le matériel utilisé sont présentés ci-dessous.

1.1 Description

La Figure 16 présente l'implantation des capteurs dans l'habitacle des véhicules. Des vidéos de la route sont enregistrées avec une caméra numérique fixée sur le pare-brise. Le champ de prise de vue correspond à celui qu'aurait un passager assis sur le siège avant. Seul le tableau de bord est volontairement exclu pour éviter d'introduire des éléments de distinction entre les différents véhicules. L'objectif n'est pas d'obtenir des images les plus fidèles possibles de la route. La modalité visuelle est considérée comme supplémentaire et son influence n'est que contextuelle. Seul son contenu sémantique est pris en compte, c'est-à-dire les informations qu'elle apporte sur la situation (et non ses propriétés physiques). Aucune précaution supplémentaire n'est donc prise vis-à-vis de l'acquisition vidéo (calibration, etc.).



Figure 16 : Implantation des capteurs dans un habitacle de véhicule

Contrairement à la modalité visuelle, la restitution sonore doit être la plus fidèle possible. La mesure de l'ambiance sonore dans laquelle baignerait un sujet dans un véhicule doit être mesurée avec précision. L'enregistrement du champ de pression au niveau de la tête du passager est réalisé à l'aide d'une tête acoustique numérique placée sur le siège passager. Ce procédé, simple à mettre en œuvre, permet de recréer les effets de la spatialisation sonore lors de la restitution. Il simule également l'influence du corps et de la tête du passager sur le champ de pression à l'intérieur du véhicule.

Comme la modalité sonore, la modalité vibratoire demande une restitution la plus fidèle possible. Les accélérations au niveau du siège sont mesurées par 3 accéléromètres, orientés selon les 3 axes du repère lié au véhicule. Ils sont placés sur la glissière avant droite du siège. Ce choix est en désaccord avec la procédure décrite par la norme ISO 2631. Cette norme recommande de placer les capteurs à la surface de contact entre le sujet et la source de vibration. Pour mesurer les vibrations transmises par un siège de véhicule, il convient alors d'utiliser des nappes placées entre le siège et le sujet. Ce choix n'est pas retenu ici car de nombreux véhicules vont être mesurés. Les différences entre les sièges introduiraient alors une trop grande variabilité dans les résultats (formes, propriétés dynamiques et couplage homme-siège différents). Dans un tel cas, il est recommandé par la norme ISO-2631 de choisir un point de mesure le plus proche possible de la zone de contact. Le choix d'un point de référence accélérométrique au niveau de la glissière constitue un bon compromis. Il permet de s'affranchir des effets des différents

sièges tout en conservant des valeurs d'accélération représentatives de l'exposition aux vibrations.

1.2 Chaîne de mesures

La structure du dispositif mis en place est présentée dans la Figure 17. Les accéléromètres (Type ICP - PCB) et la tête acoustique (HMS III – Head Acoustics) sont reliés à un frontal d'acquisition (Octobox – Head Acoustics). Les microphones de la tête acoustique possèdent une dynamique maximale de 140 dB et leur bande passante est de 20 - 20000 Hz. Les accéléromètres ont une dynamique maximale de +/- 4900 m/s^2 de crête à crête et une bande passante de 1,5 - 7000 Hz. Les mesures acoustiques et vibratoires sont enregistrées sur un ordinateur (Head Recorder & Artemis 8 – Head Acoustics). Elles sont effectuées à la fréquence d'échantillonnage de 48 kHz avec une quantification de 24 bits. La caméra vidéo HD (HDR HC1E – Sony) est à la norme Haute-Définition. La résolution des vidéos est de 1920 x 1080 pixels. Enfin, la synchronisation entre le frontal d'acquisition et la caméra est réalisée à l'aide d'un signal d'horloge issu d'un lecteur numérique connecté aux 2 systèmes.

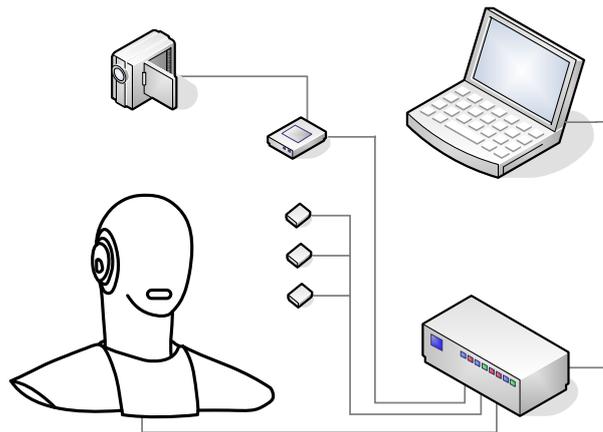


Figure 17 : Matériel de mesure

2 Restitution en laboratoire

Pour restituer en simulateur l'environnement vibro-acoustique et visuel d'un habitacle de véhicule, le sujet doit être dans une situation proche de celle rencontrée dans les véhicules. Ainsi est-il placé dans un laboratoire isolé de toute perturbation extérieure dont l'agencement correspond à celui d'un véhicule réel (configuration de la salle, utilisation d'un siège de véhicule, etc.). Les moyens utilisés doivent permettre de reproduire aussi fidèlement que possible, pour les stimuli acoustiques et vibratoires, l'éventail des fréquences et

des amplitudes mesurées. De plus, ces restitutions doivent s'accompagner de projections synchronisées des vidéos de la route.

2.1 Laboratoire

L'ensemble de ces contraintes impliquent la mise au point d'un simulateur dédié à l'évaluation du confort. Ce dispositif est décrit avec précision dans la suite de ce chapitre.

2.1.1 Description

Pour réaliser les expériences, un banc de simulation vibratoire est installé dans un laboratoire de 5 x 7 x 3 mètres dont les murs sont recouverts d'un matériau absorbant (Figure 18). Les vidéos de la route sont projetées sur un écran de 2 x 3 m, placé à 3 mètres, face aux sujets. Le banc vibratoire est équipé d'un siège de véhicule qui permet de reproduire les vibrations enregistrées dans l'habitacle. Ainsi, les sujets sont placés dans une situation réaliste, fidèle à l'environnement d'une voiture en phase de roulage.

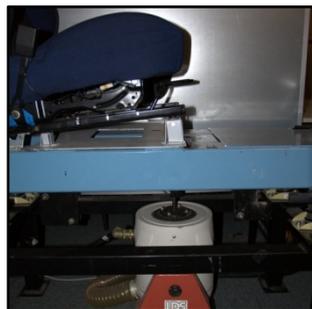


Figure 18 : Simulateur

2.1.2 Caractéristiques

Dans le laboratoire, les bruits de fond acoustiques et vibratoires sont estimés pour s'assurer que l'environnement extérieur ne nuit pas à la performance du simulateur et n'influence pas les sujets pendant les expériences perceptives.

Le niveau sonore du bruit de fond à la position de la tête du sujet est de 55 dB(A). Le temps de réverbération est de 0,1 s. Les seules sources sonores à l'intérieur du laboratoire sont l'échappement d'air assurant le refroidissement du banc et la ventilation de l'ordinateur. La Figure 19 présente le spectre du bruit de fond mesuré pendant 60 secondes en plaçant la tête acoustique sur le banc vibratoire. Les spectres des différentes sources sonores ainsi que le seuil de perception auditif [ISO-- 389-7] sont également présentés. La comparaison des courbes permet d'estimer l'émergence des bruits de chacun des éléments du système. Cependant, il est important de préciser que les bruits de ces 2 sources sonores sont complètement masqués par la restitution d'un son de véhicule. De plus, le bruit émis par le pot vibrant est indépendant du signal vibratoire joué.

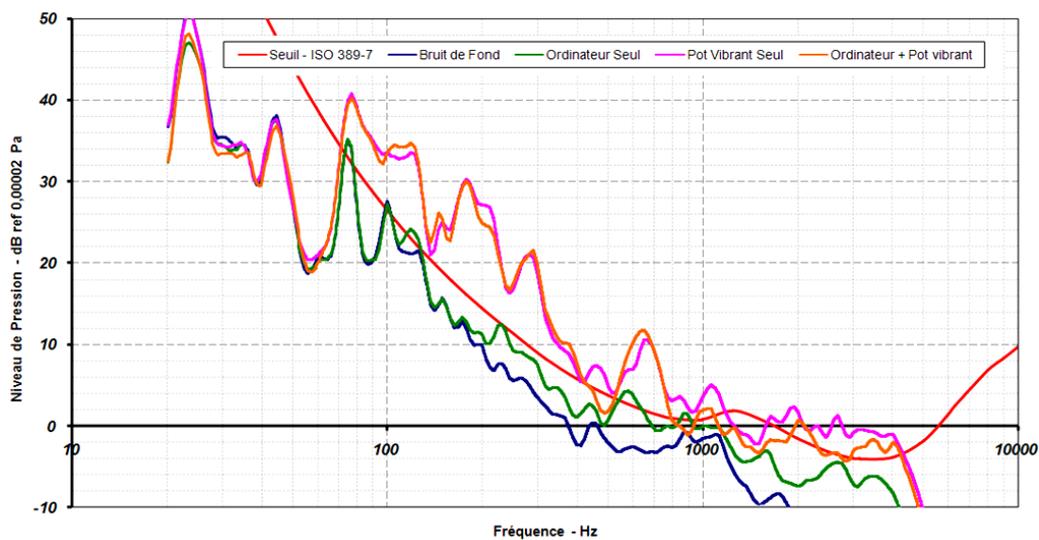


Figure 19 : Bruit de fond acoustique du simulateur

Le bruit de fond vibratoire est estimé au niveau de la glissière avant droite du siège du banc vibratoire. Les accélérations verticales, horizontales et transversales sont mesurées au niveau de la glissière avant droite du siège. Les enregistrements durent 60 secondes et un mannequin d'eau de 70 kg est placé sur le siège afin d'éviter toute perturbation de la mesure provoquée par d'éventuels mouvements d'un sujet. La Figure 20 présente les spectres calculés sur ces mesures ainsi que les seuils de perception de vibrations verticales du corps défini par la norme ISO -2631-2. Les niveaux mesurés sont systématiquement inférieurs d'au moins 20 dB au seuil de perception. En conséquence, aucune influence du bruit de fond vibratoire sur la perception et sur les évaluations n'est attendue.

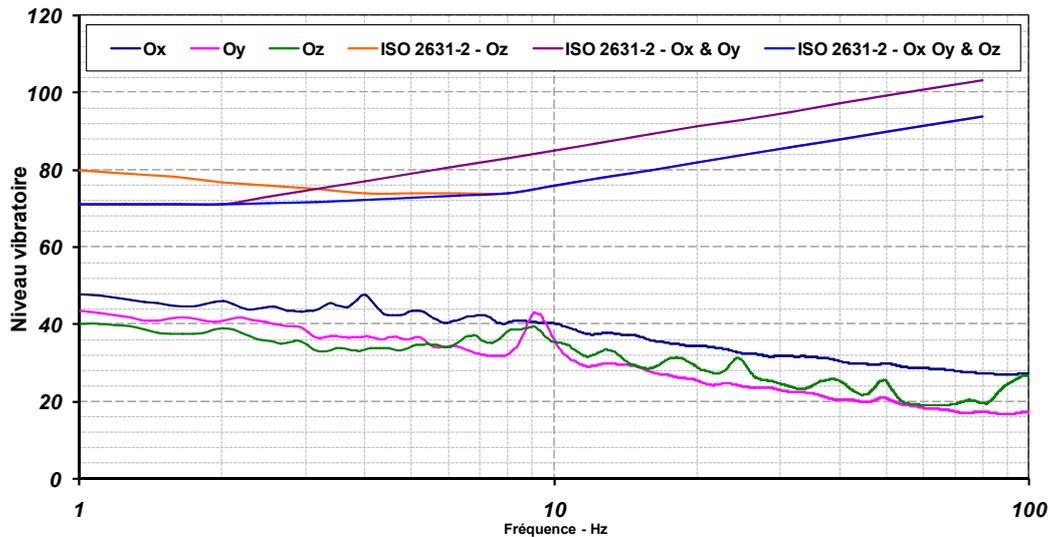


Figure 20 : Bruit de fond vibratoire du banc de simulation

2.2 Restitution sonore

Le système de restitution sonore est constitué soit d'un casque électrostatique (HA II & PEQ HPS IV – Head Acoustics), soit de haut-parleurs (7050A - GENELEC), tous deux soutenus en basses fréquences par un caisson de basse (8030A - GENELEC). Ce procédé permet de reproduire la perception des très basses fréquences par le corps ($f < 80$ Hz). Les enceintes et le caisson sont placés face aux sujets, derrière l'écran et masqués par des rideaux. Dans le cas d'une restitution sonore qui utilise les enceintes et le caisson, les enregistrements binauraux de la tête acoustique sont transauralisés à l'aide d'un logiciel spécifique (Génétrans - GENESIS). Ainsi un jeu de filtres destinés à compenser les chemins croisés entre les haut-parleurs et la tête du sujet est appliqué. Le champ sonore obtenu est analogue à celui dans lequel baignait la tête artificielle au moment de l'enregistrement. Cette étape permet de recréer une spatialisation correcte des enregistrements binauraux. Enfin, lorsque le casque est utilisé, les signaux sont filtrés pour annuler l'effet du pavillon de la tête artificielle.

2.3 Banc vibratoire

2.3.1 Description

Un système de restitution des vibrations du siège d'un véhicule en phase de roulage basse vitesse est nécessaire à la réalisation des expériences perceptives.

Ce système doit être fiable et reproduire le plus fidèlement possible les vibrations mesurées dans les véhicules.

Cependant, la difficulté de production complique véritablement l'étude de la perception des vibrations du corps entier en laboratoire. De plus, la plupart de ces systèmes sont conçus pour des tests de résistances des structures aux vibrations. Leur objectif premier est de tester la stabilité et la capacité des différentes parties d'une structure à résister aux vibrations (fatigue de pièces, fonctionnement dans des conditions dégradées, etc.). Enfin, les systèmes de productions de vibrations peuvent être classés en différentes catégories en fonction de la technologie qu'ils utilisent. Chacun de ces systèmes possède ses avantages et ses inconvénients. Ils sont donc optimisés pour des tâches différentes.

L'application à la simulation de vibrations automobiles exige à la fois des dispositifs pouvant solliciter des masses importantes (environ 200 kg) tout en permettant la production de signaux de contenu spectral complexe (i.e. pas une simple sinusoïde). Les technologies les plus répandues sont inertielles, hydrauliques, pneumatiques, et électrodynamiques. Les activateurs inertiels classiques sont les plus simples : ils permettent la génération d'efforts importants mais ne peuvent produire que les oscillations sinusoïdales. Les systèmes à vérins (hydrauliques ou pneumatiques) sont conçus pour solliciter des structures très lourdes. Leur coût est très élevé et ils émettent souvent des niveaux sonores supérieurs à 85 dB(A) pendant leur fonctionnement. Le dispositif le plus adapté à notre étude est donc l'activateur électrodynamique (pot vibrant). En effet, ce système permet la génération de vibrations de contenu fréquentiel large bande, et ce à des niveaux suffisants pour l'étude du confort vibratoire automobile. Les principales contraintes d'utilisation sont liées au système de refroidissement qu'il possède ainsi qu'à leurs faibles tolérances aux contraintes dans une direction différente de celle de leur fonctionnement. La sélection de l'activateur de notre simulateur s'oriente naturellement vers ce type de système (pot vibrant). Ce choix entraîne des simplifications sur les capacités du banc à reproduire les vibrations du siège selon les 3 directions O_x , O_y et O_z (complexité du montage). Ainsi, seul l'axe vertical (O_z) est pris en compte (Figure 18 : le pot vibrant orienté selon l'axe O_x n'est pas utilisé dans cette étude). Le choix de la conception d'un moyen simple d'un point de vue sa structure, mais précis en termes de contrôle des signaux, est retenu.

Le banc de simulation est finalement constitué d'une plateforme posée sur quatre ressorts sur laquelle est fixé un siège de véhicule. La masse de cette plateforme équipée d'un siège est d'approximativement 120 Kg. Cette plateforme est actionnée par un pot vibrant (V555E – LDS) piloté par un amplificateur (PA1000 - LDS). La force d'excitation maximum que peut

générer ce système est de 939 N pour un signal sinusoïdal et de 636 N_{eff} pour un bruit. La bande de fréquence d'utilisation possible est de 1 - 6300 Hz. L'accélération maximum, lorsque le pot fonctionne librement, est de 981 m/s^2 en régime sinusoïdal Hz et de 677 m/s^2 pour du bruit. Le débattement maximum de la tige du pot vibrant est de 25.4 mm (crête-à-crête). Les accélérations et déplacements maximum décroissent avec l'ajout de masse du système et dépendent donc de la morphologie du sujet placé sur le siège. Cependant, le pot vibrant ne supporte pas la charge statique du système (grâce aux 4 ressorts). Ainsi, il demeure largement surdimensionné par rapport son utilisation.

Au final, le banc de simulation vibratoire permet la restitution des vibrations verticales enregistrées dans les véhicules, correctement reproduites au niveau de la glissière (et non à l'interface entre le siège et le sujet). La reproduction ne correspond donc pas à des véhicules réels puisque l'effet de leur siège n'est pas pris en compte.

2.3.2 *Caractéristiques dynamiques*

Le fonctionnement dynamique du banc vibratoire est étudié en détail. Dans un premier temps, les fonctions de transfert (Axes O_x , O_y et O_z) entre le signal électrique à l'entrée de l'amplificateur et les accéléromètres placés au niveau de la glissière avant droite du siège sont mesurées. Pour cela, un bruit blanc d'un niveau global de 100 dB d'une durée de 60 secondes est utilisé ($f_s = 48000$ Hz - 24 bits). Les résultats sont présentés sur la Figure 21. Les fonctions de transfert tiennent compte de la cohérence entre le signal source et les accélérations mesurées. Ces dernières ne sont tracées que lorsque les signaux d'entrée et de sortie sont fortement corrélés, ce qui permet de s'assurer de la linéarité du système.

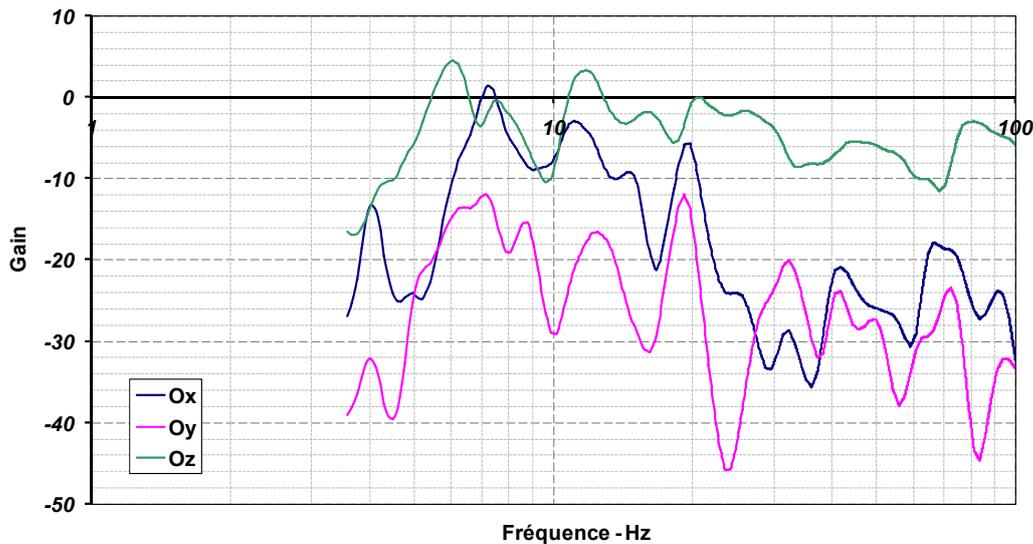


Figure 21 : Fonction de transfert du banc vibratoire

La cohérence est très bonne à partir de 3,5 Hz. La fonction de transfert la plus importante est celle de l'axe Oz puisqu'elle correspond à la sollicitation souhaitée du banc. Elle ne fait pas apparaître de variations trop importantes entre ses gains maximum et minimum (environ 15 dB). Son effet peut donc être compensé par le filtrage numérique des signaux accélérométriques. Les détails sur les étapes relatives à ces traitements sont détaillés dans la suite du manuscrit (Annexe B). Les fonctions de transfert des axes Ox et Oy indiquent que la sollicitation du système selon l'axe Oz par le pot vibrant induit un couplage avec les mouvements vibratoires dans les autres directions. Ces mouvements possèdent des amplitudes plus faibles que celles des vibrations selon Oz. On observe, pour toutes les fréquences, que la courbe Oy est 15 dB plus basse que la courbe Oz. Le couplage entre l'axe Oz et Oy est donc négligeable. Par contre, la courbe Ox est éloignée de la courbe Oz, excepté entre 7 et 10 Hz. Le banc introduit donc un couplage significatif dans la direction Ox pour ces fréquences. Au final, les caractéristiques dynamiques du banc vibratoire semblent satisfaisantes. Le banc vibratoire permet la restitution correcte des vibrations verticales mesurées au niveau de la glissière d'un véhicule dans la bande 4-100 Hz.

2.3.3 Influence du siège

Le simulateur est équipé d'un siège automobile. La structure même du siège (plan d'assise incliné de 6° par rapport à l'horizontal) modifie à la fois la direction et la transmission des vibrations verticales du corps transmises au sujet. Les effets du siège sur la transmission des vibrations verticales au corps d'un sujet sont estimés. Une étude précise des couplages entre l'homme et le

siège est toutefois très complexe et sort du cadre de ce projet. Aussi, seules ses caractéristiques dynamiques dans les plages de fréquences et d'amplitude considérées sont mesurées afin d'estimer le couplage introduit au niveau de l'assise.

Les fonctions de transfert selon les directions $O_{z_glissière}/O_{x_assise}$, $O_{z_glissière}/O_{y_assise}$ et $O_{z_glissière}/O_{z_assise}$ entre la glissière et l'assise du siège ($f = 4 - 100$ Hz) sont évaluées. Les mesures sont effectuées grâce à des cupules accélérométriques tri-axes (Ox, Oy et Oz) placées à l'interface entre le siège et le sujet. Le banc vibratoire est excité par un bruit blanc (niveau global 100 dB) pendant 60 secondes et 3 accéléromètres sont placés au niveau de la glissière (directions Ox, Oy et Oz). Les mesures sont répétées sur 8 sujets de poids et de taille différents (55 – 80 kg et 1,60 – 1,85 m). La Figure 22 présente les résultats obtenus. Une étude de la dispersion des mesures des 8 sujets montre que les écarts entre les sujets sont très faibles. Une telle répétabilité des mesures indique que les différences anthropométriques des 8 sujets ont finalement peu d'influence sur les fonctions de transfert mesurées. La fonction de transfert verticale (Oz) indique que le siège se comporte comme un filtre passe bande. Les vibrations dont les fréquences sont inférieures à 5 Hz et supérieures à 20 Hz sont atténuées de plus de 20 dB. La transmission des vibrations selon les axes Ox et Oy apparaît plus faible que celle selon l'axe Oz. Au final, le siège minimise le couplage entre les axes Oz et Ox introduit par la structure du banc.

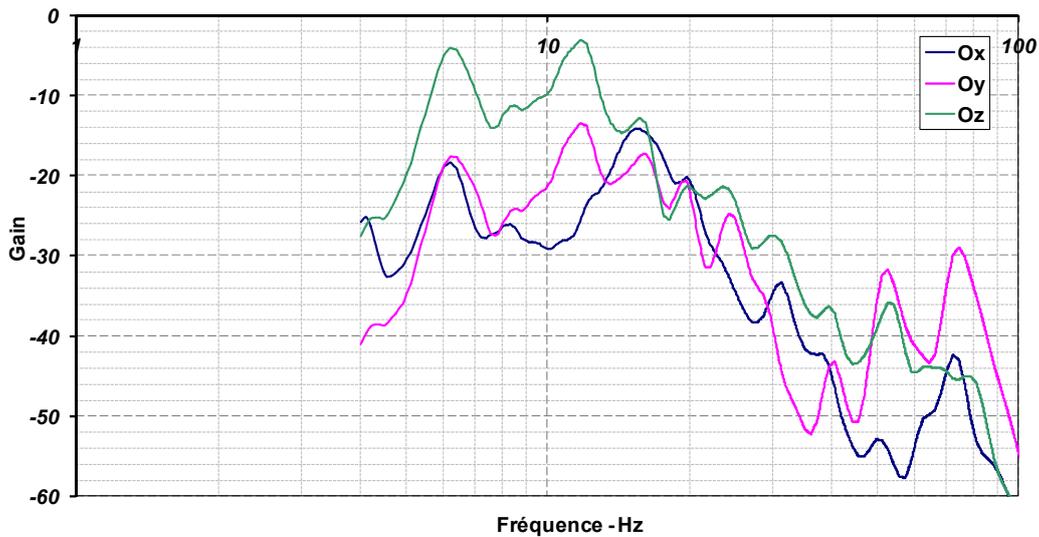


Figure 22 : Fonctions de transfert du siège

2.4 Pilotage du simulateur

L'ensemble du dispositif déployé permet de placer les sujets dans une situation proche de l'environnement vibro-acoustique d'une voiture en phase de roulage à basse vitesse. Le dispositif de restitution (Figure 23) est piloté par un ordinateur équipé de plusieurs cartes sons et d'un vidéo projecteur (VPL CX70 - Sony). Les cartes sons gèrent la restitution sonore (Digi 96 Pad - RME) et vibratoire (EMU1820m - Creative). Les enregistrements vidéo, sonores et vibratoires sont issus de dispositifs d'enregistrements différents (frontal et caméra). Les données sont stockées dans des fichiers séparés. Les vidéos sont encodées au format natif HDV (fichiers .m2t) et les sons et les vibrations sont contenues dans des fichiers audio standards (fichiers .wav). Un logiciel de lecture développé spécifiquement assure la restitution synchronisée de l'ensemble de ces fichiers (MultiG - PSA Peugeot Citroën). Ce logiciel garantit un décalage temporel inférieur à 3 ms entre les fichiers vidéo et les fichiers sons. Son lancement s'effectue en ligne de commande. Il s'intègre donc parfaitement aux interfaces de gestion de test perceptifs (Fizz - Biosystem et Easy_i - PSA Peugeot Citroën). Ainsi, les sujets sont rendus entièrement autonomes lors des séances d'évaluations.

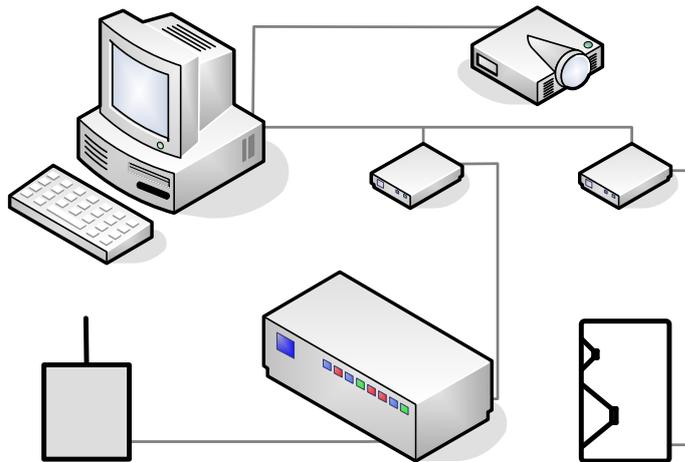


Figure 23 : Système de restitution

3 Conclusion

Les choix techniques effectués pour l'architecture du simulateur permettent de soumettre les sujets à des stimuli dont les caractéristiques sont contrôlées de manière satisfaisante. L'ensemble des modalités sensorielles concernées par l'évaluation du confort interviennent. Concernant les modalités acoustiques et vibratoires, il est généralement admis que la prédiction du confort vibro-acoustique de roulage basse vitesse nécessite l'intégration simultanée de ces deux modalités. Le protocole de mesures déployé, ainsi que la structure du laboratoire permettent une restitution très fidèle de ces deux types de stimuli. Le simulateur fait également intervenir la modalité visuelle. Dans cette étude, elle est considérée comme un élément de contexte apporté aux évaluations. Même si les vidéos de la route présentées aux sujets ne constituent pas une reproduction fidèle de son champ de vision, leur synchronisation avec les stimuli acoustiques et vibratoires suffit cependant à apporter une information claire sur les conditions de roulage reproduites par le simulateur.

Enfin, de nombreuses hypothèses simplificatrices sont implicitement avancées concernant le degré d'immersion dans lequel est placé le sujet (absence de cabine de véhicule, vibrations verticales du siège seules, etc.). Ces simplifications sont induites par la grande difficulté expérimentale liée à l'immersion complète en laboratoire (nécessité d'une cabine de voiture, écran panoramique, protocole de mesure, restitution sonore en milieu clos, montage multi-axes qui augmentent le temps et le coût de préparation des expériences). Au vu des simplifications effectuées, le simulateur ne représente, en aucun cas, un véhicule réel. Il place incontestablement le sujet dans un environnement artificiel réaliste où il peut être soumis à des stimuli correspondant à ceux rencontrés dans les véhicules. Son utilisation est donc pertinente pour l'étude

du confort vibro-acoustique, même si la comparaison des résultats « laboratoire » et « véhicule réel » ne peut pas être faite directement.

Partie 3

Influences du contexte et des modalités perceptives sur le confort

3

INFLUENCES DU CONTEXTE ET DES MODALITES PERCEPTIVES SUR LE CONFORT

1	Introduction	99
2	Influence des modalités vibratoires, sonores et visuelles (Exp. 1).....	102
2.1	Protocole	102
2.2	Résultats.....	105
2.2.1	Analyses préliminaires	105
2.2.2	Effets des modalités.....	108
2.2.3	Caractéristiques des stimuli	111
3	Influence du contexte visuel (Exp. 2)	112
3.1	Protocole	113
3.2	Résultats.....	113
3.2.1	Analyses préliminaires	114
3.2.2	Effets du type de scène visuelle	116
4	Conclusion.....	117

III Influences du contexte et des modalités perceptives sur le confort

1 Introduction

La première étape de l'étude de l'évaluation multimodale du confort en simulateur est méthodologique. Deux expériences sont mises en place pour évaluer les importances relatives des modalités vibratoires, sonores et visuelles sur les évaluations.

La première expérience consiste à étudier l'influence du degré d'immersion et de contextualisation apporté par les modalités vibratoires, acoustiques et visuelles sur des évaluations de confort de roulage en simulateur. Les sujets sont exposés à différentes combinaisons de bruits, de vibrations et d'images de la route. Cette expérience doit permettre d'optimiser la restitution en déterminant si la modalité visuelle est nécessaire aux évaluations (la projection de vidéo alourdit sensiblement le dispositif expérimental à déployer).

L'objectif de la 2^{ème} expérience est d'évaluer l'effet du type de contexte visuel sur les évaluations de confort global. À cet effet, des enregistrements acoustiques et vibratoires sont associés à différents contextes visuels qui modifient l'attente du sujet vis-à-vis de la situation. Pour obtenir des manifestations plus prononcées des effets attendus, les choix de ces mises en situation visuelle s'orientent vers des configurations très variées.

Huit véhicules de marques différentes sont sélectionnés pour la mesure des stimuli acoustiques, vibratoires et visuels (Tableau 6). Tous sont de classe moyenne (segment M) et possèdent des moteurs 4 cylindres (5 moteurs diesels et 3 essences).

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8
Constructeur	Xxxxx							
Modèle	Xxxxx							
Année	2006	2006	2006	2006	2006	2006	2006	2006
Type	Berline	Coupé	Berline	Coupé	Berline	Berline	Monospace	Berline
Référence	Xxxxx							
Transmission	Mécanique							
Carburant	Diesel	Essence	Diesel	Diesel	Diesel	Essence	Diesel	Essence

Tableau 6 : Références des véhicules mesurés

Des échantillons de 4 portions de route différentes sont sélectionnés pour les enregistrements. Leur durée est de 6 secondes. Les véhicules circulent

en 2nd à 30 Km/h. Les critères de sélection correspondent d'une part à la pertinence par rapport à l'évaluation de la prestation de confort vibro-acoustique d'un véhicule, et d'autre part au contexte visuel associé. Ainsi, les portions sélectionnées possèdent des revêtements plus ou moins dégradés dont l'apparence varie fortement (Figure 24) :

- la route A est une route de campagne à revêtement rugueux. Son aspect est régulier et l'extrait correspond à une situation de roulage stationnaire ;
- la portion de route B est un changement de revêtement. Le véhicule passe d'une partie de la route en bon état à une partie de voie plus ancienne beaucoup plus dégradée. Le passage sur la partie dégradée renvoie à un événement vibro-acoustique très marqué ;
- la route C possède un revêtement neuf sans aucune irrégularité. Son aspect visuel est très lisse et évoque une situation très confortable et régulière ;
- enfin, la route D, fortement dégradée, présente de nombreuses irrégularités. L'amplitude des déformations de la chaussée entraîne des déplacements verticaux de la scène visuelle, ce qui suggère sans ambiguïté une situation très inconfortable.

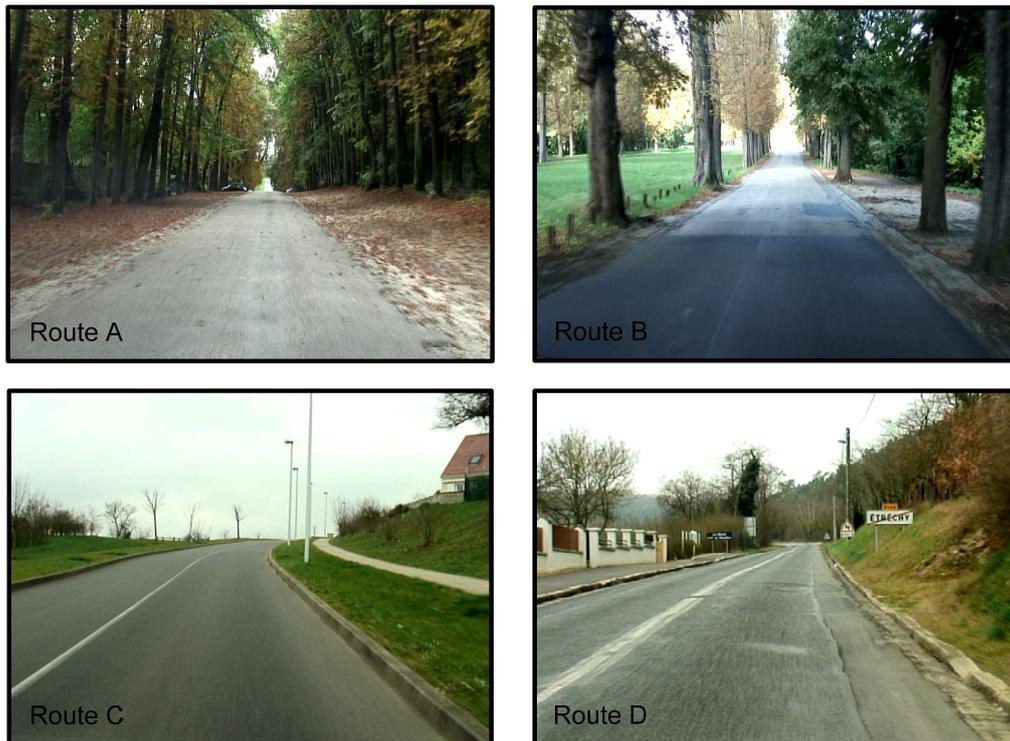


Figure 24 : Extrait des vidéos enregistrées sur les 4 routes sélectionnées

Le choix de toutes ces situations est expressément varié, dans le but de placer le sujet dans des attentes différentes en termes de confort du véhicule. En effet, le régime stationnaire de la situation A oriente l'évaluation vers la capacité du véhicule à filtrer les sons et les irrégularités de la chaussée, tandis que la situation B confronte le véhicule et son passager à un obstacle plus marqué. La cause des remontées vibratoires et sonores est alors perçue comme « extérieure » au véhicule. Les deux dernières situations correspondent aux cas les plus extrêmes. Il s'agit d'une situation à priori très confortable (route C) et d'une autre très inconfortable (route D).

Ces expériences permettent d'obtenir de précieuses informations complémentaires sur les évaluations en simulateur. Dès lors, les caractéristiques physiques des stimuli restitués dans le simulateur sont mesurées et comparées aux évaluations de confort. Les différents indicateurs rencontrés classiquement dans la littérature sont estimés sur les sons et les vibrations (Chapitre 1). Le niveau sonore, la sonie [ISO-532b], et d'autres indicateurs (l'acuité, la rugosité et la tonalité) sont calculés sur chaque son selon leur définition respective. En ce qui concerne les vibrations, plusieurs indicateurs sont estimés sur les signaux bruts, les signaux pondérés selon la norme ISO-2631, ainsi que sur leur enveloppe temporelle (calculée par transformée de Hilbert). Le Tableau 7 présente les valeurs de certains de ces indicateurs :

	Route A				Route B			
	L_a (dB)	VDV ($m/s^{1,75}$)	L_p (dB)	L_p (dB(A))	L_a (dB)	VDV ($m/s^{1,75}$)	L_p (dB)	L_p (dB(A))
V1	102,2	0,27	85,3	49,6	103,7	0,33	87,0	56,6
V2	120,9	2,80	82,3	52,0	116,7	1,49	80,8	49,6
V3	116,1	1,40	78,6	49,7	113,0	0,99	76,4	48,6
V4	105,2	0,39	85,2	49,5	104,9	0,36	84,6	48,4
V5	103,6	0,32	78,8	50,3	102,5	0,28	79,2	49,4
V6	104,1	0,35	78,4	49,2	101,7	0,25	76,3	46,8
V7	104,3	0,34	86,3	48,3	102,6	0,28	83,3	47,2
V8	117,4	1,58	78,0	55,8	114,0	1,08	74,4	46,1

Tableau 7 : Principales caractéristiques physiques des stimuli vibro-acoustiques
(L_p = moyenne de L_{p_gauche} et L_{p_droite} calculée sur les valeurs en Pascal)

Pour finir, le système de restitution sonore est également modifié d'une expérience à l'autre. L'utilisation alternée d'un système de restitution transaural et d'un casque (tous deux soutenus en basses fréquences par un caisson de basse) permet d'évaluer l'influence de ce paramètre sur les évaluations. Bien que le casque autorise une restitution plus fidèle du champ sonore mesuré à l'intérieur du véhicule que celle des haut-parleurs, il place le sujet dans une situation plus éloignée du milieu réel.

2 Influence des modalités vibratoires, sonores et visuelles (Exp. 1)

2.1 Protocole

64 sujets volontaires (47 hommes et 17 femmes) sont recrutés pour participer à l'expérience (Tableau 8). Ils sont tous en bonne santé. Aucune autre condition particulière n'est exigée. Les sujets prennent place sur le banc et sont invités à adopter une posture d'assise confortable. Ils doivent s'imaginer, assis à l'intérieur d'un véritable véhicule, fenêtres fermées et air conditionné arrêté.

Sujets	Moyenne	Ecart Type	Min	Max
Age (m)	30,3	7,7	18	44
Taille (m)	1,76	0,10	1,58	1,94
Poids (kg)	76,3	13,3	49	97
BMI (kg/m ²)	23,4	4,4	16,0	31,0

Tableau 8 : Caractéristiques anthropométriques des sujets

Les stimuli sélectionnés pour cette expérience sont les sons, les vibrations et les vidéos des 8 véhicules, enregistrés sur les routes A et B. Le choix du système de restitution sonore s'oriente à priori vers les haut-parleurs et le caisson de basse car ceux-ci placent le sujet dans une situation plus proche de celle d'un véhicule.

3 associations de modalités sont présentées aux sujets, dans 3 types de tests : VIS, VS et V. Les tests VIS font intervenir simultanément les vibrations, l'image et le son. Les tests VS sont composés de vibrations et de sons, et les tests V ne font intervenir que les vibrations. Pour chacune des 2 routes, la vidéo d'un seul véhicule (V1) a été utilisée pour tous les véhicules. Ainsi, toutes les différences qui auraient pu permettre au sujet d'identifier un véhicule pendant les évaluations sont effacées. Il est également important de préciser que cette étape ne change pas la synchronisation des vidéos avec les stimuli acoustiques et vibratoires.

Pour chaque type de tests, les échantillons mesurés dans les 8 voitures sur les 2 routes sont présentés aux sujets. Ainsi, pour chaque route, les sujets participent à 3 tests correspondant aux configurations VIS, VS et V.

Les sujets participent successivement aux 6 tests dans un ordre différent (Tableau 9). L'ordre de présentation des tests n'est pas complètement équilibré. Les ordres de présentation des 2 routes ainsi que celui des tests VS et V sont équilibrés. Toutefois, seule la moitié des sujets commence par un test VIS, l'autre moitié s'y soumet en dernier. L'hypothèse retenue consiste à dire que seule la modalité visuelle influence la connaissance des sujets sur le contexte de la situation. En conséquence, seuls les sujets ayant passé un test VIS avant un test VS ou V ont une connaissance précise de la situation dans laquelle se trouve le véhicule. Le fait de ne pas équilibrer complètement l'ordre de présentation des tests VIS est un compromis méthodologique entre l'évaluation de l'effet de la connaissance du contexte visuel sur les autres modalités et le nombre de sujets participant à l'expérience. On conserve ainsi un nombre suffisant de sujets dans chacune de ces 2 catégories sans devoir augmenter le nombre total de sujets.

Partie 3 / Influences du contexte et des modalités perceptives sur le confort

Sujet	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6	Sujet	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6
1	VIS - A	VS - A	V - A	VIS - B	VS - B	V - B	2	V - B	VS - B	VIS - B	V - A	VS - A	VIS - A
3	VIS - A	V - A	VS - A	VIS - B	V - B	VS - B	4	VS - B	V - B	VIS - B	VS - A	V - A	VIS - A
5	VIS - A	VS - A	V - A	VIS - B	VS - B	V - B	6	V - B	VS - B	VIS - B	V - A	VS - A	VIS - A
7	VIS - A	V - A	VS - A	VIS - B	V - B	VS - B	8	VS - B	V - B	VIS - B	VS - A	V - A	VIS - A
9	VIS - A	VS - A	V - A	VIS - B	VS - B	V - B	10	V - B	VS - B	VIS - B	V - A	VS - A	VIS - A
11	VIS - A	V - A	VS - A	VIS - B	V - B	VS - B	12	VS - B	V - B	VIS - B	VS - A	V - A	VIS - A
13	VIS - A	VS - A	V - A	VIS - B	VS - B	V - B	14	V - B	VS - B	VIS - B	V - A	VS - A	VIS - A
15	VIS - A	V - A	VS - A	VIS - B	V - B	VS - B	16	VS - B	V - B	VIS - B	VS - A	V - A	VIS - A
17	VIS - A	VS - A	V - A	VIS - B	VS - B	V - B	18	V - B	VS - B	VIS - B	V - A	VS - A	VIS - A
19	VIS - A	V - A	VS - A	VIS - B	V - B	VS - B	20	VS - B	V - B	VIS - B	VS - A	V - A	VIS - A
21	VIS - A	VS - A	V - A	VIS - B	VS - B	V - B	22	V - B	VS - B	VIS - B	V - A	VS - A	VIS - A
23	VIS - A	V - A	VS - A	VIS - B	V - B	VS - B	24	VS - B	V - B	VIS - B	VS - A	V - A	VIS - A
25	VIS - A	VS - A	V - A	VIS - B	VS - B	V - B	26	V - B	VS - B	VIS - B	V - A	VS - A	VIS - A
27	VIS - A	V - A	VS - A	VIS - B	V - B	VS - B	28	VS - B	V - B	VIS - B	VS - A	V - A	VIS - A
29	VIS - A	VS - A	V - A	VIS - B	VS - B	V - B	30	V - B	VS - B	VIS - B	V - A	VS - A	VIS - A
31	VIS - A	V - A	VS - A	VIS - B	V - B	VS - B	32	VS - B	V - B	VIS - B	VS - A	V - A	VIS - A
33	VIS - B	VS - B	V - B	VIS - A	VS - A	V - A	34	V - A	VS - A	VIS - A	V - B	VS - B	VIS - B
35	VIS - B	V - B	VS - B	VIS - A	V - A	VS - A	36	VS - A	V - A	VIS - A	VS - B	V - B	VIS - B
37	VIS - B	VS - B	V - B	VIS - A	VS - A	V - A	38	V - A	VS - A	VIS - A	V - B	VS - B	VIS - B
39	VIS - B	V - B	VS - B	VIS - A	V - A	VS - A	40	VS - A	V - A	VIS - A	VS - B	V - B	VIS - B
41	VIS - B	VS - B	V - B	VIS - A	VS - A	V - A	42	V - A	VS - A	VIS - A	V - B	VS - B	VIS - B
43	VIS - B	V - B	VS - B	VIS - A	V - A	VS - A	44	VS - A	V - A	VIS - A	VS - B	V - B	VIS - B
45	VIS - B	VS - B	V - B	VIS - A	VS - A	V - A	46	V - A	VS - A	VIS - A	V - B	VS - B	VIS - B
47	VIS - B	V - B	VS - B	VIS - A	V - A	VS - A	48	VS - A	V - A	VIS - A	VS - B	V - B	VIS - B
49	VIS - B	VS - B	V - B	VIS - A	VS - A	V - A	50	V - A	VS - A	VIS - A	V - B	VS - B	VIS - B
51	VIS - B	V - B	VS - B	VIS - A	V - A	VS - A	52	VS - A	V - A	VIS - A	VS - B	V - B	VIS - B
53	VIS - B	VS - B	V - B	VIS - A	VS - A	V - A	54	V - A	VS - A	VIS - A	V - B	VS - B	VIS - B
55	VIS - B	V - B	VS - B	VIS - A	V - A	VS - A	56	VS - A	V - A	VIS - A	VS - B	V - B	VIS - B
57	VIS - B	VS - B	V - B	VIS - A	VS - A	V - A	58	V - A	VS - A	VIS - A	V - B	VS - B	VIS - B
59	VIS - B	V - B	VS - B	VIS - A	V - A	VS - A	60	VS - A	V - A	VIS - A	VS - B	V - B	VIS - B
61	VIS - B	VS - B	V - B	VIS - A	VS - A	V - A	62	V - A	VS - A	VIS - A	V - B	VS - B	VIS - B
63	VIS - B	V - B	VS - B	VIS - A	V - A	VS - A	64	VS - A	V - A	VIS - A	VS - B	V - B	VIS - B

Tableau 9 : Ordre de présentation des tests

Par ailleurs, au sein de chaque test, le plan de présentation des véhicules est réalisé pour que chaque sujet puisse être soumis à une série différente. Chaque test débute par trois exemples et tous les stimuli sont répétés deux fois. Les sujets évaluent cependant une fois l'ensemble des véhicules avant d'être soumis aux répétitions. Enfin, chaque stimulus peut être rejoué autant de fois que nécessaire.

Les sujets doivent évaluer le confort global de la situation. Pour répondre, ils placent un curseur sur une échelle graduée par les étiquettes suivantes, auxquelles sont attribuées des valeurs numériques cachées suivantes :

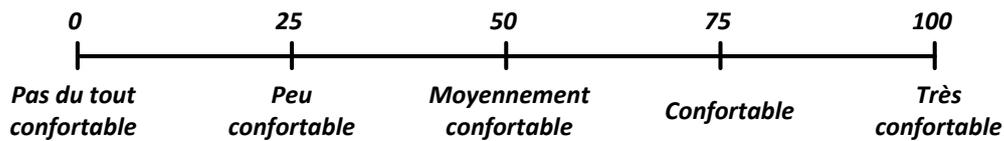


Figure 25 : Echelle d'évaluation du confort

2.2 Résultats

Le protocole choisi répartit les données à traiter à l'intérieur de 6 tests indépendants, correspondant aux 3 associations de modalités VIS, VS et V évaluées sur les routes A et B. Dans chacun de ces tests, 64 personnes ont évalué à 2 reprises les enregistrements de 8 véhicules. Une telle répartition des résultats conditionne les traitements à effectuer pour évaluer l'importance des différents paramètres expérimentaux mis en jeu. Ainsi, après avoir évalué le degré de consensus parmi les sujets ainsi que le niveau de discrimination des véhicules pour chacun des tests, les effets des différents paramètres expérimentaux seront estimés et illustrés par des statistiques descriptives. Le lien entre les observations et les propriétés physiques des signaux peut ainsi être mis en évidence.

2.2.1 Analyses préliminaires

Le degré de consensus chez les sujets est tout d'abord évalué. Pour cela, une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) est effectuée sur les données de chaque test (distance euclidienne - méthode de Ward). Les résultats sont comparables pour chacun des 6 tests : aucune catégorie de sujets n'apparaît. Ces observations sont confirmées par des cartographies internes (Analyse en Composante Principale : véhicules en individus / sujets en variable). Tous les sujets apparaissent groupés sur le premier axe qui représente à chaque fois plus de 80% de l'inertie totale à lui seul. Aucun des autres axes ne dépasse les 6% d'inertie. Ces premières analyses révèlent un très fort degré de consensus parmi les sujets. Enfin, l'analyse des données centrées, puis centrées et réduites ne met en évidence aucun effet d'échelle.

Le degré de discrimination entre les véhicules est également estimé à l'aide de tests de comparaison de moyenne (tests HSD – $p < 0,05$). Ces tests de comparaison de moyenne permettent de répartir les véhicules en groupes à partir de comparaisons statistiques effectuées deux à deux. Ils mettent en évidence un très fort degré de discrimination (entre 5 et 8 groupes de véhicules selon les tests).

Le plan de présentation des tests est construit pour que la moitié des sujets soient exposés à la modalité visuelle en premier, et l'autre moitié en dernier. La

comparaison des données de ces 2 groupes de sujets permet d'estimer l'effet de la connaissance du contexte visuel sur les évaluations vibro-acoustiques.

Comme précédemment, les niveaux de consensus et de discrimination sont évalués. Dans les deux cas, les analyses appropriées (CAH, cartographies internes, tests HSD) révèlent que la connaissance du contexte visuel est sans effet sur les évaluations de confort.

La Figure 26 présente les moyennes obtenues par les véhicules lorsque les tests VIS ont été présentés en premier et lorsqu'ils ne l'ont pas été. Les résultats sont présentés avec leurs intervalles de confiance à 95%. Les courbes VIS sont volontairement omises sur ce graphique pour des raisons de lisibilité. Il apparaît que les effets sont faibles devant les différences inter-véhicules.

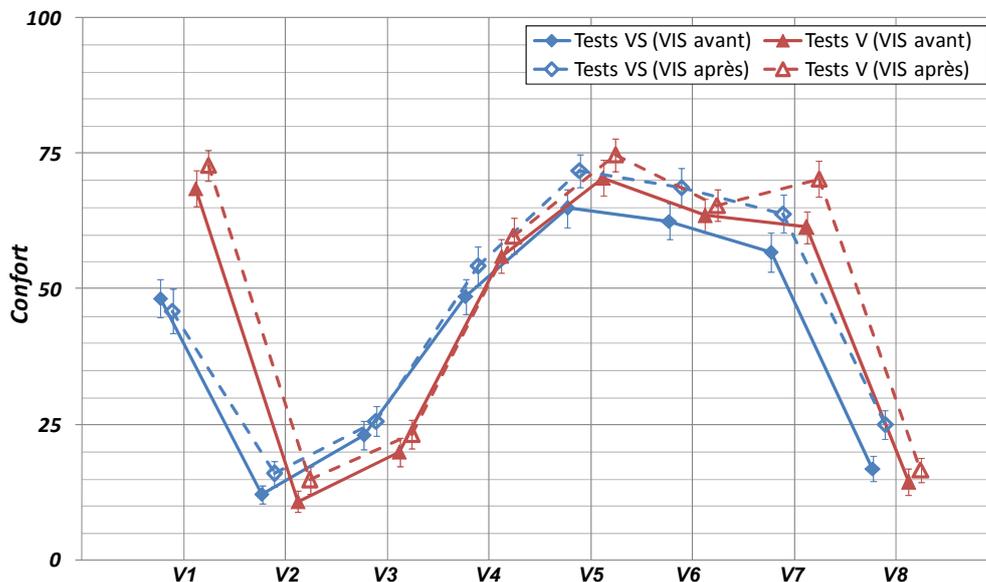


Figure 26 : Notes moyennes des véhicules en fonction du type de test et de leur ordre de passage

À l'exception de V1, les moyennes des tests VS sont légèrement plus élevées lorsque les sujets sont soumis à un test VIS avant (+3,5 points en moyenne). Des tests de comparaison de moyenne sont également réalisés pour identifier les véhicules concernés (Tableau 10). Des différences sont visibles pour les tests VS pour presque tous les véhicules (sauf V1 et V3). À l'inverse, aucune différence inter-véhicule n'est visible pour les tests V (sauf V2 et V7). La connaissance du contexte visuel influence différemment les modalités acoustiques et vibratoires mais ces effets sont très faibles et sont donc négligés pour la suite de l'analyse. Ces observations montrent que l'ordre de présentation des tests n'introduit pas de biais significatif dans les résultats. Les 64 sujets seront donc groupés pour la suite de l'analyse.

	VI	V	v
V1	-	-	-
V2	-	+	+
V3	-	-	-
V4	-	+	-
V5	-	+	-
V6	-	+	-
V7	-	+	+
V8	-	+	-

Tableau 10 : Significativité des différences pour chaque type de test en fonction de l'ordre de présentation des tests VIS (tests HSD – $p < 0,05$)

Les notes moyennes des véhicules sur les routes A et B sont alors estimées (Figure 27). Les notes de confort sont proches d'une route à l'autre. Une CAH fait apparaître 2 groupes de véhicules. 5 véhicules (V1, V4, V5, V6 et V7) sont jugés entre « Assez Confortable » (50) et « Confortables » (75), alors que les 3 autres (V2, V3 et V8) sont jugés « Peu Confortables » (25). Une dilatation de l'échelle de notation pour la route B est mise en évidence. Les notes sont significativement différentes d'une route à l'autre pour tous les véhicules sauf V4 (test HSD, $p < 0,05$). Dans la suite de l'expérience, les résultats des tests correspondant aux routes A et B sont traités séparément.

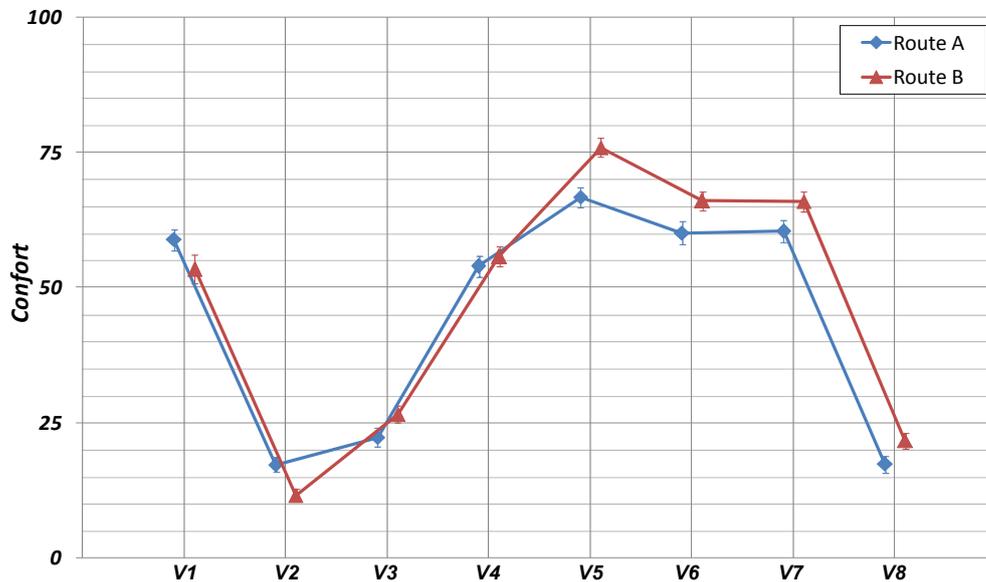


Figure 27 : Influence du type de route

Avant d'estimer précisément l'effet des différentes modalités, un aperçu global de chacun des paramètres associés à la présentation des stimuli est réalisé. Des analyses de variances sont calculées sur les données de chacun des tests. Ces ANOVA consistent en une comparaison des écarts statistiques associés à 64 sujets, 8 véhicules et 2 répétitions. La variable dépendante est la note de confort et tous les effets principaux des facteurs ainsi que leurs interactions d'ordre 1 sont inclus dans le modèle. Le facteur sujet est placé en aléatoire dans le modèle. Cela signifie que les résultats donnés par les ANOVA sont indépendants de l'échantillon de sujets ayant passé les tests.

Les résultats des ANOVA sont identiques dans les 6 tests. L'effet « Véhicule » est systématiquement significatif alors que l'effet « Répétition » ne l'est pas. La comparaison des F_Ratio montre clairement que le facteur « Véhicule » est à l'origine de la grande majorité de la dispersion des résultats. Dès cet instant, il est très important de remarquer que l'influence des autres paramètres est secondaire par rapport aux différences inter-véhicules. Enfin des analyses complémentaires des données de chaque test confirment que l'effet des répétitions n'est pas significatif (test HSD – $p < 0,05$). Elles sont donc considérées comme autant d'évaluations supplémentaires des véhicules.

2.2.2 Effets des modalités

On évalue à présent l'effet des modalités sur le consensus, sur la discrimination des véhicules ainsi que sur les évaluations de confort.

Dans un premier temps, les 6 cartographies internes calculées sur les données de chaque test sont comparées. Il apparaît que l'inertie expliquée par le premier axe décroît de 92% en moyenne sur les 2 routes pour les tests V, à 82% pour les tests VS et à 81% pour les tests VIS. Le son entraîne donc une augmentation de la dispersion des sujets. La modalité visuelle n'a pas d'influence significative. Il est important de préciser que ces résultats traduisent toujours un consensus très net et que cette dispersion est due à une minorité de sujets.

En ce qui concerne la discrimination, les tests de comparaison de moyenne (tests HSD – $p < 0,05$) montrent, pour chacune des routes, que les véhicules sont répartis en 5 groupes distincts pour les tests V, 7 pour les tests VS, et 8 pour les tests VIS. L'augmentation de la discrimination est observée à la fois pour des véhicules jugés « Peu Confortables » (V2 et V8) et pour des véhicules jugés « Confortables » (V1). L'augmentation de la discrimination observée dans les tests VS peut être expliquée par des différences dans les sons des véhicules, les rendant plus différenciables. Cependant, cet argument ne peut pas être appliqué à la modalité visuelle car les mêmes images de route sont projetées pour tous les véhicules.

La Figure 28 et la Figure 29 présentent les notes de confort obtenues par les 8 véhicules sur les routes A et B en fonction des modalités présentées. L'effet des modalités est faible devant celui des véhicules. Les 3 courbes sont très proches, ce qui signifie que les sujets sont capables d'évaluer le confort de la situation lorsqu'ils ne sont soumis qu'à la modalité vibratoire. Son rôle est donc prépondérant dans l'évaluation du confort global. La comparaison des courbes VS et V montre que l'effet du son varie. Même si aucune tendance générale ne peut être observée, il est important de remarquer que le son a une influence très significative sur les évaluations de V1. Son score passe d'une moyenne de 70 pour les tests V, à 47 pour les tests VS et 51 pour les tests VIS. Enfin, sur les deux routes et pour tous les véhicules (sauf V6 sur la route A), la courbe VIS apparaît légèrement plus élevée que la VS. L'écart moyen pour l'ensemble des véhicules est de +5 points. La modalité visuelle entraîne une translation des notes vers le plus confortable. Son importance est toutefois moins grande que celle de la modalité sonore. Il est important de préciser que rien, ni dans les stimuli, ni dans le protocole, ne permet d'expliquer la variation observée uniquement pour V6 sur la route A entre les tests VIS et les autres.

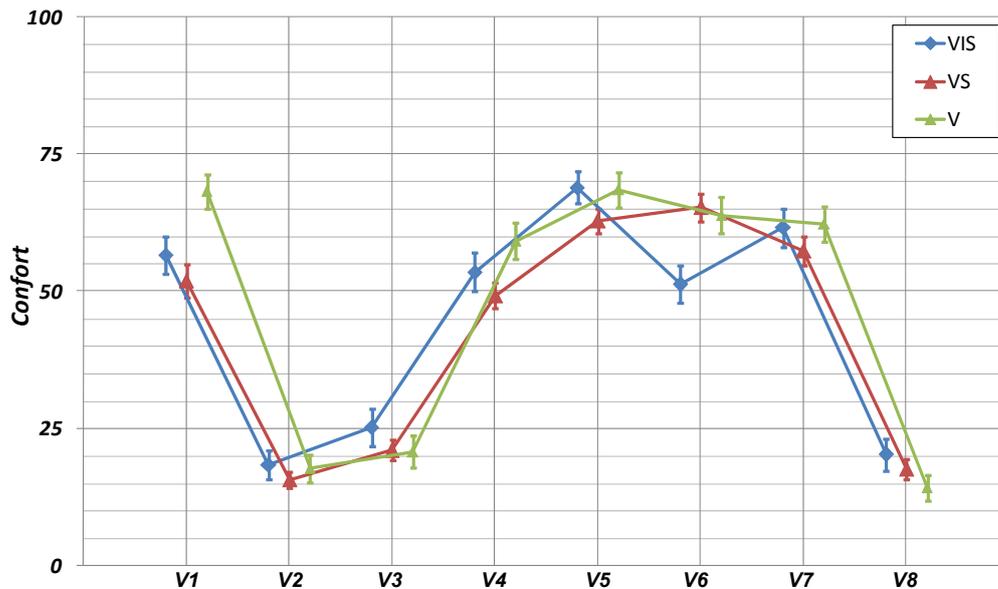


Figure 28 : Influence des modalités - Route A

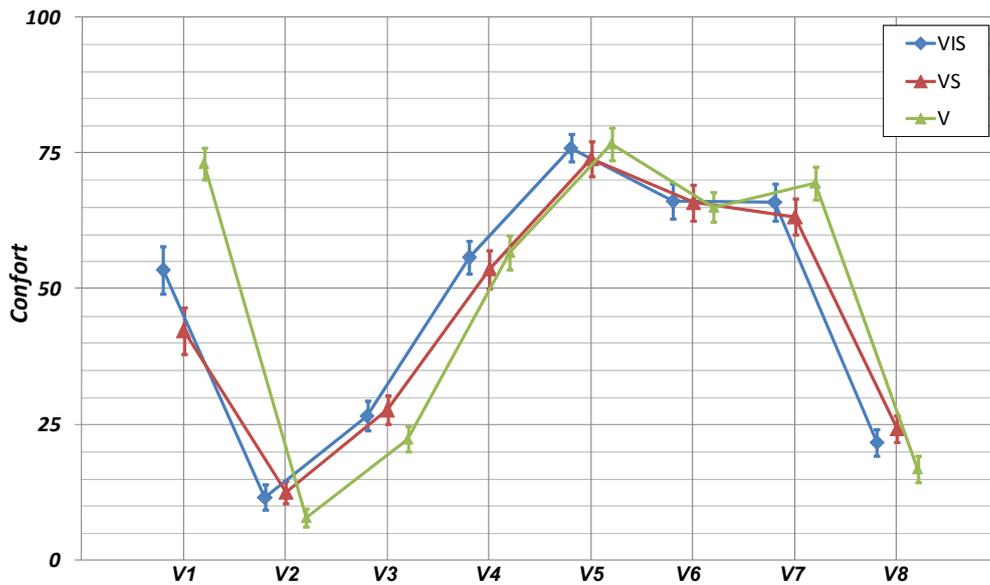


Figure 29 : Influence des modalités - Route B

Des tests de comparaison de moyenne (tests HSD – $p < 0,05$) effectués entre chacune des associations de modalités montrent que les différences entre les tests V et VS sont significatives pour 3 véhicules sur la route A et pour 5 véhicules sur la route B (Tableau 11). Les proportions sont sensiblement identiques en ce qui concerne les tests V et VIS (3 véhicules pour la route A et 4 pour la route B), même s’il ne s’agit pas des mêmes véhicules. En ce qui concerne les différences entre VIS et VS : 3 véhicules sont différents pour la route A alors qu’un seul est différent pour la route B. Ce déséquilibre lié à la modalité visuelle traduit une influence différente des 2 types de routes.

	Route A			Route B		
	VIS \neq VS	VIS \neq V	VS \neq V	VIS \neq VS	VIS \neq V	VS \neq V
V1	-	+	+	+	+	+
V2	-	-	-	-	+	+
V3	+	-	-	-	+	+
V4	-	-	+	-	-	-
V5	+	-	+	-	-	-
V6	+	+	-	-	-	-
V7	-	-	-	-	-	+
V8	-	+	-	-	+	+

Tableau 11 : Significativité des différences entre les modalités

En conclusion, la présence ou l’absence de modalités visuelles et acoustiques entraînent des modifications dans les évaluations du confort.

L'influence des deux modalités n'est pas identique. L'influence du son se révèle significative pour certains véhicules et aucune tendance n'est mise clairement en évidence. La modalité visuelle permet une meilleure discrimination des véhicules et entraîne une infime translation de l'échelle de notation.

2.2.3 Caractéristiques des stimuli

Une étude des liens entre les caractéristiques physiques des signaux et les évaluations de confort est effectuée.

La Figure 30 présente la variation du niveau sonore L_p en fonction du niveau vibratoire L_a (tous deux estimés sans pondération fréquentielle). Ces 2 paramètres ne sont pas corrélés. Sur chacune des routes, le niveau vibratoire fait apparaître 2 groupes de véhicules : V1, V4, V5, V6 et V7 possèdent les niveaux vibratoires les plus faibles, tandis que V2, V3 et V8 possèdent les niveaux les plus élevés. Cette classification (absente pour les niveaux sonores) est identique à celle observée sur les notes de confort. Le niveau vibratoire est donc l'élément prépondérant pour le confort vibro-acoustique global.

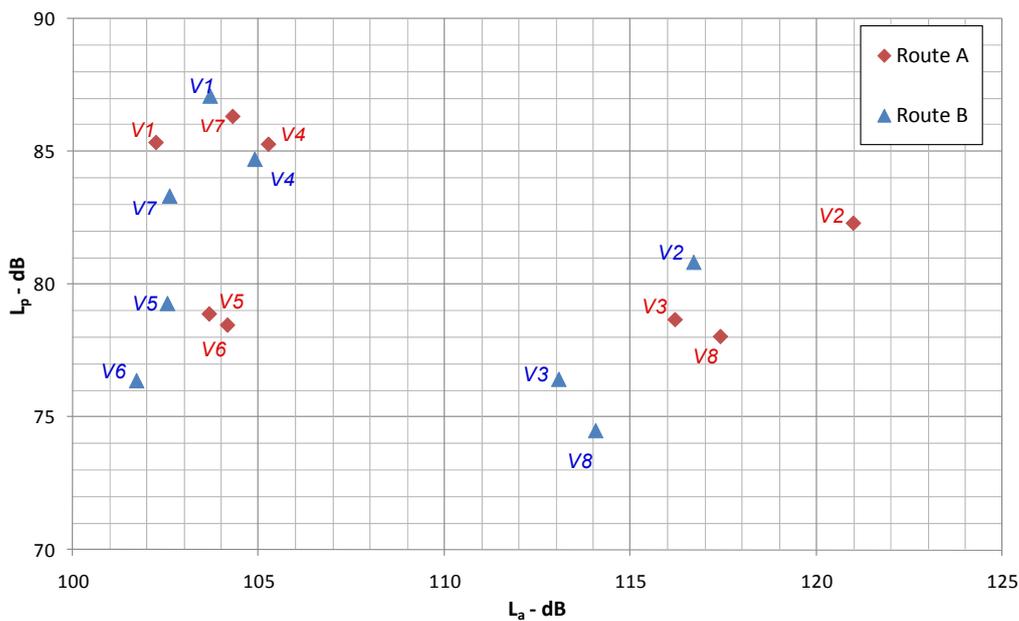


Figure 30 : Variation du niveau sonore en fonction du niveau vibratoire

Dès lors, une étude plus détaillée des caractéristiques de V1 s'impose. L'étude de l'influence des modalités met en évidence une forte dévaluation de ce véhicule en termes de confort en présence de la modalité sonore. Le plan physique montre qu'il s'agit d'un véhicule possédant un niveau vibratoire parmi

les plus faibles, alors qu'il possède un niveau sonore élevé. Toutefois, ce déséquilibre entre les deux modalités ne suffit pas à expliquer l'écart de notation observé. En effet, V7 possède des caractéristiques physiques très proches de V1. Pourtant, dans ce cas l'effet n'est pas marquant. Aucun des indicateurs physiques estimés ne permet d'expliquer l'effet lié au son de ce véhicule.

Au final, l'étude de l'ensemble des indicateurs calculés sur les stimuli n'apporte pas plus d'informations que celle fournie par les niveaux vibratoires. Aucun modèle satisfaisant n'est obtenu à cause de la mauvaise répartition des niveaux des stimuli. Toutefois, les résultats concordent avec ce que rapporte la littérature à ce sujet. En effet, nombreux sont les auteurs qui observent à partir de l'analyse de signaux artificiels ou réels, des contributions significatives des niveaux acoustiques et vibratoires [DEMP 79] [HOWA 90a] [HOWA 90b] [PAUL 95] [LEAT 90]. Malgré la grande variété des stimuli utilisés, des modèles (linéaires ou plus complexes) permettent alors de prédire les contributions du son et des vibrations aux évaluations de confort ou de gêne. Si ces modèles font systématiquement intervenir à la fois les niveaux vibratoires et sonores, les auteurs rapportent parfois une contribution plus importante de l'une des modalités. La domination de la modalité vibratoire, parfois observée, semble amplifiée du fait de la faiblesse des niveaux sonores utilisés. A niveaux vibratoires équivalents, Howarth et al. utilisent par exemple des stimuli sonore de niveaux allant jusqu'à 79 dB(A) tandis que le niveau sonores le plus élevé de cette expérience ne dépasse pas les 57 dB(A) [HOWA 90a].

3 Influence du contexte visuel (Exp. 2)

L'objectif de cette 2^{ème} expérience est de mesurer l'effet du type de contexte visuel sur les évaluations de confort global. À cet effet, des enregistrements acoustiques et vibratoires sont associés à différents contextes visuels qui modifient l'attente du sujet vis-à-vis de la situation. Pour obtenir des manifestations plus prononcées des effets attendus, les choix de ces mises en situation visuelle s'orientent vers des configurations très variées.

Enfin, le système de restitution sonore est également modifié au profit d'un casque soutenu en basses fréquences par un caisson de basse. Ce choix autorise une restitution plus fidèle du champ sonore mesuré à l'intérieur du véhicule. Cependant, ce dispositif place le sujet dans une situation plus éloignée du milieu réel. L'influence de ce paramètre sur les évaluations est donc estimée.

3.1 Protocole

60 sujets (40 hommes et 20 femmes) parmi lesquels 20 sujets ont déjà participé à la première expérience, sont recrutés en tant que volontaires. Le protocole d'assise et la consigne donnée aux sujets sont identiques à ceux de l'expérience précédente.

Les stimuli vibratoires, sonores et visuels sont présentés simultanément aux sujets. Les signaux acoustiques et vibratoires sélectionnés correspondent aux 8 véhicules (V1-V8) enregistrés sur la route A (route dégradée). Ces signaux sont présentés accompagnés des enregistrements vidéos de la route A, de la route C (route lisse) et de la route D (route fortement dégradée), soit un total de 24 stimuli.

Les sujets sont soumis à des stimuli vibro-acoustiques identiques, accompagnés de 3 mises en situation très différentes. L'hypothèse avancée est la suivante : en présence du visuel C, l'ambiance vibro-acoustique paraît amplifiée. A l'inverse, les stimuli vibro-acoustiques associés au visuel D paraissent a priori atténués. L'objectif est de placer le sujet dans des situations artificiellement exagérées par rapport à la réalité.

Les stimuli sont regroupés en 3 tests selon la scène visuelle (A, C ou D). Ils sont présentés successivement aux sujets. L'ordre de présentation de ces tests est équilibré pour s'affranchir de tout biais lié à ce paramètre. Les tests commencent tous par la présentation de 3 exemples. Dans chaque test, les signaux des 8 véhicules sont répétés 2 fois. Les sujets évaluent une première fois tous les véhicules avant d'être soumis aux répétitions. Le sujet a la possibilité de rejouer les stimuli autant de fois qu'il le souhaite.

Le sujet doit évaluer le confort global de chaque situation. L'échelle de notation est identique à celle de l'expérience précédente. Il s'agit d'une échelle continue à 5 graduations allant de « Pas du tout confortable » à « Très confortable » (Exp. 1 - Figure 25). La présentation de la consigne est accompagnée d'une mise en situation verbale. Le sujet ne connaît pas l'objectif réel de l'expérience. Une pause est effectuée entre chaque test et la durée totale de l'expérience est de 30 minutes.

3.2 Résultats

Le protocole choisi fait que les données à traiter sont réparties à l'intérieur de 3 tests indépendants. Ils correspondent aux associations des visuels A, C et D et des enregistrements vibro-acoustiques de la route A. Dans chacun de ces tests, 60 personnes évaluent à deux reprises les enregistrements de 8 véhicules.

Les premières analyses s'attachent à mesurer le consensus parmi les sujets ainsi que le niveau de discrimination des véhicules. Enfin, l'effet du

contexte visuel sur le consensus, sur la discrimination des véhicules ainsi que sur les évaluations de confort est évalué.

3.2.1 Analyses préliminaires

Dans un premier temps, des CAH sont réalisées sur les données de chaque test. Les dendrogrammes obtenus permettent de distinguer des catégories de sujets dont les répartitions en effectifs s'avèrent déséquilibrées. Deux catégories de sujets se distinguent pour les tests A (20, 40) et C (33, 27), tandis que trois se distinguent pour les tests D (27, 24 et 9). Finalement, comme le nombre d'individus appartenant à la troisième catégorie est très réduit et comme cette catégorie n'est visible que pour les tests D, un compromis est finalement établi par la segmentation des sujets en deux groupes par la méthode des nuées dynamiques (34, 26).

La comparaison des données brutes aux données centrées puis aux données centrées et réduites montre que les catégories de sujets sont liées à une utilisation différente de l'échelle de notation. Les sujets de la classe 1 ont donné des notes plus élevées aux véhicules les plus confortables.

Des analyses complémentaires sont effectuées pour déterminer l'origine d'une telle segmentation. Dans un premier temps, un test du χ^2 montre que cette segmentation des sujets n'est pas liée au fait d'avoir participé à la première expérience. La comparaison des résultats du test A de cette expérience à ceux du test VIS (Route A) de l'expérience précédente permet d'estimer l'influence du moyen de restitution sonore sur les évaluations du confort. La Figure 31 présente les notes moyennes des véhicules obtenues dans chacune des 2 expériences. La comparaison avec les deux classes de sujets de l'expérience 2 montre que la classe 1 est proche des résultats obtenus avec les haut-parleurs. L'influence du système de restitution est donc de créer, pour la moitié des sujets, une diminution de la dynamique de notation (classe 2).

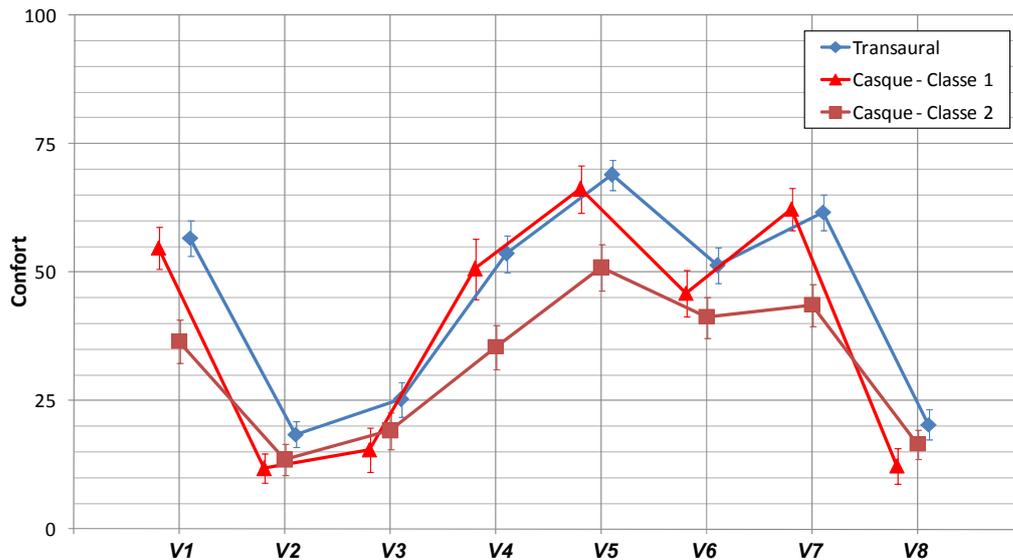


Figure 31 : Influence du système de restitution

Le degré de discrimination entre les véhicules est ensuite estimé à l'aide de tests de comparaison de moyenne (tests HSD – $p < 0,05$). Ils mettent en évidence un très fort degré de discrimination dans chacun des tests (entre 5 et 8 groupes pour l'ensemble des tests). Ce résultat est valable pour les deux classes de sujets. Ceux-ci sont finalement regroupés pour la suite des analyses. Enfin, la comparaison du degré de discrimination des véhicules d'une expérience à l'autre révèle que le type de système de restitution sonore est sans effet significatif sur ce paramètre. Ainsi, d'un point de vue des résultats, il est indifférent d'utiliser l'un ou l'autre des systèmes de restitutions sonores.

Avant d'estimer précisément l'effet des différentes scènes visuelles, il est nécessaire d'obtenir un aperçu global de chacun des paramètres associés à la présentation des stimuli. Des analyses de variances sont calculées sur les données de chacun des tests. Ces ANOVA consistent en une comparaison des écarts statistiques associés à 60 sujets (aléatoire), 8 véhicules et 2 répétitions. Les effets principaux des facteurs ainsi que leurs interactions d'ordre 1 sont inclus dans le modèle.

Les résultats des ANOVA sont identiques dans les trois tests. L'effet « Véhicule » est systématiquement significatif alors que l'effet « Répétition » ne l'est pas. Le facteur « Véhicule » est de nouveau à l'origine de la grande majorité de la dispersion des résultats. Enfin, des analyses complémentaires appropriées montrent que les effets des répétitions peuvent être négligés.

3.2.2 Effets du type de scène visuelle

Des cartographies internes des résultats de chaque test sont réalisées. Dans chacun des cas, le premier axe de l'espace d'arrivée représente environ la moitié de l'inertie des notes (test A et C : 60%, test D : 55%). L'axe 2 en représente environ 20% (test A : 16%, test C : 15%, et test D : 21%). Cette légère diminution de l'inertie de l'axe 1 pour le test D n'est pas significative. Enfin, des tests de comparaison de moyenne (tests HSD – $p < 0,05$) révèlent un degré de discrimination des véhicules, identique pour les 3 tests (6 groupes). En conclusion, les différentes associations de contextes visuels n'ont d'influence significative ni sur le consensus des sujets, ni sur la discrimination des véhicules.

La Figure 32 présente les notes de confort de chaque véhicule pour les tests A, C et D. L'influence de ce paramètre est faible devant celle des véhicules. Cependant, pour tous les véhicules, il apparaît que les notes de confort du test C sont très légèrement inférieures à celles des tests A et D. De plus, la courbe D est légèrement plus haute que les deux autres graphiques. La réalisation de tests de comparaison de moyenne (test HSD – $p < 0,05$) montre qu'aucune de ces différences n'est significative entre les tests A et les tests C (Tableau 12). C'est également le cas pour les tests A et D (sauf V1). Enfin, il n'existe pas non plus de différence entre les tests C et D pour la moitié des véhicules (V2, V4, V5 et V7). Les variations observées ne sont donc pas d'amplitudes suffisamment importantes pour être significatives.

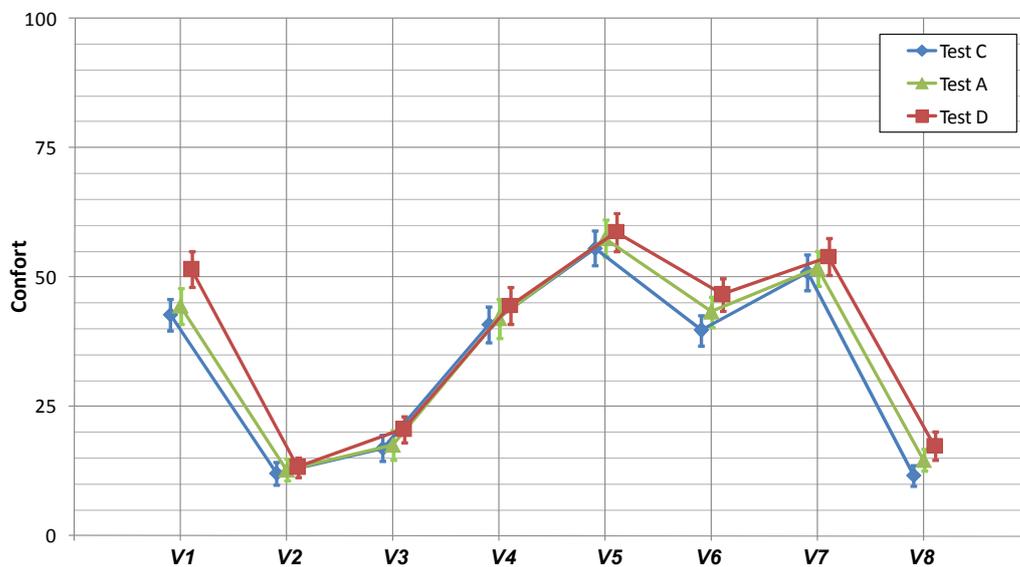


Figure 32 : Effets du type de scène visuelle

	A ≠ C	A ≠ D	C ≠ D
V1	-	-	+
V2	-	-	-
V3	-	-	+
V4	-	-	-
V5	-	-	-
V6	-	-	+
V7	-	-	-
V8	-	-	+

Tableau 12 : Significativité des différences entre les scènes visuelles

En conclusion, si comme l'hypothèse avancée, les effets du contexte visuel traduisent bien l'attente du sujet vis-à-vis des conditions de roulage qui lui sont présentées, il est prévisible que la présentation d'une situation à priori confortable entraîne une sévèrisation de l'échelle de notation. A l'inverse, l'association d'un visuel de route très dégradée devait quant à elle provoquer une plus grande tolérance. Elle se traduit par une petite augmentation des notes de confort. De tels effets correspondent à l'augmentation et à la diminution de la gêne, rapportées dans ces situations (des sons sont associés à des images représentant des degrés très différents d'urbanisation) [VIOL 02]. Cependant, bien que les situations testées dans cette étude soient artificiellement exagérées par rapport à la réalité, les manifestations de ces effets restent très faibles et ne sont significatives que pour une minorité de véhicules.

4 Conclusion

Par leur rôle prépondérant sur le plan méthodologique et expérimental, les deux expériences réalisées permettent de mesurer les contributions relatives des modalités vibratoires, acoustiques et visuelles dans l'évaluation du confort global en simulateur, et d'obtenir des résultats non négligeables pour les études à venir visant à la modélisation du confort vibro-acoustique.

La 1^{ère} expérience révèle un fort degré de consensus et de discrimination des véhicules chez les sujets testés et une image de confort, propre à chaque véhicule, apparaît nettement. Parmi les 3 associations de modalités présentées, le niveau des vibrations s'avère primordial pour l'évaluation du confort global.

Des interactions entre les modalités sonores et vibratoires sont mises en évidence, mais leurs influences restent faibles et aucune tendance générale ne se dessine. Pour un seul des véhicules, la modalité acoustique a une importance significative mais aucun indicateur physique pertinent n'a pu être identifié pour expliquer ce phénomène.

L'association supplémentaire de la modalité visuelle aux modalités vibratoires et acoustiques entraîne une légère translation de l'échelle de notation ainsi qu'une faible augmentation de la discrimination des véhicules. Cette tendance est commune aux 2 situations mises en œuvre.

La 2^{ème} expérience démontre que l'association de différents contextes visuels à des stimuli vibro-acoustiques, si opposés soient-ils, n'influence pas vraiment les évaluations de confort chez les sujets. À cette nouvelle association ne correspond qu'une très légère augmentation ou diminution du confort global, significative que pour une minorité de véhicules. Les effets de la modalité visuelle restent donc très faibles. C'est pourquoi, dans des expériences similaires, la modalité visuelle pourra être désormais négligée.

Enfin, d'un point de vue expérimental, la comparaison des différents moyens de restitution sonore fournit des données capitales pour affiner au mieux les futures évaluations. L'utilisation du système de restitution transaural ou celle du casque n'influencent pas outre mesure les évaluations de confort. Seule l'utilisation du casque entraîne l'apparition d'une classe de sujets utilisant différemment l'échelle de notation. Pour la suite de l'étude, chacun de ces deux systèmes de restitution peut être utilisé indifféremment.

Pour conclure, les résultats significatifs obtenus, outre l'estimation et les mesures des rôles respectifs de chaque modalité dans l'évaluation du confort global en simulateur, permettent :

- d'un point de vue méthodologique, de négliger les effets de la modalité visuelle ; ses effets bien que statistiquement significatifs se produisent à une échelle suffisamment faible pour être écartés, ce qui simplifie le dispositif expérimental ;
- d'un point de vue expérimental, d'approfondir les interactions entre les vibrations et le son ; leurs effets peuvent être forts et leur maîtrise devient nécessaire à l'établissement d'un critère de confort vibro-acoustique en simulateur.

Partie 4

Paramètres significatifs pour le confort automobile

4

PARAMETRES SIGNIFICATIFS POUR LE CONFORT AUTOMOBILE

1	Introduction	121
2	Influence relative du son et des vibrations (Exp. 3)	121
2.1	Stimuli	121
2.2	Protocole	123
2.3	Résultats	124
2.3.1	Analyses préliminaires	124
2.3.2	Effets du niveau vibratoire et du niveau sonore	127
3	Image perceptive des véhicules (Exp. 4).....	134
3.1	Stimuli	136
3.2	Protocole	137
3.3	Résultats.....	138
3.3.1	Analyses préliminaires	138
3.3.2	Cartographie des évaluations	140
4	Conclusion.....	144

IV Paramètres significatifs pour le confort automobile

1 Introduction

La modalité visuelle est écartée du dispositif expérimental. Désormais, l'étude se focalise désormais sur les modalités vibratoires et sonores. Ainsi convient-il d'identifier précisément les paramètres des signaux utilisés par les sujets pour effectuer leurs évaluations. Dans les expériences précédentes, le niveau vibratoire est apparu comme le facteur prépondérant pour l'évaluation du confort. Cependant, aucun modèle satisfaisant n'a pu être créé à cause de la distribution inadaptée des amplitudes des stimuli. La modalité sonore s'est également avérée importante pour certains véhicules même si l'influence de son niveau n'a pas été jugée significative.

2 Influence relative du son et des vibrations (Exp. 3)

Les objectifs de cette nouvelle expérience sont de quantifier précisément les influences relatives des modalités sonores et vibratoires sur les évaluations de confort et de modéliser avec robustesse les contributions des niveaux vibratoires et sonores aux variations des évaluations de confort. À cet effet, les niveaux des signaux acoustiques et vibratoires mesurés sur des véhicules sont modifiés et évalués par des sujets comme ceux de véhicules réels.

2.1 Stimuli

Les mesures acoustiques et vibratoires des expériences précédentes sont sélectionnées pour la préparation des stimuli. La moitié des véhicules est retenue (Tableau 13). Par souci d'équilibre, les choix s'orientent vers deux véhicules précédemment jugés entre « Moyennement confortable » et « Confortable » (V1 et V6), et deux véhicules jugés entre « Pas du tout confortable » et « Peu confortable ». De plus, la sélection de V1 est appuyée par l'influence particulièrement importante de la modalité sonore sur les notes de confort de ce véhicule (Chapitre 3).

Véhicule	V1	V2	V3	V6
Constructeur	Xxxxx	Xxxxx	Xxxxx	Xxxxx
Modèle	Xxxxx	Xxxxx	Xxxxx	Xxxxx
Année	2006	Xxxxx	2006	2006
Type	Berline	Coupé	Berline	Berline
Référence	Xxxxx	Xxxxx	Xxxxx	Xxxxx
Boite de vitesse	Mécanique	Mécanique	Mécanique	Mécanique
Carburant	Diesel	Essence	Diesel	Essence

Tableau 13 : Véhicules sélectionnés pour la préparation des stimuli

Le choix des conditions de circulation des véhicules s’oriente vers la route A (Chapitre 3 - Figure 24). Il s’agit d’une route de campagne dont le revêtement est uniformément dégradé. Une telle sélection permet de s’affranchir de toute influence éventuelle de la non-stationnarité de la situation de conduite sur la route B (changement de revêtement).

Les niveaux des stimuli sonores et vibratoires sélectionnés sont modifiés par amplification (après avoir préparé les signaux pour la restitution). 5 niveaux sonores et 5 niveaux vibratoires sont retenus pour la synthèse des stimuli artificiels (Tableau 14). Ces valeurs ne correspondent donc plus aux niveaux réels des signaux mesurés dans les véhicules. Lors de cette étape, aucune pondération fréquentielle n’est appliquée afin de ne modifier aucune caractéristique spectrale des signaux. Enfin, les niveaux sonores mesurés à la position des oreilles droite et gauche du sujet, sont ajustés indépendamment.

Les niveaux sont répartis uniformément dans une gamme d’exposition couramment rencontrée dans l’automobile. Un pas de 3 dB pour les niveaux sonores et pour les niveaux vibratoires est retenu à l’issue d’une séance de pré-test. Le Tableau 15 présente les principales caractéristiques des stimuli ainsi créés.

Niveaux	L1	L2	L3	L4	L5
L_p (dB)	90,0	87,0	84,0	81,0	78,0
L_a (dB)	115,0	112,0	109,0	106,0	103,0

Tableau 14 : Niveaux acoustiques (L_p) et vibratoires (L_a) des signaux de synthèse

$$(L_a = L_{p_gauche} = L_{p_droite})$$

		L_p (dB)	L_p (dB(A))	L_a (dB)	VDV ($m/s^{1,75}$)			L_p (dB)	L_p (dB(A))	L_a (dB)	VDV ($m/s^{1,75}$)
V1	L1	90	57,9	115	1,17	V3	L1	90	63,4	115	1,21
	L2	87	54,9	112	0,83		L2	87	60,4	112	0,86
	L3	84	51,9	109	0,59		L3	84	57,4	109	0,61
	L4	81	48,9	106	0,41		L4	81	54,4	106	0,43
	L5	78	45,9	103	0,29		L5	78	51,4	103	0,30
V2	L1	90	63,8	115	1,14	V6	L1	90	63,1	115	1,17
	L2	87	60,8	112	0,81		L2	87	60,1	112	0,83
	L3	84	57,8	109	0,57		L3	84	57,1	109	0,59
	L4	81	54,8	106	0,41		L4	81	54,1	106	0,42
	L5	78	51,8	103	0,29		L5	78	51,1	103	0,29

Tableau 15 : Principales caractéristiques physiques des stimuli vibro-acoustiques

2.2 Protocole

68 sujets naïfs sont recrutés et payés pour participer à l'expérience (Tableau 16). Aucune condition particulière n'est exigée pour s'inscrire et les sujets sont tous en bonne santé. Le protocole d'installation des sujets est identique à celui précédemment utilisé : les sujets sont invités à adopter une posture d'assise confortable et doivent s'imaginer assis à l'intérieur d'un véritable véhicule, fenêtres fermées et air conditionné arrêté. Ils ne connaissent pas l'objectif réel de l'expérience. Le système de restitution transaural est choisi pour la reproduction sonore.

Sujets	Moyenne	Ecart Type	Min	Max
Age (m)	40,3	10,0	23	58
Taille (m)	1,80	0,12	1,59	1,97
Poids (kg)	77,1	14,1	53	101
BMI (kg/m^2)	22,5	4,3	16,3	31,1

Tableau 16 : Caractéristiques anthropométriques des sujets

Les stimuli acoustiques et vibratoires sont présentés simultanément aux sujets. La durée des échantillons est de 6 secondes. Toutes les combinaisons des niveaux sont évaluées pour chaque véhicule. Les sujets sont donc soumis à 100 associations différentes de stimuli (4 véhicules x 5 niveaux sonores x 5 niveaux vibratoires). Leur ordre de présentation est choisi aléatoirement pour que chaque sujet soit soumis à une série différente. Le test

débuter par 3 exemples et ne fait pas intervenir de répétition. Chaque stimulus peut également être rejoué autant de fois que nécessaire.

Afin de pouvoir comparer les évaluations de confort à celles précédemment effectuées, un protocole d'évaluation identique à celui des expériences précédentes est employé. Ainsi, les sujets évaluent ainsi le confort global de la situation en plaçant un curseur sur une échelle continue à 5 graduations allant de « Pas du tout confortable » à « Très confortable » (Figure 33). La durée totale de l'expérience est d'environ 15 minutes.

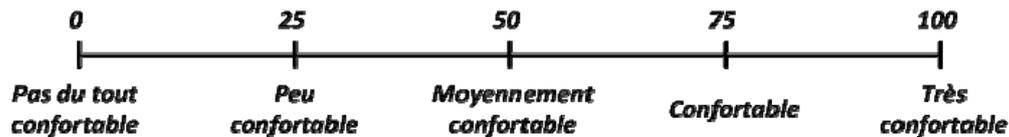


Figure 33 : Echelle d'évaluation du confort

2.3 Résultats

Les résultats de cette épreuve perceptive sont constitués d'évaluations réalisées par 68 sujets de 100 associations de stimuli différentes, correspondant à 4 véhicules, 5 niveaux sonores et 5 niveaux vibratoires. Des analyses préliminaires s'avèrent nécessaires avant d'estimer précisément les contributions aux évaluations de confort des niveaux sonores et vibratoires.

2.3.1 Analyses préliminaires

Les premières analyses s'attachent à évaluer le consensus parmi les sujets ainsi que le niveau de discrimination des stimuli.

Dans un premier temps, une CAH (distance euclidienne - méthode de Ward) est réalisée. Aucune catégorie de sujets ne se distingue. Ce résultat est confirmé par une cartographie interne (ACP où les stimuli représentent les individus, et les sujets, les variables). Tous les sujets apparaissent groupés sur le premier axe qui représente, à lui seul, plus de 65% de l'inertie totale des données. Aucun des autres axes ne dépasse les 6%. La cartographie interne révèle ainsi un très fort degré de consensus parmi les sujets. Ils sont donc regroupés en une seule classe et aucun d'entre eux n'est écarté dans la suite des analyses. Ces résultats correspondent au fort degré de consensus observé dans les deux expériences précédentes.

Le degré de discrimination entre les différents stimuli est ensuite estimé à l'aide de tests de comparaison de moyenne (tests HSD – $p < 0,05$). L'analyse de l'ensemble des comparaisons, faites 2 à 2, révèle que tous les niveaux sonores, tous les niveaux vibratoires ainsi que 3 véhicules sur 4 sont en moyenne significativement discriminés. Un tel degré de discrimination, couplé

au haut niveau de consensus précédemment observé, permet d'affirmer que les sujets ont correctement effectué les évaluations et que les résultats pourront être exploités de manière satisfaisante.

Avant d'estimer précisément l'effet des niveaux sonores et vibratoires, les influences relatives de chacun des facteurs associés à la présentation des stimuli doivent impérativement être décrites. Une ANOVA est alors calculée sur les résultats du test perceptif. Les écarts statistiques des notes de confort associées aux 68 sujets, 4 véhicules, 5 niveaux sonores et 5 niveaux vibratoires sont comparés. Tous les effets des principaux facteurs ainsi que toutes leurs interactions d'ordre 1 sont inclus dans le modèle. Le facteur sujet est placé en aléatoire. Les résultats sont donc indépendants de l'échantillon de sujet ayant passé le test.

L'ANOVA montre que tous les effets ainsi que leurs interactions sont significatifs ($p < 0,05$) (Tableau 17). Cependant, la comparaison des F_Ratio fait clairement apparaître que les facteurs L_p et L_a sont à l'origine de la majorité de la dispersion. Parmi les autres facteurs, seuls les effets des véhicules et de l'interaction $L_p * L_a$ ont une importance suffisante pour être étudiés plus en détail.

Facteur	DDL	F	Sig.
Véhicule	3	18,756	0,000
Lp	4	156,761	0,000
La	4	452,456	0,000
Sujet	67	5,125	0,000
Véhicule * Lp	12	8,432	0,000
Véhicule * La	12	2,506	0,003
Véhicule * Sujet	201	3,955	0,000
Lp * La	16	23,268	0,000
Lp * Sujet	268	4,670	0,000
La * Sujet	268	6,771	0,000
Résidu	1	969,641	0,000

Tableau 17 : Résultats de l'ANOVA

Dans un premier temps, les notes moyennes de chaque véhicule en fonction des paramètres de niveau acoustique et vibratoire sont estimées (Figure 34 et Figure 35). Ces notes de confort ne peuvent pas être directement comparées aux résultats de l'expérience 1, car les niveaux des stimuli ne sont pas les niveaux réels mesurés dans les véhicules. Les résultats confirment les conclusions tirées de l'ANOVA. Les notes de confort sont très proches d'un

véhicule à l'autre et les écarts de notation largement inférieurs à ceux liés aux variations de niveau vibratoire ou de niveau acoustique. L'écart moyen de notation entre deux véhicules (à L_a et L_p équivalents) est de 3,2 points alors que celui observé sur un même véhicule entre deux niveaux vibratoires est de 11,8 points et de 6,0 points pour les niveaux sonores.

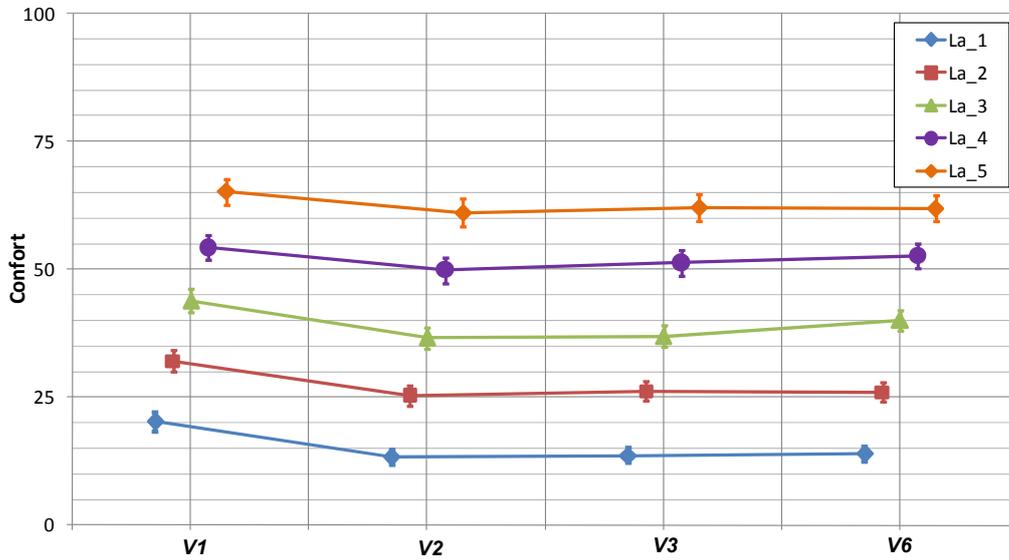


Figure 34 : Confort moyen de chaque véhicule en fonction du niveau vibratoire

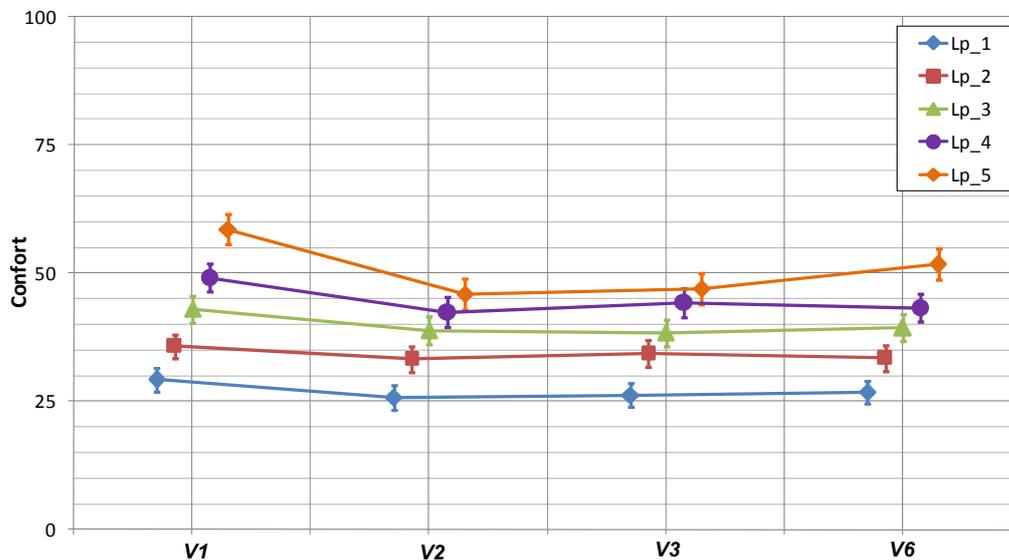


Figure 35 : Confort moyen de chaque véhicule en fonction du niveau sonore

Des tests de comparaison de moyenne (tests HSD – $p < 0,05$) sont effectués entre les véhicules pour chaque niveau sonore et pour chaque niveau

vibratoire (Tableau 18 et Tableau 19). Il apparaît que seul V1 peut être considéré différent des autres véhicules. Cette différence apparaît pour les plus faibles niveaux de bruit et les plus forts niveaux vibratoires.

L_a	V1 ≠ V2	V1 ≠ V3	V1 ≠ V4	V2 ≠ V3	V2 ≠ V4	V3 ≠ V4
L1	+	+	+	-	-	-
L2	+	+	+	-	-	-
L3	+	+	-	-	-	-
L4	-	-	-	-	-	-
L5	-	-	-	-	-	-

Tableau 18 : Significativité des différences entre les véhicules en fonction du niveau vibratoire

L_p	V1 ≠ V2	V1 ≠ V3	V1 ≠ V4	V2 ≠ V3	V2 ≠ V4	V3 ≠ V4
L1	-	-	-	-	-	-
L2	-	-	-	-	-	-
L3	-	-	-	-	-	-
L4	+	-	+	-	-	-
L5	+	+	+	-	-	-

Tableau 19 : Significativité des différences entre les véhicules en fonction du niveau sonore

Ces observations montrent que d'autres paramètres physiques des signaux de V1 influencent significativement les évaluations. Mais toutefois, ces effets restent toutefois très faibles par rapport à ceux des niveaux. Pour la suite de cette analyse, les 4 véhicules sont donc regroupés.

2.3.2 Effets du niveau vibratoire et du niveau sonore

Les effets du niveau vibratoire et du niveau sonore sur le consensus et sur la discrimination des stimuli sont étudiés.

En premier lieu, les cartographies internes, réalisées sur des échantillons correspondant aux combinaisons des 5 niveaux sonores et des 5 niveaux vibratoires, sont comparées. Toutes ces analyses révèlent systématiquement un très fort degré de consensus parmi les sujets et aucune influence significative du niveau de l'une ou l'autre des modalités n'apparaît. Ces observations sont confirmées par la comparaison des variances associées à chacun de ces échantillons.

L'influence du niveau vibratoire et du niveau sonore sur la discrimination est ensuite mesurée. Des tests de comparaison de moyenne (tests

HSD – $p < 0,05$) permettent alors de répartir les stimuli en groupes distincts en fonction de la significativité de leur différence (Tableau 20). La discrimination des niveaux acoustiques varie de 2 groupes pour le niveau vibratoire le plus fort, à 5 groupes pour le niveau vibratoire le plus faible. A l'inverse, les cinq niveaux vibratoires sont systématiquement différenciés pour l'ensemble des niveaux sonores testés. Les niveaux vibratoires élevés diminuent donc la discrimination des niveaux sonores alors que l'inverse n'est pas observé. C'est le premier effet notable et différent du niveau vibratoire par rapport au niveau sonore.

Niveau	L1	L2	L3	L4	L5
L_a	2	2	4	4	5
L_p	5	5	5	5	5

Tableau 20 : Discrimination des stimuli en fonction de L_a et L_p

La Figure 36 et la Figure 37 présentent les notes moyennes de confort pour chacun des 5 niveaux vibratoires et des 5 niveaux sonores. De manière générale, pour les vibrations ou pour le son, la diminution du niveau entraîne une augmentation très sensible de la note de confort. Cette tendance peut être observée pour l'ensemble des niveaux testés et ces effets se cumulent systématiquement. Aucun effet antagoniste du son sur les vibrations ou des vibrations sur le son n'est observé.

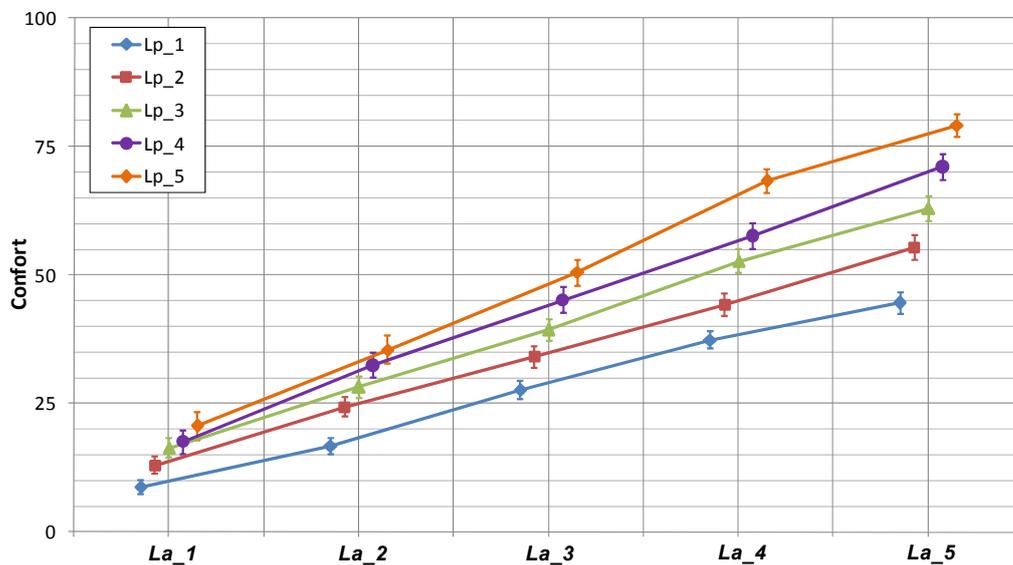


Figure 36 : Variation de la note de confort en fonction du niveau vibratoire L_a

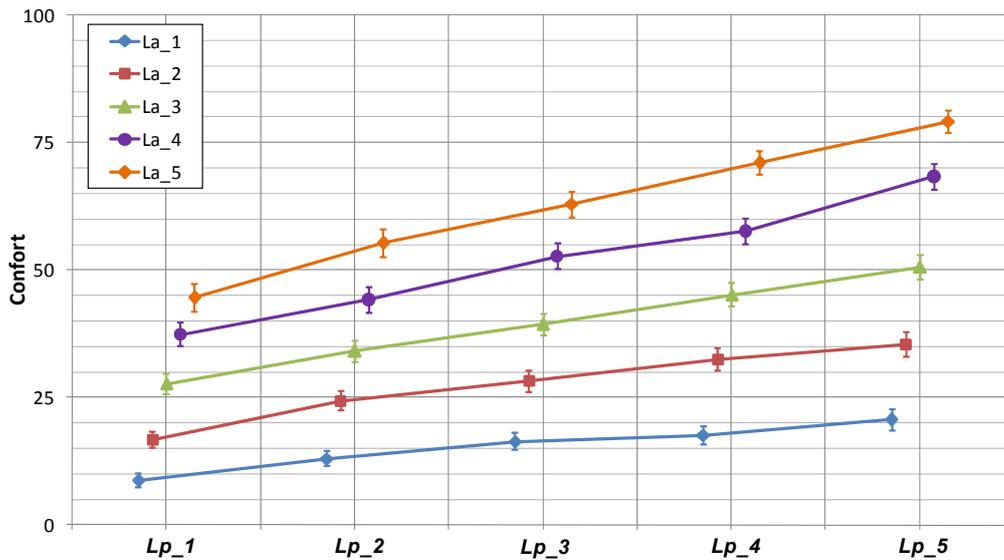


Figure 37 : Variation de la note de confort en fonction du niveau sonore L_p

A niveau sonore constant, la variation du confort avec le niveau vibratoire est quasiment linéaire. De même, à niveau vibratoire constant, les courbes de variation du confort avec le niveau sonore peuvent être assimilées à des segments de droite. Les niveaux acoustiques et vibratoires sont exprimés en décibel ; le confort varie donc exponentiellement avec l'accélération et la pression. Ces résultats sont conformes à la loi de Stevens qui relie la sensation à l'intensité d'un stimulus (Chapitre 2). L'effet d'une variation du niveau vibratoire est plus important que celui d'une variation du niveau acoustique. La pente moyenne des courbes de la Figure 36 est plus importante que celle de la Figure 37. La différence moyenne de confort entre 2 niveaux vibratoires successifs ($\Delta L_a = 3 \text{ dB}$) est ainsi de 11,8 points alors qu'il n'est que de 6,0 points pour les niveaux sonores ($\Delta L_p = 3 \text{ dB}$). Ce facteur 2, observé entre les pentes des deux figures précédentes, est en accord avec la valeur du rapport des coefficients de Stevens des modalités acoustiques et vibratoires.

La variation des évaluations de confort en fonction des paramètres expérimentaux est ensuite modélisée. L'hypothèse qu'un modèle linéaire simple suffit à prédire de manière satisfaisante la variation du confort à partir de celle des niveaux acoustiques et vibratoires est alors avancée. Ainsi, l'évaluation du confort global de la situation est supposée approximativement égale à une combinaison linéaire des effets des deux types de stimuli (Tableau 21).

L'inclinaison des 5 courbes de la Figure 36 et de la Figure 37 varie également fortement d'un niveau à l'autre. En effet, la Figure 36 fait apparaître que la diminution du niveau vibratoire ($L_a = L1 \rightarrow L5$) entraîne une plus grande augmentation du confort quand le niveau acoustique est faible ($L_p = L5 \Rightarrow$

58,4 pts) que lorsqu'il est fort ($L_p = L1 \Rightarrow 35,9$ pts). De même, la Figure 37 révèle qu'une diminution du niveau sonore ($L_p = L1 \rightarrow L5$) entraîne une plus grande augmentation du confort quand le niveau vibratoire est faible ($L_a = L5 \Rightarrow 37,5$ pts) que lorsqu'il est fort ($L_a = L1 \Rightarrow 12,0$ pts). Les variations de confort qui correspondent à chacune des dix courbes des deux figures précédentes sont modélisées par régression linéaire simple. La comparaison des écarts-types de tous les modèles obtenus montrent que les pentes des droites les plus extrêmes (L1 et L5) sont significativement différentes. Une interaction existe donc entre les niveaux acoustiques et vibratoires. Un terme correctif en $L_a \cdot L_p$ est alors ajouté au modèle linéaire précédemment choisi afin d'améliorer sa pertinence (Tableau 21). L'évaluation du confort global dépend donc toujours de la somme des effets des 2 types de stimuli, mais la contribution de chacune des modalités est dépendante de la valeur de l'autre.

Modèle Linéaire	Modèle avec interaction
Confort = $\alpha_1 \cdot L_a + \beta_1 \cdot L_p + \varepsilon_1$	Confort = $\alpha_2 \cdot L_a + \beta_2 \cdot L_p + \gamma_2 \cdot L_a \cdot L_p + \varepsilon_2$
$\alpha_1 = -3.960$; $\sigma_{\alpha_1} = 0,15$	$\alpha_2 = -17.160$; $\sigma_{\alpha_2} = 1,04$
$\beta_1 = -1.921$; $\sigma_{\beta_1} = 0,15$	$\beta_2 = -19.079$; $\sigma_{\beta_2} = 1,34$
$\varepsilon_1 = 632.58$; $\sigma_{\varepsilon_1} = 20,91$	$\gamma_2 = 0.208$; $\sigma_{\gamma_2} = 0,01$
$R^2 = 0,980$	$\varepsilon_2 = 2066.00$; $\sigma_{\varepsilon_2} = 112,97$
	$R^2 = 0,997$

Tableau 21: Modélisation de la variation du confort en fonction de L_a et de L_p

Les constantes α_1 , β_1 et ε_1 du modèle linéaire sont déterminées par le calcul d'une régression multiple sur les notes de confort à l'aide des couples de valeurs de L_a et de L_p connus. Les coefficients α_2 , β_2 , γ_2 et ε_2 sont également calculés par régression multiple. Cette régression est calculée sur les notes de confort à l'aide des valeurs de L_a , L_p et de la variable d'interaction $L_a \cdot L_p$. Dans les deux cas, les modèles sont renforcés par « bootstrap ». Les coefficients retenus sont alors les moyennes arithmétiques de coefficients de 20 modèles effectués sur 15 tirages parmi les 25 échantillons disponibles. Les coefficients de corrélation des modèles sont tous les deux très élevés. Chacun d'entre eux peut donc, à première vue, être utilisé pour prédire de manière satisfaisante la note de confort d'un véhicule. Cependant, l'analyse des autres paramètres des modèles ($r_{ajusté}^2$, écart-type) montre que le coefficient du terme d'interaction a une influence très significative.

Les notes de confort prédites par les modèles sont comparées aux évaluations effectuées par les sujets. (Figure 38). Les points relatifs au modèle linéaire et au

modèle avec interaction sont très proches les uns des autres. Cependant, le modèle avec interaction permet une prédiction plus fiable des notes de confort, notamment pour les niveaux les plus extrêmes ($L_a = L1$ ou $L5$, $L_p = L1$ ou $L5$). Ainsi, même si les différences entre les deux modèles sont très faibles et ne concernent qu'un nombre très limité de combinaisons de niveaux, l'utilisation du modèle avec interaction améliore sensiblement les prédictions. L'hypothèse avancée précédemment, selon laquelle les contributions de chacune des modalités aux évaluations de confort global dépendent l'une de l'autre, est alors retenue. Le modèle avec interaction est utilisé pour la suite des analyses.

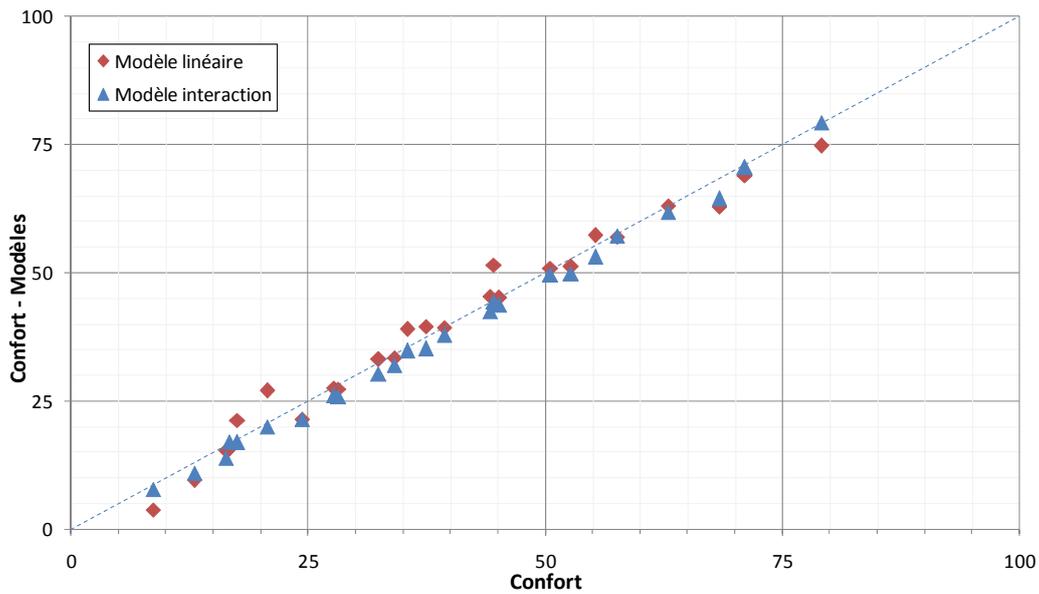


Figure 38 : Comparaison des modèles et des résultats

Enfin, la robustesse du modèle de confort est évaluée. A cet effet, les résultats des expériences précédentes sont utilisés. Comme précisé précédemment, les stimuli des tests « VS - Route A » de la première expérience servent de base à la construction de ceux de l'expérience en cours (4 véhicules parmi 8 sont sélectionnés pour être égalisés en niveau).

Les notes de confort prédites par le modèle sont comparées aux résultats précédemment obtenus (Figure 39). Tous les véhicules (sauf V2) sont situés près de la bissectrice du plan formé par les deux axes de confort. Cela signifie que les prédictions de confort du modèle avec interaction sont proches des notes de confort données par les sujets. S'il semble à priori normal que les prédictions et les évaluations des véhicules V1, V3 et V4 soient proches (ces véhicules ont servi à établir le modèle), le fait que les véhicules V4, V5, V7 et V8 le soient également est un signe de robustesse du modèle. Cette robustesse est d'autant plus grande que les niveaux réels des véhicules testés (Tableau 22)

se situent presque tous aux limites du domaine de validité du modèle ($L_a = 103 \rightarrow 115 \text{ dB}$, et $L_p = 78 \rightarrow 90 \text{ dB}$) et que les évaluations de confort sont faites par des sujets différents d'une expérience à l'autre.

Enfin, la prédiction de la note de confort du véhicule V2 est incorrecte. En effet, l'application du modèle sur les niveaux acoustiques et vibratoires de ce véhicule conduit à une note de confort négative. Cela peut être attribué à son niveau vibratoire réel trop élevé ($L_a = 120,9 \text{ dB}$) qui place ce véhicule largement hors du domaine de validité du modèle. Au final, les prédictions du modèle sont très satisfaisantes et peuvent être utilisées pour la prédiction du confort vibro-acoustique en simulateur.

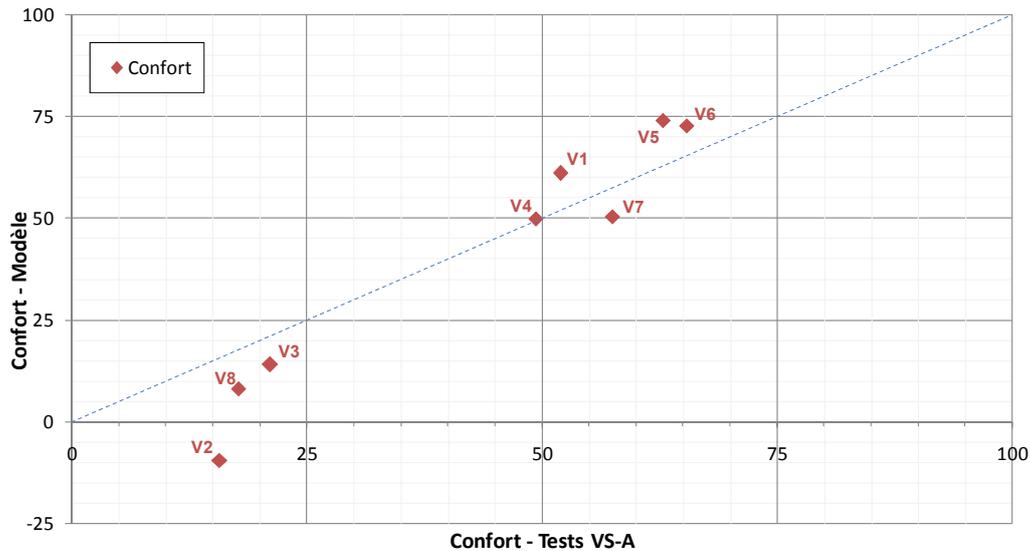


Figure 39 : Prédictions du modèle de confort avec interaction en fonction des évaluations des tests VS-A (Exp. 1)

Véhicule	L_p (dB)	L_p dB(A)	L_a (dB)	VDV ($m/s^{1,75}$)
V1	85,3	49,6	102,2	0,27
V2	82,3	52,0	120,9	2,80
V3	78,6	49,7	116,1	1,40
V4	85,2	49,5	105,2	0,39
V5	78,8	50,3	103,6	0,32
V6	78,4	49,2	104,1	0,35
V7	86,3	48,3	104,3	0,34
V8	78,0	55,8	117,4	1,58

Tableau 22 : Niveaux vibratoires et sonores des stimuli des tests VS - Route A
(L_p = moyenne de L_{p_gauche} et L_{p_droite} calculée sur les valeurs en Pascal)

Enfin, ces résultats sont comparés aux données existantes dans la littérature. Une certaine cohérence apparaît au niveau du type d'interactions entre les modalités sonores et acoustiques malgré les grandes différences méthodologiques et expérimentales des différentes études.

Howarth et al. ont étudié en simulateur la gêne globale de bruits et de vibrations enregistrés dans des immeubles lors du passage d'un train sur une voie ferrée proche [HOWA 91]. L'auteur observe une prédominance de la modalité sonore sur les évaluations. Cette domination peut sans doute s'expliquer par des niveaux sonores élevés ($L_p = 54 \rightarrow 79 \text{ dB}(A)$) et des niveaux vibratoires faibles ($VDV = 0,07 \rightarrow 0,40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1,75}$). Malgré l'observation d'un léger effet antagoniste du bruit sur les vibrations, le modèle obtenu reste un modèle linéaire où les termes d'interactions entre les deux modalités sont négligeables.

De même, Dempsey et al. étudient l'influence des niveaux de stimuli vibratoires ($L_a = 106 \rightarrow 122 \text{ dB}$) et sonores ($L_p = L_{\text{ambient}} \rightarrow 95 \text{ dB}(A)$) artificiels sur des évaluations de confort en simulateur [DEMP 79]. Le modèle obtenu décrit une relation linéaire entre le confort vibratoire, le confort sonore et le confort global. Le confort vibratoire est proportionnel au niveau vibratoire alors que le confort sonore varie de manière logarithmique avec le niveau sonore. De plus, une influence significative du niveau vibratoire sur le confort sonore est enfin mise en évidence. Elle reflète une interaction des vibrations sur les évaluations du son.

Enfin, Paulsen et al. étudient les effets des combinaisons de 4 niveaux sonores ($L_p = L_{\text{ambient}} \rightarrow 60 \text{ dB}(A)$) et de 4 niveaux vibratoires ($L_a = L_{\text{ambient}} \rightarrow 110 \text{ dB ref. } 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) sur les évaluations de gêne globale [PAUL 95]. Deux types de stimuli sont utilisés pour cette expérience. Les résultats montrent que les évaluations de la gêne globale sont systématiquement dominées par les sons. De même, les vibrations influencent les évaluations du son.

Les modèles rapportés par ces auteurs sont, pour la plupart, très proches de modèles linéaires même si une interaction, souvent très faible, peut parfois apparaître. La modalité dominante qui varie également en fonction des conditions expérimentales s'avère être le plus souvent la modalité sonore. Au-delà de leurs quelques différences, tous ces résultats ne sont pas incompatibles avec le modèle mis au point dans cette étude si l'on considère que les niveaux sonores étudiés par les différents auteurs restent plus élevés que ceux de cette expérience ($L_p = 45 \rightarrow 64 \text{ dB}(A)$). De plus, ce phénomène est de plus accentué par l'utilisation de niveaux vibratoires plus élevés que ceux de la littérature ($VDV = 0,30 \rightarrow 1,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-7/8}$). La comparaison de ces études demeure toutefois très délicate. Aussi, en toute rigueur, le domaine d'application du modèle établi doit être restreint aux strictes conditions expérimentales étudiées (nature et

durée des stimuli, dynamique de niveaux, dispositif expérimental, protocole, etc.).

3 Image perceptive des véhicules (Exp. 4)

Les expérimentations précédentes permettent de quantifier précisément les influences relatives des modalités sonores et vibratoires sur les évaluations de confort en simulateur. Désormais, les rôles prépondérants des niveaux vibratoires et sonores sont désormais bien connus. Outre ces résultats, ces expériences permettent également d'identifier plusieurs paramètres significatifs.

C'est précisément le cas de l'expérience 1 où une très forte discrimination des véhicules est observée pour l'ensemble des évaluations, même quand les vibrations sont présentées seules. Les sujets sont donc capables de différencier les stimuli uniquement à partir de la modalité vibratoire (tests V). La Figure 40 présente les notes de confort obtenues par chaque véhicule pour les deux routes testées. Les résultats sont accompagnés de barres d'erreur horizontales et verticales, qui correspondent respectivement aux seuils différentiels ($JND = 1,5 \text{ dB}$) ainsi qu'aux intervalles de confiance des notes de confort. Dans un premier temps, il apparaît clairement pour les deux routes, que certains véhicules (Route A : V3-V8, V4-V5 – Route B : V1-V4, V3-V8) sont significativement discriminés en confort mais pas d'un point de vue du niveau ($JND = 1,5 \text{ dB}$). De plus, deux véhicules qui possèdent des niveaux vibratoires différents ne sont pas systématiquement discriminés (Route B : V1-V6, V1-V7, V2-V3, V2-V8). Enfin, même si les classements relatifs des véhicules se révèlent identiques pour les routes A et B, les écarts de notation d'un même véhicule (V2 et V6) d'une route à l'autre ne sont pas systématiquement liés à une différence de niveau (les niveaux les plus élevés sont parfois jugés plus confortables).

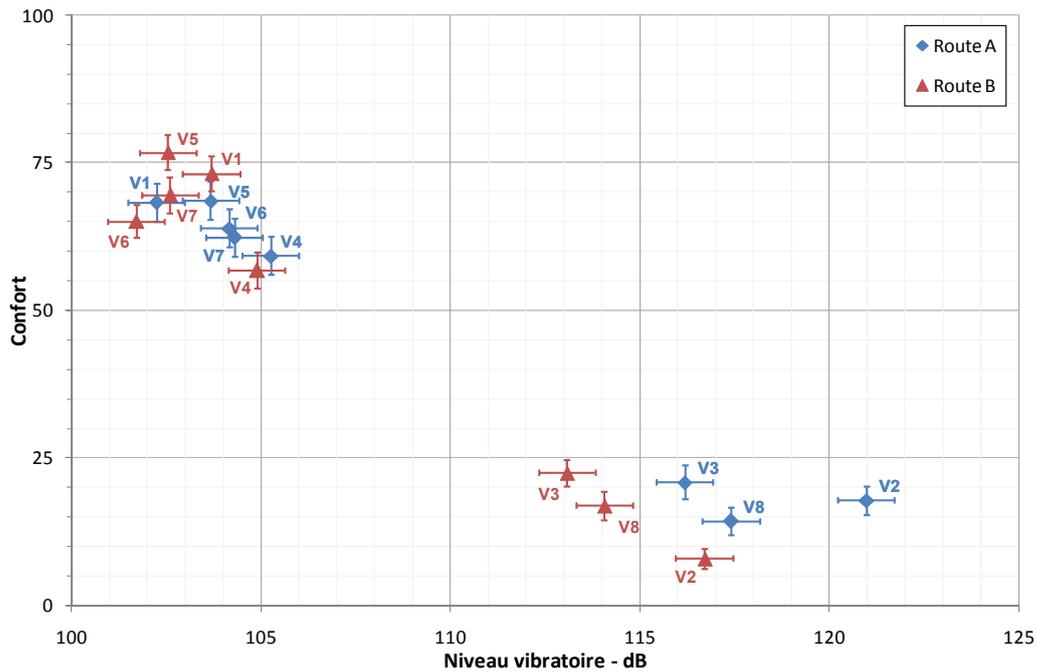


Figure 40 : Variation des notes de confort des tests V en fonction du niveau vibratoire (Exp. 1)

Dans la troisième expérience, pour quatre véhicules, des enregistrements vibratoires et sonores, équilibrés en niveaux, sont alors évalués. Les notes de confort attribuées au véhicule V1 se révèlent différentes de celles des trois autres véhicules (Chapitre 4 – Figure 34). Bien que les écarts de ces résultats soient faibles, ils n’en sont pas moins significatifs. Une telle différenciation du véhicule V1 apparaît aussi lors de l’analyse séparée des niveaux vibratoires et sonores : les différences du véhicule V1 sont d’autant plus grandes que les niveaux vibratoires sont élevés et que les niveaux sonores sont faibles. Cependant, les deux modalités ayant systématiquement été évaluées simultanément, il n’est pas possible d’attribuer directement ces différences à l’une ou à l’autre. Mais ce constat montre qu’une des caractéristiques physiques des signaux de V1, indépendante du niveau, influence de manière significative ces évaluations.

Dès lors, ces observations incitent à approfondir la compréhension de l’évaluation du confort vibro-acoustique d’autant que les résultats obtenus lors des précédentes expériences montrent que la modalité vibratoire a une importance prépondérante. Un test perceptif complémentaire qui ne fait intervenir que cette seule modalité est alors effectué.

Dans un premier temps, l’objectif est d’identifier quel facteur possède la plus grande influence sur la discrimination des stimuli vibratoires parmi les suivants :

- les différences « inter-véhicule » : la variation de la note de confort dépendrait plutôt du système excité (véhicule) que de la source vibratoire (route) ;
- les différences « inter-route » : la variation de la note de confort dépendrait en majorité des propriétés du système d'excitation (route) et non du résonateur (véhicule).

Une épreuve de classement de stimuli vibratoires permet de répondre à cette question. En effet, l'analyse de la répartition des groupes ainsi créés permet de révéler les paramètres en fonction desquels les individus effectuent leurs classements. Ce type de test permet l'étude d'un grand nombre de stimuli sans trop alourdir le protocole expérimental. Les stimuli sélectionnés font intervenir plusieurs véhicules, enregistrés sur des routes différentes. Enfin, les niveaux vibratoires de ces stimuli sont égalisés pour s'affranchir de la prépondérance de ce paramètre vis-à-vis des critères de discrimination recherchés.

3.1 Stimuli

Neuf véhicules de marques différentes sont sélectionnés pour l'enregistrement des stimuli vibratoires. Ils sont tous de classe moyenne et possèdent des moteurs à 4 cylindres diesel. Le Tableau 23 présente leurs principales caractéristiques techniques :

Véhicule	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9
Constructeur	Xxxxx	Xxxxx	Xxxxx	Xxxxx	Xxxxx	Xxxxx	Xxxxx	Xxxxx	Xxxxx
Modèle	Xxxxx	Xxxxx	Xxxxx	Xxxxx	Xxxxx	Xxxxx	Xxxxx	Xxxxx	Xxxxx
Année	2007	2007	2007	2007	2007	2007	2007	2007	2007
Type	Berline	Coupé	M-space	Berline	Berline	Berline	Berline	Berline	Berline
Référence	Xxxxx	Xxxxx	Xxxxx	Xxxxx	Xxxxx	Xxxxx	Xxxxx	Xxxxx	Xxxxx
Boite de vitesse	Méca	Méca	Méca	Méca	Méca	Méca	Méca	Méca	Méca
Carburant	Diesel	Diesel	Diesel	Diesel	Diesel	Diesel	Diesel	Diesel	Diesel

Tableau 23 : Références des véhicules mesurés

Des conditions de roulage très différentes sont volontairement sélectionnées. Ainsi, des mesures accélérométriques sont effectuées sur 3 portions de routes, à 3 vitesses différentes :

- route E : les véhicules circulent en 2^{nde} à 30 km/h sur une route dont le revêtement est fortement dégradé mais dont les déformations présentent un aspect très régulier ;

- route F : les véhicules roulent en 3^{ème} à 70 km/h sur cette route. Son revêtement est en bon état mais présente de petites irrégularités très localisées ;
- route G : les véhicules circulent en 3^{ème} à 50 km/h. Le revêtement est en bon état et les sollicitations créées par cette route sont très régulières.

Des échantillons, d'une durée de 3 secondes, des enregistrements des 9 véhicules circulant sur les trois routes sont préparés pour être présentés aux sujets (sauf pour la route E où, à cause de certaines difficultés expérimentales, les mesures effectuées dans les véhicules V5 et V8 n'ont pas pu être exploitées). Le nombre total de stimuli utilisés dans cette expérience est donc réduit à 25 au lieu de 27 (9 véhicules x 3 routes) initialement prévus.

Enfin, lors de cette étape, tous les signaux recueillis sont égalisés en niveau (après avoir préparé les signaux pour la restitution) sans qu'aucune pondération fréquentielle ne soit appliquée. Le système de restitution vibratoire est calibré pour obtenir un niveau vibratoire constant de 100 dB pour tous les échantillons. Le Tableau 24 présente les principales caractéristiques des stimuli présentés aux sujets.

VDV	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9
Route E	0,49	0,41	0,44	0,47	-	0,43	0,48	-	0,61
Route F	0,31	0,33	0,30	0,33	0,32	0,33	0,30	0,31	0,31
Route G	0,29	0,33	0,35	0,32	0,31	0,35	0,32	0,35	0,30

Tableau 24 : VDV des stimuli vibratoires

3.2 Protocole

44 sujets naïfs (13 femmes et 31 hommes) sont sélectionnés pour participer à cette expérience en tant que volontaires (Tableau 25). Aucune condition particulière n'est exigée lors du recrutement. Les sujets ont des profils socio-professionnels très variés et certains d'entre eux ont déjà participé à des expériences psychophysiques. Ils sont invités à adopter une position confortable lors de leur installation sur le banc. Ils doivent s'imaginer assis à l'intérieur d'un véritable véhicule, fenêtres fermées et air conditionné arrêté.

Sujets	Moyenne	Ecart Type	Min	Max
Age (m)	28,9	10,1	19	51
Taille (m)	1,73	0,12	1,56	1,89
Poids (kg)	72,3	12,3	53	93
BMI (kg/m²)	22,6	4,6	15,8	30,2

Tableau 25 : Caractéristiques anthropométriques des sujets

Les sujets doivent réaliser un test de classement des stimuli vibratoires reproduits sur le banc pour regrouper les 25 stimuli en fonction de leur ressemblance. Le nombre de groupes formés et le nombre d'échantillons à l'intérieur d'un groupe ne sont pas fixés. Pour réaliser cette tâche, les sujets n'ont pas de limite de temps et le nombre de répétition des signaux est illimité.

Au début de l'expérience, les échantillons sont présentés aléatoirement aux sujets. Des plus, des étiquettes différentes pour chaque sujet sont assignées à chaque stimulus. La durée totale de l'épreuve est d'environ 15 minutes.

3.3 Résultats

Les résultats de l'épreuve perceptive sont stockés sous la forme d'une matrice de catégorisation qui décrit, pour chaque sujet, le groupe attribué à chaque stimulus. La première étape du traitement des données consiste donc à calculer les matrices d'incidences de chaque sujet. Il s'agit de matrices « produits x produits » binaires dans lesquelles chaque élément prend la valeur 1 s'il correspond à un couple de produits (P_i, P_j) appartenant à un même groupe, ou la valeur 0 s'il correspond à un couple de produits de groupes différents. Les 44 matrices ainsi obtenues sont représentatives de la manière dont chaque sujet a effectué ses agrégations et peuvent être utilisées pour l'examen détaillé des résultats du test. Toutefois, des analyses préliminaires sont effectuées préalablement à l'exploitation des résultats selon la problématique de l'expérience.

3.3.1 Analyses préliminaires

La première étape du traitement des résultats est l'évaluation du degré de consensus parmi les sujets. Pour cela, il est nécessaire d'effectuer une CAH (distance euclidienne - méthode de Ward) sur la matrice de dissimilarité des juges. Cette matrice est obtenue à partir de la matrice de similarité, elle-même calculée en comparant deux à deux les matrices d'incidences de chaque juge à l'aide de l'indice de Rand corrigé [HUBE 85]. Si un ensemble S contient deux partitions X et Y , cet indice est défini comme :

$$AR = 2.(a.b - c.d)/((a + d).(d + b) + (a + c).(c + b)).$$

a désigne le nombre de paires d'éléments de S dans le même groupe au sein de X et de Y . b désigne le nombre de paires dans des groupes différents dans X et Y . Enfin, c désigne le nombre de paires d'éléments appartenant au même groupe dans X mais à des groupes différents dans Y , tandis qu'à l'inverse, d désigne le nombre de paires d'éléments appartenant à des groupes différents dans X et identiques dans Y . L'indice de Rand corrigé permet d'estimer l'accord entre

deux partitions indépendamment du nombre de groupes qu'elles contiennent. Le dendrogramme, ainsi obtenu, ne fait apparaître aucune catégorie de sujets.

La segmentation des sujets liée à la finesse des partitions est ensuite évaluée. Pour cela une CAH (distance euclidienne - méthode de Ward) est réalisée sur la matrice de dissimilarité, calculée cette fois-ci à partir de l'indice de Rand asymétrique corrigé. En effet, cet indice permet d'estimer dans quelle mesure une partition est « plus fine » qu'une autre par la mesure du degré d'inclusion. De nouveau, les résultats ne font apparaître aucune catégorie particulière de sujets.

Il convient alors de décrire le nombre de groupes formés par les sujets. La Figure 41 présente la répartition des sujets en fonction du nombre de groupes de stimuli formés. Les sujets établissent en moyenne 5,6 groupes et l'histogramme montre que la majorité des sujets en forment 4 ou 5.

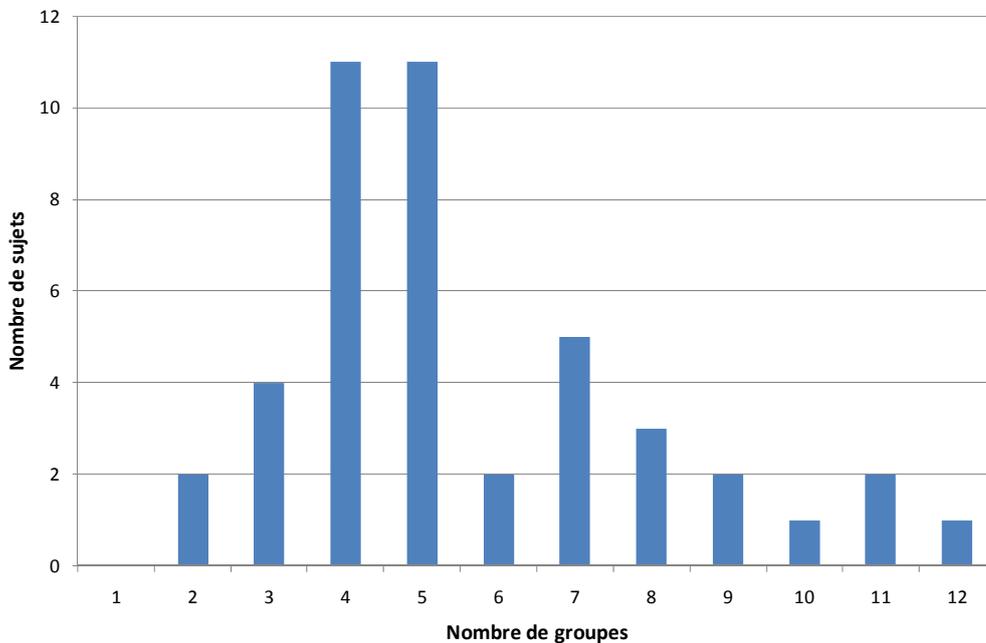


Figure 41 : Répartition des sujets en fonction du nombre de groupes de stimuli

Le compromis général entre tous les sujets (matrice de partition « produit x produit » telle que la somme des carrés des écarts entre les matrices de partitions de chaque juge soit minimale) est alors estimé. Cette matrice est obtenue par classification des matrices de partition de chaque juge. Les groupes ainsi obtenus sont présentés dans le Tableau 26. Il apparaît que 12 groupes sont créés par le compromis. Cette valeur s'avère très élevée par rapport au nombre moyen de groupes créés par les sujets, ce qui indique un fort niveau de

dispersion dans les réponses des sujets. Toutefois, tous les groupes sont composés de stimuli correspondant à une même route.

Groupe	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	V1-C	V3-C	V5-C	V6-C	V9-C	V2-B	V3-B	V8-B	V1-A	V1-B	V2-A	V3-A
	V2-C	V4-C			V6-B	V4-B	V5-B	V9-B		V4-A		V9-A
		V7-C				V7-B	V8-B			V6-A		
		V8-C					V9-B			V7-A		

Tableau 26 : Compromis de segmentation des stimuli

Par la suite, le niveau de proximité de chaque juge avec le compromis global est estimé. On calcule pour cela les indices de Rand corrigés en comparant les matrices d'incidence de chaque sujet à la matrice de partition du compromis. L'analyse des probabilités associées à cet indice montre que 8 juges sur 44 sont très éloignés du compromis global. Des résultats similaires sont également obtenus en utilisant l'indice de Rand asymétrique corrigé. Le compromis global n'est pas satisfaisant car il fait apparaître un trop grand nombre de groupes. Les 8 sujets les plus éloignés ne sont donc pas répartis dans une classe à part, et l'ensemble des données est traité de manière globale dans la suite de l'analyse.

3.3.2 Cartographie des évaluations

L'objectif est de réaliser une cartographie précise des évaluations. Pour cela, une CAH (distance euclidienne - méthode de Ward) est calculée sur la matrice de co-occurrence moyenne des stimuli (Figure 42). Des groupes de stimuli qui correspondent aux routes apparaissent très nettement. Ainsi, à l'exception de V5-F, tous les stimuli de la route F se démarquent clairement des autres. Les stimuli des routes E et G sont plus proches les uns des autres que ceux de la route F mais, la discrimination selon le type de route reste toujours très nette. Cette première analyse correspond aux résultats de la classification des stimuli obtenue à partir de la matrice de compromis. De manière générale, les stimuli sont donc rassemblés en fonction des conditions de roulage et non en fonction du type de véhicule.

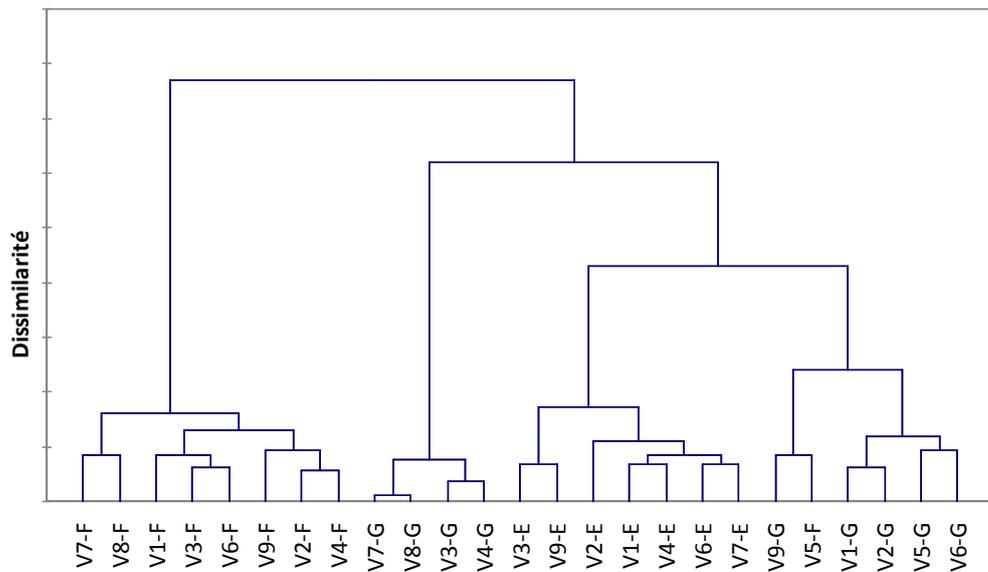


Figure 42 : Dendrogramme de la segmentation des stimuli

Pour affiner les résultats obtenus par CAH, une analyse MDS (Multi-Dimensional scaling – analyse métrique réalisée avec SPSS) complémentaire est réalisée sur la matrice de co-occurrence moyenne (Figure 43). Un seuil de critère de stress de 10% est choisi et permet de déterminer qu'un modèle à 4 dimensions conduit à un bon ajustement de l'analyse.

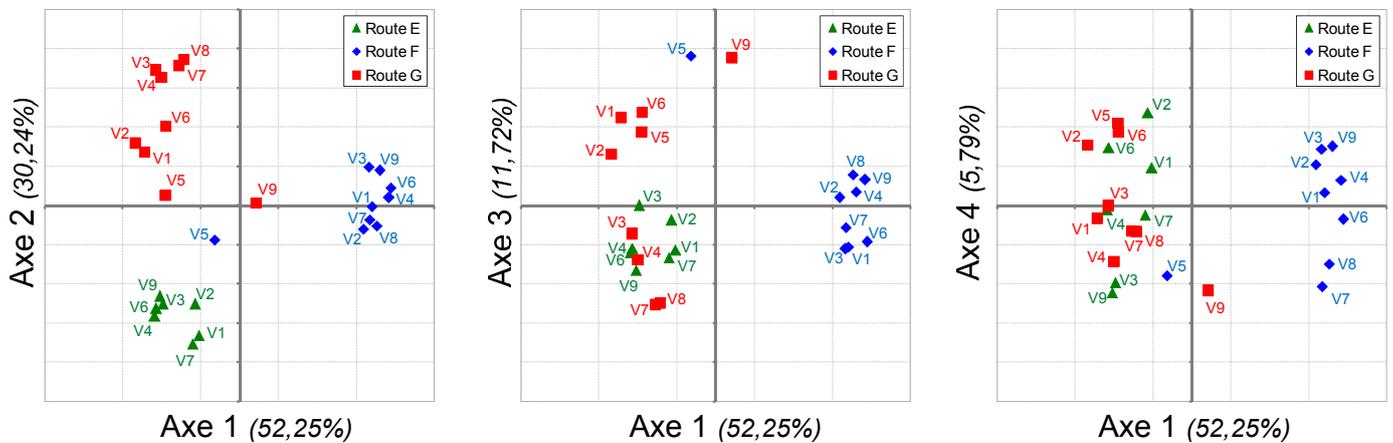


Figure 43 : MDS de la matrice de co-occurrence moyenne

La répartition des stimuli dans l'espace d'arrivée permet d'observer que :

- la première dimension correspond à une discrimination des routes. En effet, à l'exception de V5, tous les stimuli de la route F sont groupés sur la droite de cet axe. Les stimuli des routes E et G ne sont pas discriminés entre eux et sont placés à l'opposé de l'axe ;

- la deuxième dimension correspond également à une segmentation des routes. Cette fois ci, les routes E et F sont significativement discriminées. Enfin, les véhicules de la route G sont plus dispersés que ceux des autres routes, mais cet effet n'est pas significatif ;
- la répartition des véhicules des routes E et F dans le plan 1-3 est proche de celle du plan 1-2. Les stimuli des routes E et F sont peu dispersés le long de l'axe 3, contrairement aux stimuli de la route G, très dispersés, le long de cet axe. Au final, cette répartition des stimuli de la route G montre que ni les routes, ni les véhicules ne sont discriminés selon l'axe 3 ;
- pour finir, l'observation du plan 1-4 révèle une forte dispersion de tous les stimuli selon l'axe 4. Comme pour l'axe 3, ni les véhicules, ni les routes ne sont séparés de manière significative.

Les deux premiers axes représentent 82% de l'inertie du modèle. Chacun d'eux reflète une segmentation des routes avec un fort degré de discrimination. A l'inverse, le paramètre « véhicule » ne s'avère pas discriminant. De plus, pour les axes 3 et 4 de l'espace d'arrivée, les sujets ne distinguent pas une image vibratoire propre à chaque véhicule parmi les stimuli présentés. Cependant, les sujets sont sensibles aux différences induites par les conditions de roulage. À niveau vibratoire équivalent, la sensation vibratoire dépend donc essentiellement de la source d'excitation (route) et non du système sollicité (véhicule).

Cette observation est à confronter aux résultats de l'expérience 1 obtenus sur des stimuli différents (Chapitre 3). En effet, dans le cadre de l'évaluation de confort de signaux de niveaux vibratoires différents, le degré de discrimination des véhicules apparaît très élevé et le classement de confort des véhicules ne dépend pas significativement des conditions de circulation. Ces dernières n'entraînent alors qu'une légère dilatation de l'échelle de notation. Or, l'égalisation en niveau, appliquée aux stimuli de cette expérience, a complètement masqué les différences inter-véhicules. L'image vibratoire des véhicules a donc été atténuée par l'égalisation en niveau.

Désormais, il convient de déterminer si certaines propriétés des stimuli peuvent expliquer les classements effectués par les sujets. Ainsi, les caractéristiques physiques des stimuli sont mesurées et comparées aux résultats de l'épreuve perceptive. Les différents indicateurs rencontrés classiquement dans la littérature sont estimés sur les signaux bruts, les signaux pondérés, selon la norme ISO-2631, ainsi que sur leur enveloppe temporelle (calculée par transformée de Hilbert) (Chapitre 1).

L'étude des liens entre les caractéristiques physiques des signaux et les évaluations de confort est effectuée par classification (CAH – distance

euclidienne – méthode de Ward) des matrices de dissimilarité pour chacun des indicateurs. Ces matrices de dissimilarité sont estimées en calculant, deux à deux, les distances euclidiennes entre les indicateurs associés à chaque stimulus. Au final, cette étude n’apporte pas plus d’information sur les résultats de l’épreuve perceptive.

Une analyse complémentaire des enveloppes des signaux est alors réalisée. On effectue ainsi une CAH (distance euclidienne – méthode de Ward) sur la matrice de distance des enveloppes des stimuli (Figure 44). Cette matrice de distance est calculée en estimant directement les distances euclidiennes entre chacune des enveloppes des signaux vibratoires. Le meilleur résultat est obtenu lorsque le signal vibratoire est sous-échantillonné à 65 Hz avant le calcul de l’enveloppe.

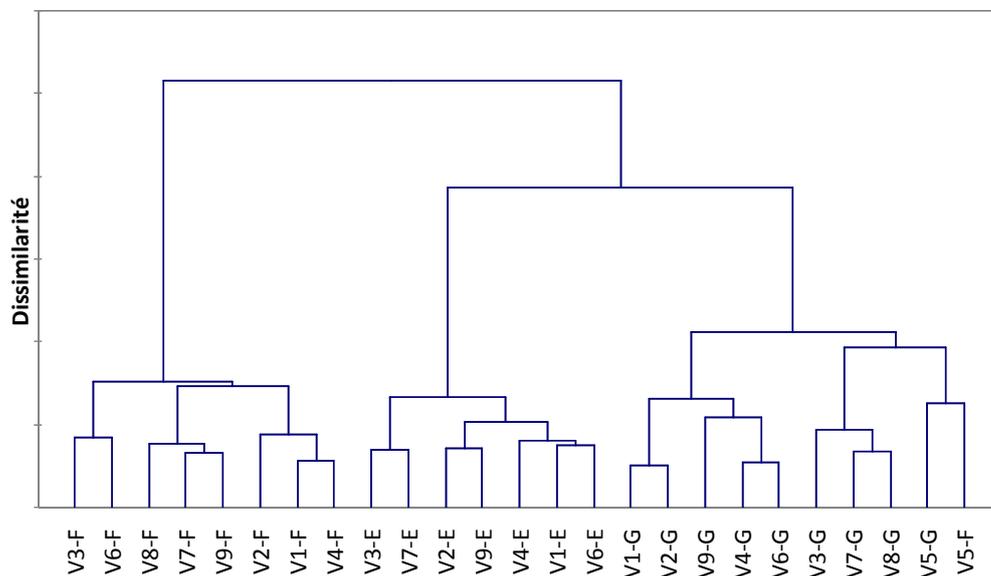


Figure 44 : Classification des enveloppes des signaux vibratoires sous-échantillonnés

Les enveloppes sont classées en 3 groupes. Chacun de ces groupes correspond à un type de route. Seul le véhicule 5, enregistré sur la route F, est regroupé avec les stimuli de la route G. Même si la discrimination des routes E et G est plus marquée que précédemment, ce classement est très proche de celui effectué par les sujets. Par conséquent, la segmentation des stimuli est bien effectuée selon la forme de leurs enveloppes temporelles.

La Figure 45 présente les enveloppes temporelles moyennes de tous les véhicules sur les routes F et G. Comme précisé précédemment, ces enveloppes sont calculées sur les enregistrements vibratoires sous-échantillonnés à 65 Hz par transformée de Hilbert. L’enveloppe du véhicule V5 qui circule sur la route F est rajoutée pour permettre d’illustrer visuellement la

raison pour laquelle le stimulus V5-F est classé parmi les stimuli de la route G. Son enveloppe est en effet plus proche de l'enveloppe moyenne de la route G que de celle de la route F.

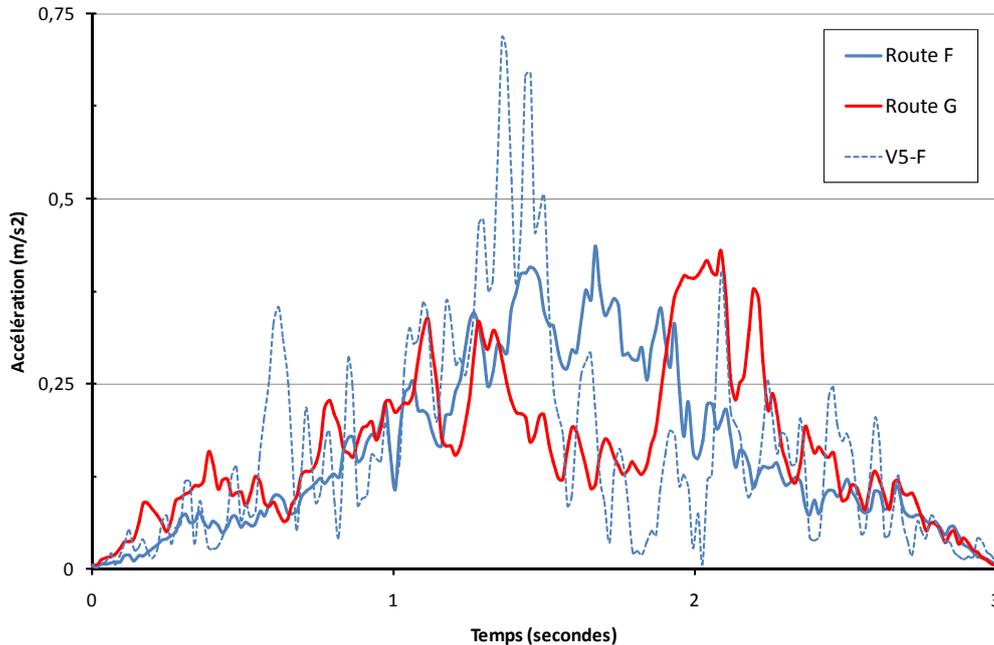


Figure 45 : Enveloppes temporelles moyennes des stimuli en fonction du type de route

4 Conclusion

L'expérience 3 a permis de quantifier précisément les influences relatives des modalités sonores et vibratoires à partir de signaux réels modifiés en niveau.

Conformément aux conclusions obtenues lors des précédentes expérimentations, ces derniers résultats montrent indéniablement le rôle prépondérant du niveau vibratoire. Et bien que le rôle du niveau sonore ait été minimisé jusque-là, sans doute à cause des distributions d'amplitudes vibratoires des tests menés antérieurement, il s'avère également significatif.

Une diminution de la discrimination des stimuli est aussi mise en évidence pour les faibles niveaux sonores à mesure que le niveau vibratoire augmente. De plus, une relation linéaire ainsi qu'une interaction d'importance significative apparaissent clairement entre le confort et les niveaux vibratoires et sonores.

Le modèle obtenu permet de prédire avec robustesse les contributions relatives des niveaux vibratoires et sonores aux évaluations de confort vibro-acoustique en simulateur. Si le domaine d'application des résultats doit se

limiter aux conditions expérimentales testées, le protocole et les analyses déployés répondent aux objectifs fixés, et les rôles des niveaux vibratoires et sonores sont, dorénavant, parfaitement établis.

La seconde expérience de catégorisation de stimuli vibratoires égalisés en niveau permet ensuite d'approfondir la compréhension de la perception du confort vibratoire en estimant l'impact des différences inter-véhicule ou inter-route sur la discrimination de stimuli vibratoires.

La sensation éprouvée par les sujets dépend essentiellement de la route (les 9 véhicules présentés ne sont pas discriminés). Une analyse approfondie des propriétés physiques des stimuli montre que la segmentation est étroitement liée aux profils basses fréquences de l'enveloppe temporelle des stimuli ($f \leq 30 \text{ Hz}$). Ainsi, à niveau global équivalent, les sensations des sujets varient pour des conditions différentes de circulation, alors qu'elles ne varient pas en fonction du véhicule.

Ce bilan est à confronter aux évaluations de confort des expériences précédentes :

- un niveau de discrimination très élevé entre les véhicules est mis en évidence et une forte corrélation entre niveau vibratoire et notes de confort apparaît (Expériences 1 et 2). La littérature rapporte également un lien fort entre ces deux paramètres ;
- le classement des véhicules ne dépend pas des conditions de circulations. Les notes de confort varient très peu en fonction de ce paramètre. Seule, une légère dilatation de l'échelle de notation est observée (Expérience 1).

Ainsi, lorsque les signaux vibratoires à niveau réel sont présentés aux sujets, l'effet du véhicule devient prépondérant. Ce phénomène se traduit par un degré élevé de discrimination des véhicules. Dans ce cas précis, l'influence du type de route est secondaire. Inversement, pour les signaux vibratoires égalisés en niveau, les caractéristiques propres à chaque condition de circulation guident les évaluations. Les informations qui permettent aux sujets de discriminer les véhicules sont donc atténuées par l'égalisation en niveau. Les sujets sont alors plus sensibles aux différences liées aux conditions de roulage.

Tous ces résultats contribuent à affiner la connaissance des paramètres qui influencent les évaluations de stimuli automobiles en simulateur. Même si les attributs perceptifs étudiés dans cette expérience ont un impact faible dans le cas d'évaluation de niveaux réels, ils ont toutefois un impact indéniable sur les évaluations. Les sujets ont donc la capacité à distinguer et surtout à identifier la source du résonateur vibratoire (phénomène connu en catégorisation sonore [GUYO 97]). Cette constatation met en évidence la grande acuité du jugement dont font preuve les sujets concernant la modalité vibratoire.

Partie 5

Confort et prestations automobiles

5

CONFORT ET PRESTATIONS AUTOMOBILES

1	Introduction	148
2	Evaluations expertes de signaux de synthèse (Exp. 5)	152
2.1	Stimuli	152
2.2	Protocole	155
2.3	Résultats	157
2.3.1	Analyses préliminaires	157
2.3.2	Evaluations expertes et paramètres de synthèse	162
3	Evaluations de confort de signaux de synthèse (Exp.6)	166
3.1	Stimuli	167
3.2	Protocole	170
3.3	Résultats	171
3.3.1	Analyses préliminaires	171
3.3.2	Evaluations de confort et paramètres de synthèse	174
4	Conclusion.....	179

V Confort et prestations automobiles

1 Introduction

Parmi l'ensemble des prestations offertes par un véhicule, le confort en phase de roulage basse vitesse constitue un des items les plus importants en raison de l'utilisation croissante des véhicules en milieu urbain. S'il est généralement admis que sa prédiction nécessite l'intégration des modalités vibratoires et acoustiques, les expériences précédentes montrent qu'en simulateur les évaluations sont largement dominées par la modalité vibratoire. L'influence de cette modalité sur les caractéristiques des véhicules liées au confort de roulage basse vitesse doit donc être étudiée plus précisément pour établir le lien entre le confort vibratoire et les prestations automobiles qui lui sont associées.

Pour parvenir à optimiser les caractéristiques d'un véhicule, une liste des « prestations clients » est établie dès les toutes premières étapes de sa conception. Celle-ci rassemble l'ensemble des objectifs auxquels devra répondre le futur véhicule en termes de services offerts à ses futurs occupants. Ce référentiel des « prestations clients » (ou « grille marketing produit ») structure ainsi les attentes explicites et implicites des clients sur le produit véhicule. Il sert de canevas pour les projets de développement.

Cette liste, dénommée ici « grille de niveau », fait apparaître 4 niveaux hiérarchiques pour la décomposition des prestations clients (Tableau 27). Chacun de ces niveaux est lui-même constitué de plusieurs « items de cotation » (IC) qui correspondent chacun à des caractéristiques très précises du véhicule. Les évaluations des IC s'effectuent le plus souvent par comparaison avec un véhicule de référence (prototype ou véhicule de marque concurrente).

Niveau	Prestation Client	Nombre d'IC
Niveau 0	I. Qualité	10 IC
Niveau 1	1. Robustesse de la carrosserie et des équipements extérieurs	38 IC
Niveau 2	1.1. Protection de la carrosserie et des feux assurés par les boucliers	202 IC
Niveau 3	1.1.1. Carrosserie bien protégée par le bouclier avant	457 IC

Tableau 27 : Extraits de la grille marketing d'un véhicule, donnés à titre d'exemple

Les cotations des IC sont effectuées de manière autonome pour chaque niveau (les niveaux supérieurs ne sont pas des moyennes arithmétiques des

niveaux inférieurs). L'usage de la grille en fonction de ces niveaux se justifie de la manière suivante :

- niveau 1 : les prestations clients de niveau 1 font l'objet de cotations qui s'étalonnent sur les bases d'une évaluation du marché actuel par le client. En parallèle s'effectue une projection à 4 ou 5 ans des notes selon l'évolution envisagée du marché. La corrélation de ces cotations avec les priorités du projet de développement du véhicule permet d'en fixer les grandes orientations et de les justifier ;
- niveau 2 : les prestations clients de niveau 2 permettent d'affiner ces objectifs via des enquêtes clientèle et des cotations internes, menées par des experts du domaine ;
- niveau 3 : les prestations clients de niveau 3 servent à perfectionner ces objectifs. Certains items de ce niveau sont mesurés par des enquêtes clientèle mais sont utilisés plus spécifiquement pour des cotations, à l'initiative des experts des domaines techniques concernés.

Enfin, pour chaque niveau, des commentaires permettent de préciser le contenu et les attendus des prestations clients.

Le Tableau 28 présente les extraits de la « grille marketing produit » qui concernent spécifiquement le confort vibro-acoustique de roulage basse vitesse. Tous les items de cotations présentés appartiennent aux grilles de niveaux 2 et 3 et font appel à des cotations expertes. De plus, les définitions de ces IC n'ont pas fait l'objet de démarche d'analyse sensorielle. Ils sont essentiellement issus d'approches empiriques et ont été formalisées, au fur et à mesure du temps, grâce à l'expérience des experts du groupe.

Niveau	Prestation Client
0	I. Confort Global
1	1. Absence de bruits parasites et de vibrations
2	1.1. Confort vibratoire
3	1.1.1. Absence de vibrations aux places avant en roulage basse vitesse (sur bonne route) Définition : Xxxxx.
3	1.1.2. Absence de vibrations aux places avant en roulage vitesse moyenne et haute (sur bonne route) Définition : Xxxxx.
1	2. Confort et suspension
2	2.1 Bonne absorption des défauts de la route aux places avant
3	2.1.1. A basse vitesse Définition : Xxxxx.
2	2.2 Feutré de suspensions aux places avant Définition : Xxxxx.

Tableau 28 : Extraits de la « grille marketing produit » d'un véhicule

Le Tableau 29 qui complète les informations présentées par la « grille marketing » donne les définitions des principaux termes, utilisés par les experts du groupe, pour décrire les vibrations et procéder ainsi aux évaluations des IC. Les descriptions sont fortement liées au contenu spectral des signaux. Les critères utilisés pour évaluer les prestations laissent également une grande part à l'interprétation subjective de chaque notion (exemple : crapoteux, feutré, toucher de route, moquette, etc.).

Catégorie	Composante	Définition	Effets subjectifs	Roulage type
Confort de suspension (Xxx Hz)	Pompage	Xxxxx	Xxxxx	Grandes ondulations
	Tangage	Xxxxx	Xxxxx	Grandes ondulations
	Roulis	Xxxxx	Xxxxx	Grandes ondulations aléatoires, changement lent de trajectoire, déformées dissymétriques cumulées
	Cahotement	Xxxxx	Xxxxx	Cumul des roulages type ci-dessus
Confort de siège (Xxx Hz)	Effet de balle	Xxxxx	Xxxxx	Sol lisse avec faibles ondulations invisibles (petit niveau d'excitation)
	Ensachage	Xxxxx		Courtes ondulations à fortes excitations
Trépidations (Xxx Hz)	Vibrations colonne de direction	Xxxxx	Xxxxx	Roulage sur pavés, roulage sur autoroute à partir de 130 km/h
	Vibrations planche de bord	Xxxxx	Xxxxx	
	Vibrations dans les planchers			
	Vibrations au niveau des assises	Xxxxx	Xxxxx	Roulage sur route à bon revêtement, mais profil ondulé ou déformé
	Vibrations des dossiers de siège			
Toucher de Route		Xxxxx	Xxxxx	Roulage sur revêtement : légèrement bosselé, irréguliers, crapoteux

Tableau 29 : Définitions des termes utilisés par les experts lors de l'évaluation d'IC

L'objectif est d'établir précisément le lien entre les items de cotations liés au confort vibro-acoustique et les évaluations de confort des clients. Pour cela,

deux expériences sont réalisées avec des signaux vibratoires artificiels dont les caractéristiques sont contrôlées.

La première expérience consiste à faire évaluer des signaux de synthèse par des experts chargés d'évaluer des prestations de véhicules. Ces signaux artificiels sont évalués selon les principaux items utilisés au sein du groupe pour décrire les vibrations. Le lien entre les paramètres de synthèse des stimuli et les évaluations est alors établi.

La deuxième expérience concerne des évaluations de confort : des sujets naïfs sont exposés à des signaux artificiels dont la composition est inspirée des résultats des évaluations expertes. L'analyse de ces données permet d'une part de déterminer objectivement les liens entre le confort et les paramètres de synthèse utilisés, et d'autre part d'identifier les items de cotation les plus pertinents pour le confort.

2 Evaluations expertes de signaux de synthèse (Exp. 5)

2.1 Stimuli

Les IC des prestations liées au confort vibro-acoustique sont évaluées dans des conditions de roulage très précises (revêtement irrégulier, bosselé, autoroute, grandes ondulations, etc.). Une description statistique des caractéristiques physiques de signaux enregistrés dans de telles conditions s'avère nécessaire (Figure 46). Les statistiques sont issues de mesures de 27 véhicules sur plus de 40 portions de routes différentes. Les conditions de roulage varient de routes en « parfait état » à des routes dont le revêtement est « très fortement dégradé ». Les vitesses de circulation varient de 20 à 50 km/h. Les courbes présentées ne sont pas des spectres réels mais correspondent aux valeurs des indicateurs de statistiques descriptives (moyenne, médiane, maximum, minimum, 1^{er} quartile et 3^{ième} quartile), calculées sur les valeurs efficaces d'accélération pour chaque fréquence de spectres en tiers d'octave entre 4 Hz et 31,5 Hz. Ainsi, la courbe « Maximum » n'est pas le spectre d'un signal mais est composée du maximum de tous les spectres.

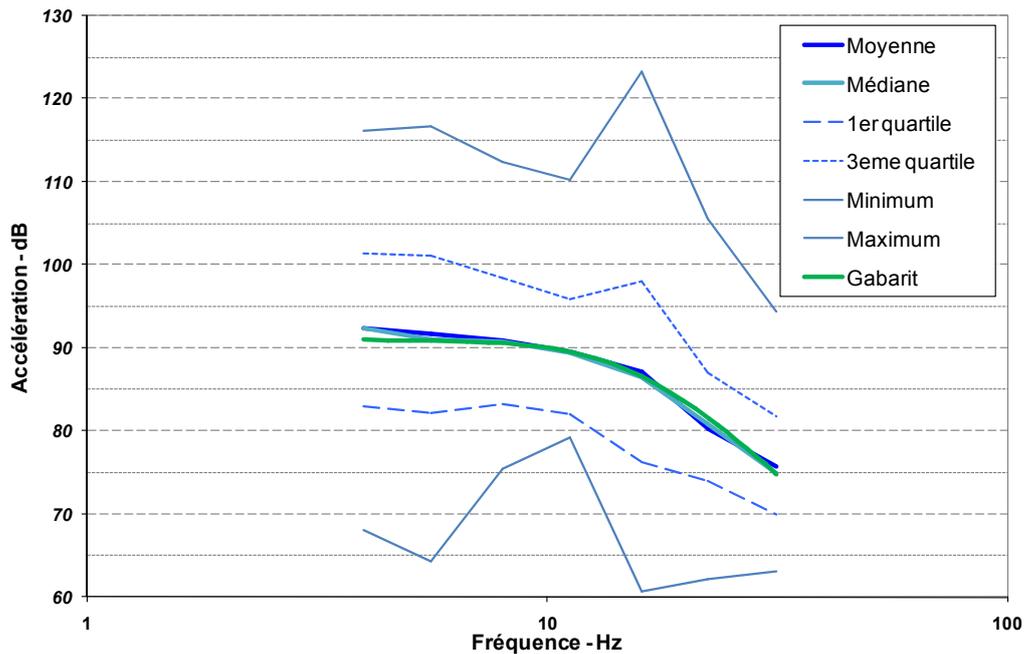


Figure 46: Description spectrale statistique des accélérations mesurées dans des conditions de roulage pertinentes pour l'évaluation des prestations de confort de roulage vibro-acoustique basse vitesse

La création des stimuli artificiels s'appuie sur ces résultats statistiques. L'amplitude de la moyenne des accélérations décroît avec la fréquence avec une pente d'environ 12 dB par octave. Cette diminution se rapproche de celle d'un bruit blanc filtré par un filtre passe bas d'ordre 2 ($f_c = 14 \text{ Hz}$). Ce type de signal sert donc de base à la synthèse des signaux artificiels et de stimuli de référence lors des évaluations. Plusieurs tirages de bruit blanc sont ainsi sélectionnés puis filtrés pour obtenir des signaux fidèles au gabarit. Le niveau global de ces stimuli est de 100 dB et leur durée est de 10 secondes.

Le contenu fréquentiel de chacun de ces signaux de référence est ensuite modifié par amplification de bandes de fréquences d'une octave de largeur. Pour cela, un jeu de filtres conformes à la norme NF-61260 est utilisé [NF 61260]. 7 fréquences centrales et 4 gains sont retenus à l'issue d'une séance de pré-test (Tableau 30). La largeur des bandes de fréquences modifiées ainsi que la répartition des fréquences centrales font que 2 bandes de fréquences voisines se recouvrent de moitié. Ce choix est un compromis méthodologique entre une durée de test acceptable pour les experts et un nombre de paramètres suffisants pour couvrir très finement l'ensemble du domaine d'application de l'étude.

Fréquence (Hz)		Gain (dB)	
F1	4	G1	-6
F2	5,6	G2	-3
F3	8	G3	+3
F4	11,2	G4	+6
F5	16		
F6	22,4		
F7	31,5		

Tableau 30 : Paramètres utilisés pour la synthèse des stimuli vibratoires

La Figure 47 présente les gabarits utilisés pour la modification des signaux de référence. Chaque gabarit est appliqué à un tirage différent de bruit blanc filtré. Cette précaution permet d'éviter que les experts n'identifient les paramètres de synthèse et ne modifient leurs évaluations au cours de l'expérience. De plus, les différences de niveaux entre les stimuli de cette expérience étant réduites par rapport à la dynamique de signaux réels, ce choix permet de s'affranchir de l'effet éventuel de l'enveloppe temporelle associée à un tirage aléatoire unique (Expérience 4). Au final, 28 signaux sont ainsi obtenus et présentés aux experts lors de l'épreuve perceptive.

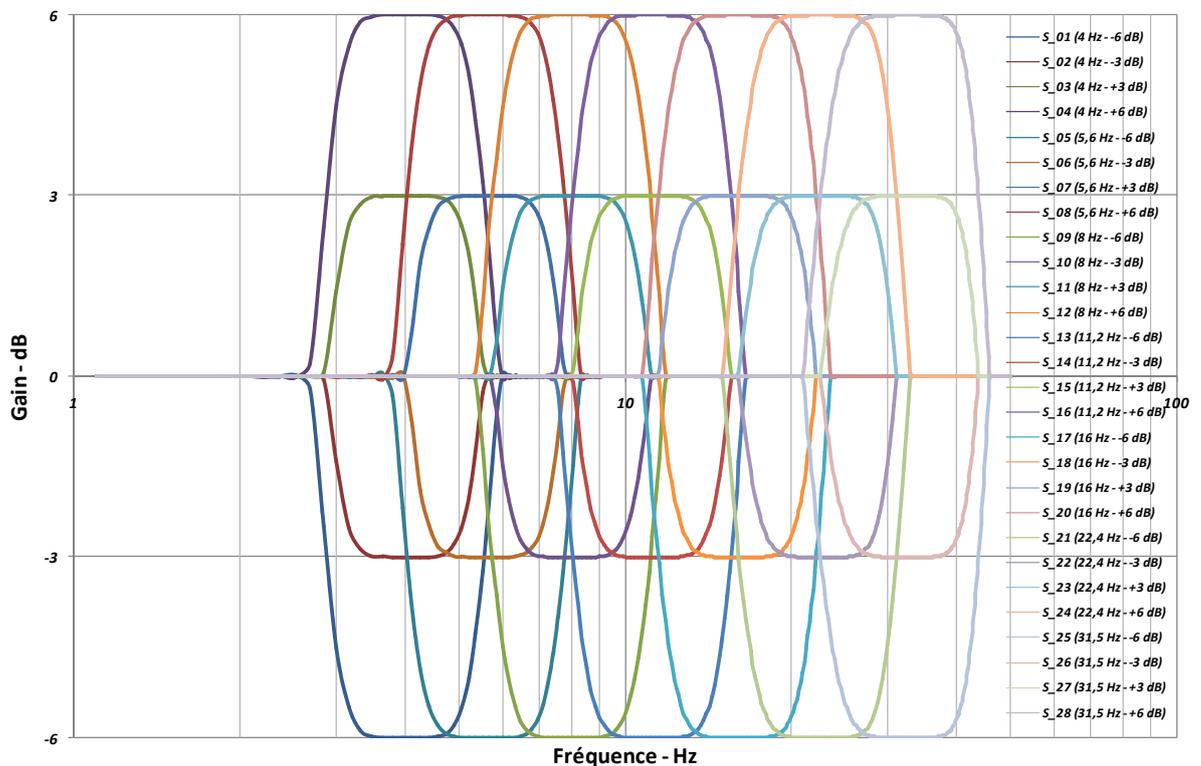


Figure 47 : Gabarits de filtres utilisés pour la synthèse des stimuli vibratoires

Les modifications appliquées aux signaux de référence induisent nécessairement une modification de leur niveau global. Les différences sont de 1,2 dB en moyenne et de 2,5 dB au maximum. Elles diminuent également à mesure que la fréquence centrale de la bande modifiée augmente, car le signal de référence contient moins d'énergie dans les fréquences les plus élevées. On suppose que les experts sont capables de s'affranchir de ce paramètre lors de leurs évaluations.

2.2 Protocole

Six experts sont recrutés pour participer à l'expérience (Tableau 31). Ils prennent place sur le banc et sont invités à adopter une posture identique à celle qu'ils prennent pour évaluer des véhicules réels. Ils doivent s'imaginer assis à l'intérieur d'un véritable véhicule, fenêtres fermées et air conditionné arrêté. Les stimuli vibratoires sont présentés aux experts en tant que signaux de synthèse sans qu'aucune explication sur leur nature ne soit dévoilée avant la fin de l'expérience.

Expert	Nom	Prénom
1	Xxxxx	Xxxxx
2	Xxxxx	Xxxxx
3	Xxxxx	Xxxxx
4	Xxxxx	Xxxxx
5	Xxxxx	Xxxxx
6	Xxxxx	Xxxxx

Tableau 31 : Liste des experts PSA Peugeot Citroën

Les experts sont soumis à une série de tests correspondant à différents critères d'évaluation. L'ordre de passage est alterné pour chaque expert. Chaque test fait intervenir les 28 stimuli vibratoires, accompagnés d'un même enregistrement sonore de véhicule (Chapitre 4 - Exp. 3 - V3 - $L_p = 84$ dB). L'ordre de présentation des stimuli est différent pour chacun des tests et est issu d'une répartition aléatoire. Le Tableau 32 présente les critères d'évaluations des stimuli :

Test	Echelle	Critère d'évaluation
I	E1	Xxxxx – Amplitude
	E2	Xxxxx – Occurrence
II	E3	Xxxxx – Amplitude
	E4	Xxxxx – Occurrence
III	E5	Xxxxx – Amplitude
	E6	Xxxxx – Occurrence
IV	E7	Xxxxx
V	E8	Niveau vibratoire

Tableau 32 : Critères d'évaluations des stimuli de synthèse par les experts

Toutes les évaluations s'effectuent par rapport à un signal de référence identique (tirage de bruit blanc filtré selon le gabarit médian - Figure 46). Même si le signal de référence est présenté visuellement dans la paire en seconde position, l'ordre de présentation reste libre. Les experts placent alors un curseur sur une échelle continue, graduée par des étiquettes suivantes :

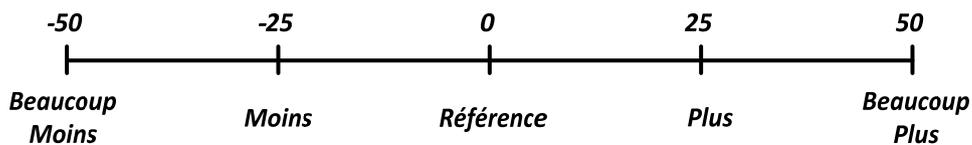


Figure 48 : Echelle d'évaluations présentée aux experts.

2.3 Résultats

Pour les 5 tests de cette épreuve perceptive, les évaluations sont réalisées selon 8 critères (E1-E8) par 6 experts. Les 28 stimuli de synthèse ainsi évalués correspondent aux modifications de 7 bandes de fréquences (F1-F7) par 4 amplifications différentes (G1-G4). Des analyses préliminaires s'avèrent nécessaires avant d'estimer précisément les influences des paramètres de synthèse sur les critères d'évaluations sélectionnés.

2.3.1 *Analyses préliminaires*

Les premières analyses s'attachent à évaluer le consensus parmi les experts ainsi que le niveau de discrimination des stimuli.

Pour chaque échelle de notation, une cartographie interne des évaluations des experts est réalisée (ACP où les stimuli représentent les individus, et les experts, les variables). La Figure 49 illustre les résultats de ces analyses et présente la répartition des experts selon les deux premiers axes de chacune des cartographies internes.

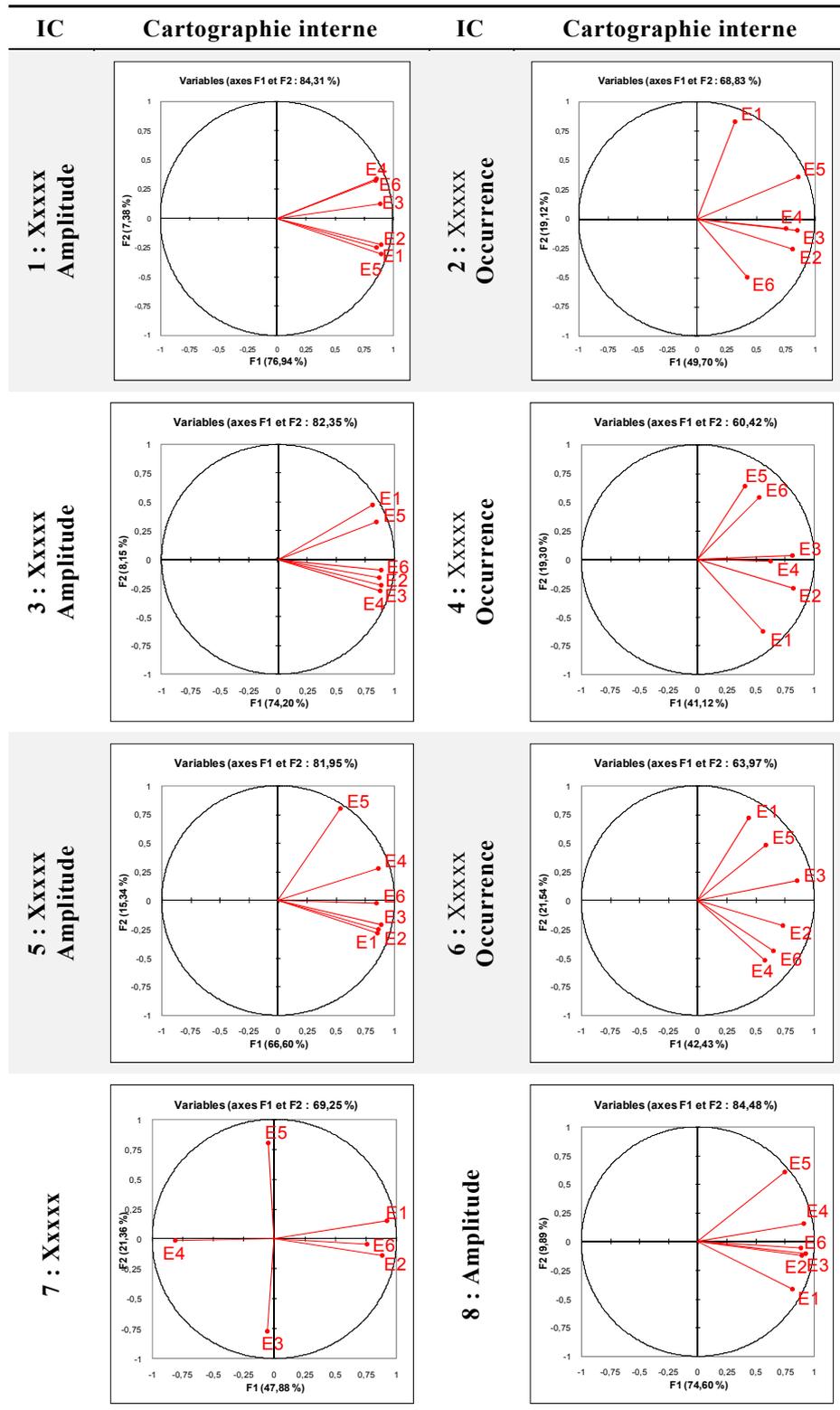


Figure 49 : Synthèse des cartographies internes des évaluations expertes

Le consensus parmi les experts varie fortement d'un critère d'évaluation à l'autre. Trois types d'échelles d'évaluations apparaissent clairement et se distinguent de la manière suivante :

- E1, E3, E5 et E8 : il s'agit d'échelles de notation liées à l'amplitude des différents critères. Les résultats de ces évaluations sont révélateurs d'un consensus très élevé et l'accord entre les experts ne varie quasiment pas d'une échelle à l'autre. En moyenne, l'inertie du premier axe est supérieure à 72% tandis que celle des autres axes ne dépasse pas les 8% ;
- E2, E4 et E6 : il s'agit d'échelles de notation liées à l'occurrence des différents critères. Le consensus dans les évaluations des experts est plus faible que pour les critères liés à l'amplitude. Pour ces échelles, l'inertie moyenne du premier axe est de 44%. Celles des axes 2 et 3 sont respectivement de 20 et de 14% ;
- E7 : il s'agit de l'échelle d'évaluation du « Xxxxx ». Les résultats divergent fortement d'un expert à l'autre. 3 experts sur 6 donnent ainsi des résultats totalement décorrélés les uns des autres.

Le degré de discrimination entre les stimuli est ensuite évalué à l'aide de tests de comparaison de moyenne (tests HSD – $p < 0,05$). Ces comparaisons sont effectuées en fonction des facteurs « Fréquence » et « Gain » pour chaque échelle de notation. Les tests permettent de répartir les véhicules en groupes à partir de comparaisons faites deux à deux (Tableau 33). De manière générale, la discrimination des gains (3,5 groupes sur 4 en moyenne) est plus importante que celles des fréquences (2,8 groupes sur 7 en moyenne). Enfin, la discrimination des gains est très élevée pour les échelles d'évaluations liées à l'amplitude (Echelles 1, 3, 5 et 8 : 4 groupes sur 4) alors qu'elle est plus faible pour les échelles liées à l'occurrence (échelles 2, 4 et 6 : 2,6 groupes en moyenne).

	Echelle	Gain	Fréquence
1	Xxxxx – Amplitude	4	3
2	Xxxxx – Occurrence	2	2
3	Xxxxx – Amplitude	4	3
4	Xxxxx – Occurrence	3	2
5	Xxxxx – Amplitude	4	3
6	Xxxxx – Occurrence	3	2
7	Xxxxx	4	2
8	Niveau vibratoire	4	3

Tableau 33 : Nombre de groupes de stimuli formés par les experts en fonction des facteurs « Gain » et « Fréquence »

Au final, l'étude du consensus et de la discrimination sur l'ensemble des résultats révèle la manière dont les experts évaluent les signaux selon les critères proposés.

S'agissant du Xxxxx (E1-E2), des Xxxxx (E3-E4), ou des Xxxxx (E5-E6), les critères d'évaluations proposés sont regroupés en 2 catégories, liées à l'amplitude et à l'occurrence. Ainsi, dès lors que le caractère d'amplitude des critères d'évaluation est considéré, les réponses des experts révèlent un consensus élevé et une grande discrimination des stimuli. Les évaluations liées à l'occurrence traduisent un consensus nettement plus faible. Il est accompagné d'une discrimination diminuée. A ce stade de l'étude, les échelles d'évaluations E1, E2, E3, E4, E5 et E6 peuvent être exploités de manière satisfaisante.

Seuls les résultats de l'évaluation du « toucher de route » ne sont pas satisfaisants (E7). Ils révèlent une grande divergence entre les évaluations des experts. Une cause probable d'un tel désaccord est le manque de contexte lié aux évaluations en simulateur. En effet, quelques experts affirment avoir été gênés par l'absence de certains éléments présents dans les véhicules (connaissance précise des conditions de circulation, vibration du volant, efforts dynamiques réinjectés dans le volant, etc.). Ces résultats ne sont donc pas exploités.

Pour finir, les évaluations du « niveau vibratoire » (E8) révèlent un très fort consensus et une très grande discrimination. S'il n'est pas d'une grande importance méthodologique pour cette expérience, ce dernier résultat est en accord avec les niveaux de consensus et de discrimination précédemment observés lors d'évaluations de confort de signaux vibratoires.

Avant d'estimer précisément les effets des paramètres de synthèse sur les évaluations de chacune des 7 échelles de cotations retenues à ce stade, les influences relatives de chacun des facteurs associés à la présentation des stimuli

doivent être décrites. Des ANOVA sont calculées sur les notes de chacune des échelles d'évaluations retenues. Les écarts statistiques des notes de confort associées aux 6 experts, aux 4 gains, et aux 7 bandes de fréquences sont comparés. Tous les effets des principaux facteurs ainsi que toutes leurs interactions d'ordre 1 sont à chaque fois inclus dans le modèle. Le facteur « Expert » est placé en aléatoire. Les résultats sont donc supposés indépendants de l'échantillon d'experts soumis aux évaluations.

Les résultats sont une nouvelle fois regroupés en deux catégories liées aux caractères « amplitude » et « occurrence » des critères d'évaluations :

- échelles E1, E3, E5 et E8 : Les ANOVA révèlent l'importance significative des facteurs « Gain » et « Fréquence », et de l'interaction du premier ordre « Gain x Fréquence ». L'effet « Expert » n'est pas significatif, sauf pour l'échelle E5 où le F_Ratio associé est très faible. Les effets des interactions « Expert x Gain » et « Expert x Fréquence » ne sont pas non plus significatifs. De plus, les F_ratio des facteurs indiquent que l'influence du facteur « Gain » est prépondérante alors que celle de la « Fréquence » ainsi que celle du « Gain x Fréquence » sont équivalentes ;
- échelles E2, E4 et E6 : Les effets du « Gain » et des interactions « Gain x Fréquence » et « Gain x Expert » sont significatifs alors qu'aucun des autres paramètres du modèle ne l'est. Enfin, les F_ratio montrent que tous les facteurs significatifs sont d'importance comparable.

Tous ces résultats d'analyses de variance sont à confronter aux consensus des experts et à la discrimination des stimuli. Les évaluations des critères associés aux échelles E1, E3, E5 et E8 font apparaître un très fort degré de consensus, une discrimination très élevée ainsi qu'un effet significatif des facteurs « Gain », « Fréquence ». Les experts évaluent donc correctement les signaux de synthèse selon ces critères, et ce de manière tout à fait satisfaisante.

A l'inverse, les évaluations des critères associés aux échelles E2, E4 et E6 font apparaître un consensus faible et une discrimination amoindrie par rapport aux autres échelles d'évaluations. De plus, le facteur « Fréquence » n'est pas significatif, contrairement à celui de l'interaction « Gain x Fréquence ». Dès cette étape de traitement, ces observations montrent que les évaluations des signaux de synthèse selon ces critères ne sont pas satisfaisantes. De tels résultats peuvent s'expliquer par le fait que les paramètres de synthèse ne sont pas adaptés à ces critères. Une analyse plus détaillée semble alors inutile : elle n'apporterait pas plus d'informations sur les critères d'évaluations étudiés.

2.3.2 Evaluations expertes et paramètres de synthèse

Les effets des paramètres de synthèse « Gain » et « Fréquence » des stimuli vibratoires sont étudiés en détail pour les évaluations des critères de « xxxx – Amplitude » (E1), « Xxxxx – Amplitude » (E3), « Xxxxx – Amplitude » (E5) et « Niveau vibratoire » (E8).

Dans un premier temps, les effets du « Gain » et de la « Fréquence » sur le consensus et sur la discrimination des stimuli sont examinés. Les analyses appropriées (CAH et tests de comparaison de moyenne) montrent que ces deux facteurs n'ont aucun effet notable sur le consensus ou sur la discrimination.

Les Figure 50 à Figure 53 présentent les résultats des évaluations de chacun des stimuli de synthèse. Chaque figure correspond à un des critères d'évaluation. Les résultats sont présentés sous forme de graphiques avec, en abscisse, les fréquences des bandes centrales modifiées (F1-F7), et, en ordonnée, les notes moyennes des six experts. Enfin, à chaque courbe correspond une valeur de gain (G1-G4).

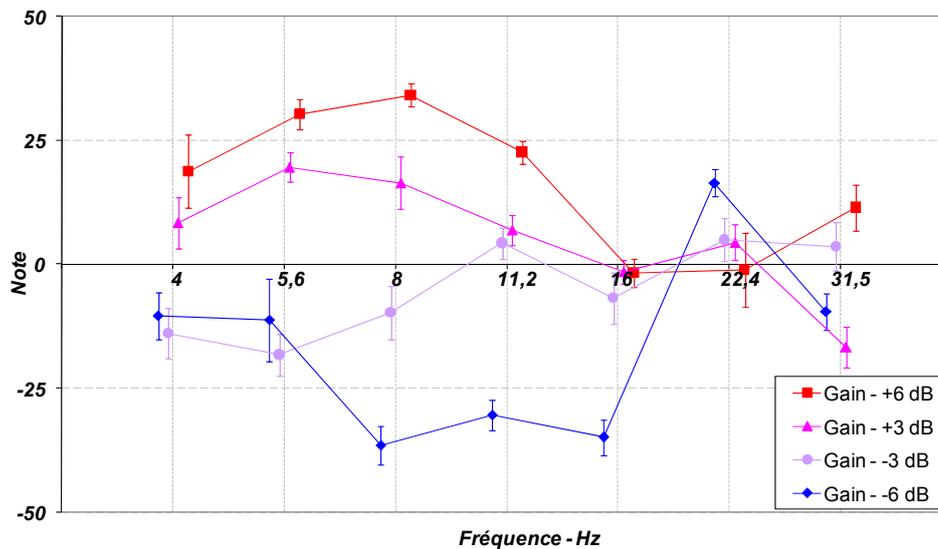


Figure 50 : Résultats des évaluations de « Xxxxx – Amplitude » (E1)

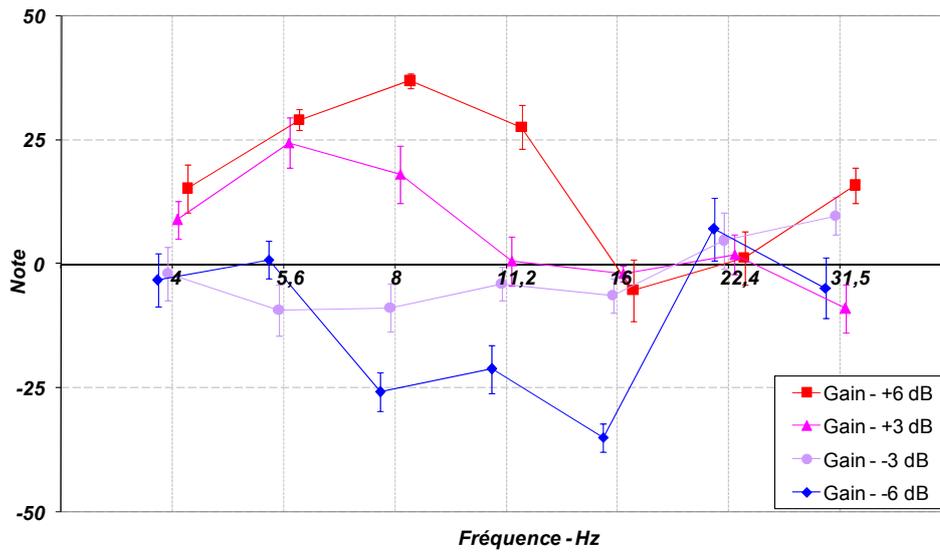


Figure 51 : Résultats des évaluations de « Xxxxx - Amplitude » (E3)

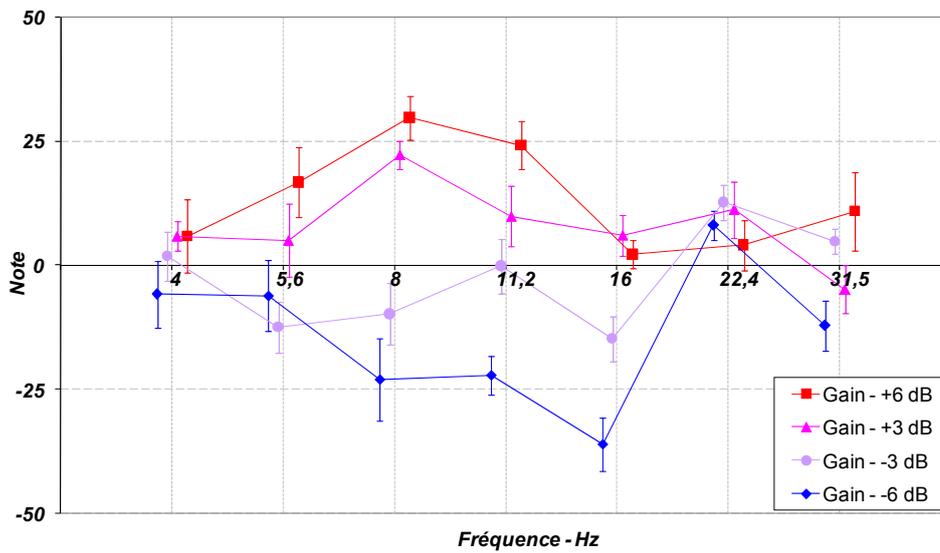


Figure 52 : Résultats des évaluations de « Xxxxx - Amplitude » (E5)

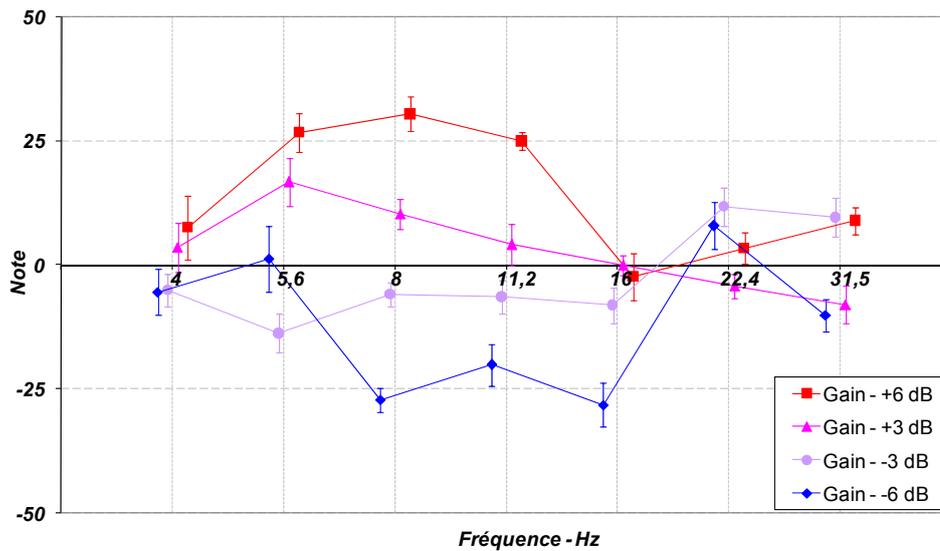


Figure 53 : Résultats des évaluations de « Niveau vibratoire » (E8)

Les résultats sont semblables pour les quatre critères d'évaluations. Tous confirment les effets révélés par les ANOVA : l'effet « Gain » est significatif, les effets de la fréquence et de l'interaction « Gain x Fréquence » le sont également.

Deux tendances très marquées se distinguent sur les quatre courbes présentées :

- de manière générale, l'effet du « Gain » domine très largement les évaluations pour des fréquences allant de 4 à 16 Hz. Les gains les plus élevés obtiennent alors systématiquement les notes moyennes les plus élevées (sauf E3: $G = -6 \text{ dB}$, $G = -3 \text{ dB}$) ;
- cette tendance très claire s'efface totalement pour les fréquences supérieures à 16 Hz. La majeure partie des niveaux n'est plus discriminée. Lorsqu'ils le sont, les notes les plus élevées ne correspondent pas systématiquement aux gains les plus grands (E1: $f = 22,4 \text{ Hz}$, $G = -6 \text{ dB}$, $G = +6 \text{ dB}$; E8: $f = 22,4 \text{ Hz}$, $G = -6 \text{ dB}$, $G = +3 \text{ dB}$).

Des tests de comparaison de moyenne (tests HSD – $p < 0,05$) sont ensuite réalisés pour estimer plus précisément les degrés de discrimination des facteurs « Gain » et « Fréquence » (Tableau 34 et Tableau 35). Les résultats mettent en évidence que la discrimination des gains est très élevée (2,4 groupes sur 4 en moyenne) alors que celle des fréquences est très faible (1,6 groupes sur 7 en moyenne). Cette différence s'accroît encore plus pour les fréquences comprises entre 4 et 16 Hz.

Critère d'évaluation	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
Xxxxx – Amplitude	2	3	4	3	2	2	2
Xxxxx – Amplitude	2	3	4	3	2	1	2
Xxxxx – Amplitude	1	1	3	3	3	1	2
Niveau Vibratoire	1	4	4	4	2	2	2

Tableau 34 : Discrimination du facteur « Gain » en fonction de la fréquence (nombre de groupes)

Critère d'évaluation	G1	G2	G3	G4
Xxxxx – Amplitude	1	2	1	3
Xxxxx – Amplitude	3	1	1	2
Xxxxx – Amplitude	1	2	2	1
Niveau Vibratoire	2	1	2	2

Tableau 35 : Discrimination du facteur « Fréquence » en fonction des gains (nombre de groupes)

La non-discrimination des gains pour les fréquences supérieures à 16 Hz peut s'expliquer par le fait que le signal de référence contient peu d'énergie au-dessus de 14 Hz, ainsi que par la chute de sensibilité du corps avec la fréquence (ISO-2631). Le rôle du siège est étudié dans la suite des analyses.

Cependant, les résultats ne traduisent aucune dépendance fréquentielle significative d'une échelle à l'autre. Cette constance entre les critères ne correspond pas au fort lien de leur définition avec le contenu spectral des vibrations.

Le rôle du niveau vibratoire est alors examiné en détail. Une ACP est calculée sur les résultats des différentes échelles d'évaluations (Figure 54). Les niveaux vibratoires des stimuli sont ajoutés au calcul en tant que données supplémentaires (niveau global L_a et niveau dans les bandes de tiers d'octave $L_{7,1Hz}$, $L_{11,2Hz}$, $L_{14,1Hz}$, $L_{17,9Hz}$, $L_{22,4Hz}$ et L_{28Hz}). Les corrélations entre les résultats des échelles E1, E3, E5 et E8 sont très élevées, ce qui signifie que les évaluations des experts sont similaires d'une échelle à l'autre. Tous ces résultats sont également fortement corrélés au niveau vibratoire des stimuli. Les positions relatives des indicateurs de niveau dans les bandes de fréquences montrent que leurs corrélations aux résultats d'évaluations diminuent à mesure que la fréquence augmente. Des analyses complémentaires de l'ensemble des autres indicateurs vibratoires rencontrés dans la littérature, ainsi que des niveaux vibratoires au niveau de l'assise (estimés à partir de la fonction de transfert du siège), n'apportent pas d'informations supplémentaires. Ce bilan

confirme que le niveau vibratoire global, mesuré au niveau de la glissière du siège, suffit à expliquer l'ensemble des évaluations des experts.

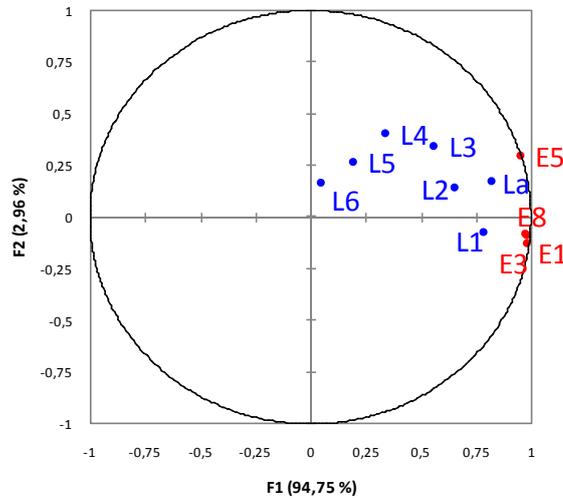


Figure 54 : Liens entre les critères d'évaluations et les niveaux vibratoires des stimuli

En conclusion, malgré le fort lien entre le contenu spectral des vibrations et les définitions des critères d'évaluations, leur dépendance fréquentielle n'apparaît pas du tout dans les évaluations des experts. Leurs appréciations semblent liées exclusivement aux différences de niveaux associées aux amplifications des bandes d'octaves, de fréquences centrales inférieures ou égales à 16 Hz. Malgré ce fait inattendu, les résultats de cette expérience permettent quand même de cibler précisément le domaine de fréquences pertinent pour les évaluations des critères d'évaluations.

3 Evaluations de confort de signaux de synthèse (Exp.6)

Pour mettre en relation les évaluations expertes avec le confort, un lien entre les paramètres des signaux de synthèse et les évaluations de confort effectuées par des sujets naïfs doit être mis en évidence. Une épreuve perceptive dans laquelle des sujets doivent indiquer leurs préférences en termes de confort est donc réalisée. Cette expérience met en jeu le même type de stimuli que lors des évaluations expertes : un signal de référence (gabarit médian) est modifié par amplifications de bandes de fréquences. L'étendue spectrale des modifications est limitée aux seules bandes de fréquences pertinentes vis-à-vis des critères d'évaluations précédents. Le protocole expérimental est également enrichi, autant que possible, par l'étude de l'interaction entre les bandes de fréquences modifiées.

3.1 Stimuli

Un bruit blanc filtré par un filtre passe-bas d'ordre 2 ($f_c = 14$ Hz) sert de base à la synthèse des signaux artificiels (Figure 46). Plusieurs tirages sont ainsi sélectionnés puis filtrés pour obtenir des signaux de contenus fréquentiels fidèles à ce gabarit. Le niveau global des signaux est de 100 dB et leur durée est de 3,5 secondes.

Le choix de raccourcir la durée des signaux est le fruit d'un compromis méthodologique entre une durée de test acceptable pour les sujets et un nombre de paramètres suffisant pour couvrir le domaine d'application de l'étude. Ce choix n'est pas sans conséquence et impose des conditions de sélection très strictes sur les tirages aléatoires. Etant donné le nombre limité de points que contient le signal aléatoire généré, il est indispensable de s'assurer que la distribution obtenue lors d'un tirage correspond bien au signal de référence souhaité. Le Tableau 36 présente les caractéristiques spectrales des tirages retenus. Les valeurs présentées sont des niveaux moyens mesurés sur 5000 tirages de bruits blancs d'une durée de 3,5 secondes, échantillonnés à $f_s = 158$ Hz. La sélection des tirages s'effectue selon ces critères en respectant une tolérance de $\pm 0,01$ dB sur le niveau global et de $\pm 0,2$ dB sur les niveaux de chaque bande.

	La	L1	L2	L3	L4
Bruit blanc	100,0	86,7	88,3	89,8	91,3
Bruit blanc filtré	100,0	93,7	94,8	95,0	93,9

Tableau 36 : Niveaux moyens dans les bandes de fréquences F1, F2, F3 et F4
(N=5000 tirages, $f_s=158$ Hz, durée = 3,5 s)

Le contenu fréquentiel de chacun des signaux de base est ensuite modifié par amplification de bandes de fréquences d'une octave de largeur. On utilise un jeu de filtres dont les gabarits sont conformes à la norme NF-61260 [NF 61260]. Seules quatre bandes de fréquences sont sélectionnées à partir des résultats de l'expérience précédente. Il s'agit des bandes pour lesquelles la discrimination des paramètres de synthèse par les experts est la plus élevée. Enfin, seules deux valeurs de gains sont retenues pour l'amplification : 0 dB et +6 dB. Le Tableau 37 récapitule les valeurs retenues pour les deux paramètres de synthèse.

Fréquence (Hz)		Gain (dB)	
F1	5,6	G1	0
F2	8	G2	+6
F3	11,2		
F4	16		

Tableau 37 : Paramètres utilisés pour la synthèse des stimuli vibratoires

Toutes les combinaisons des paramètres de synthèse sont retenues pour effectuer les modifications des signaux de référence (Tableau 38). Chaque gabarit est appliqué à un tirage différent de bruit blanc filtré. Au final, 16 signaux sont ainsi obtenus et présentés aux sujets lors de l'épreuve perceptive.

	F1	F2	F3	F4	Symbole		F1	F2	F3	F4	Symbole
S_01	G1	G1	G1	G1	_____	S_09	G2	G1	G1	G1	+___
S_02	G1	G1	G1	G2	___+	S_10	G2	G1	G1	G2	+__+
S_03	G1	G1	G2	G1	__+__	S_11	G2	G1	G2	G1	+_+__
S_04	G1	G1	G2	G2	__++	S_12	G2	G1	G2	G2	+_++
S_05	G1	G2	G1	G1	_+__	S_13	G2	G2	G1	G1	++__
S_06	G1	G2	G1	G2	_+__	S_14	G2	G2	G1	G2	++_+
S_07	G1	G2	G2	G1	_+++	S_15	G2	G2	G2	G1	+++__
S_08	G1	G2	G2	G2	_+++	S_16	G2	G2	G2	G2	++++

Tableau 38 : Paramètres de synthèse des stimuli vibratoires

Comme la largeur des bandes de fréquences modifiées est d'une octave, la répartition des fréquences centrales implique que deux bandes de fréquences voisines se recouvrent de moitié. L'utilisation d'un jeu de filtres d'octave, appliqués successivement lors de l'amplification de deux bandes voisines, devrait entraîner une augmentation d'amplitude de +12 dB dans les demi-octaves de recouvrement. Cette méthode de filtrage n'est pas retenue. Un filtre est créé pour chaque signal et l'amplification est maintenue constante à +6 dB sur tous les demi-octaves de recouvrement. La Figure 55 présente les gabarits utilisés pour la modification spectrale des signaux (les courbes sont translattées en abscisses et en ordonnées pour des raisons de lisibilité).

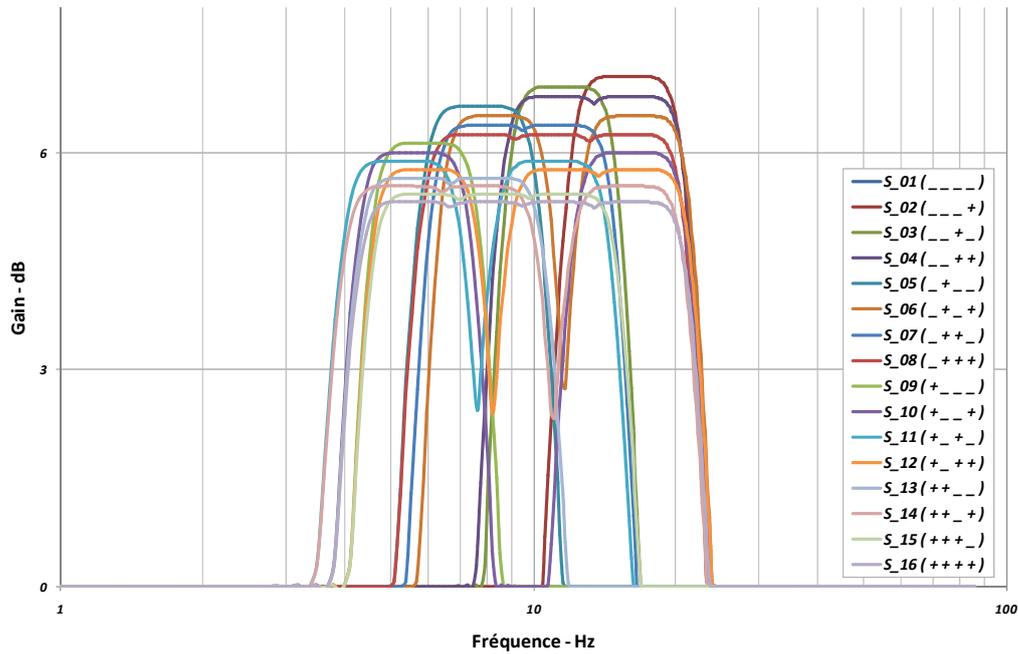


Figure 55 : Gabarits de filtres utilisés pour la synthèse des stimuli vibratoires

Toutes ces modifications induisent des modifications du niveau global des stimuli. Le tableau suivant présente les valeurs des principaux indicateurs calculés sur les signaux (Tableau 39). Ces différences sont de 4,8 dB au maximum de 1,3 dB en moyenne. Enfin, 80 paires de stimuli sur 120 présentent des différences de niveaux inférieures au seuil différentiel de perception (JNDL).

Signal	Symbole	L_a (dB)	VDV ($m/s^{1,75}$)	Signal	Symbole	L_a (dB)	VDV ($m/s^{1,75}$)
S_01	_____	100,0	0,182	S_09	+ _ _ _	102,1	0,232
S_02	___ +	102,3	0,231	S_10	+ _ _ +	103,6	0,272
S_03	_ _ + _	102,7	0,236	S_11	+ _ + _	104,0	0,288
S_04	_ _ + +	103,4	0,258	S_12	+ _ + +	104,6	0,296
S_05	_ + _ _	102,6	0,243	S_13	+ + _ _	103,6	0,264
S_06	_ + _ +	104,0	0,298	S_14	+ + _ +	104,6	0,302
S_07	_ + + _	103,6	0,269	S_15	+ + + _	104,2	0,298
S_08	_ + + +	104,3	0,300	S_16	+ + + +	104,8	0,312

Tableau 39 : Principales caractéristiques physiques des signaux de synthèse

3.2 Protocole

38 sujets naïfs (17 hommes et 21 femmes) sont recrutés et payés pour participer à l'expérience (Tableau 40). Ils sont tous en bonne santé et aucune condition particulière n'est exigée pour participer à l'expérience. Le protocole d'installation est identique à celui des expériences précédentes. Les sujets prennent place sur le banc et sont invités à adopter une posture d'assise confortable. Ils doivent s'imaginer assis à l'intérieur d'un véritable véhicule, fenêtres fermées et air conditionné arrêté. Aucune explication sur l'objectif de l'expérience ne leur est donnée.

Sujets	Moyenne	Ecart Type	Min	Max
Age (m)	34	6,1	19	47
Taille (m)	1,77	0,11	1,57	1,93
Poids (kg)	68,6	13	50	89
BMI (kg/m²)	22,3	4,3	16,1	31,4

Tableau 40 : Caractéristiques anthropométriques des sujets

Les 16 signaux vibratoires de synthèse sont présentés aux sujets en tant que vibrations enregistrées dans des véhicules circulant sur une route dégradée. La présentation de chacun de ces stimuli est accompagnée d'un échantillon sonore unique (Chapitre 4 – Exp. 3 - V3 - $L_p = 84 \text{ dB}$). Le système de restitution transaural est choisi pour la reproduction sonore.

Les sujets doivent réaliser un test de comparaison par paire des stimuli reproduits dans le simulateur. Deux stimuli vibratoires différents leur sont ainsi présentés successivement (la tâche est plus facile que d'évaluer séparément chacun des stimuli). Les sujets doivent indiquer lequel des deux est le plus confortable. Ils doivent obligatoirement choisir l'un des deux stimuli de la paire. Les réponses des sujets sont alors codées numériquement dans une matrice carrée (16 x 16) sous forme de valeurs binaires : 1 lorsque le stimulus de la ligne i est jugé plus confortable que celui de la colonne j , et 0 dans le cas contraire.

Les combinaisons des 16 stimuli vibratoires sont toutes évaluées. Les sujets comparent donc 120 paires de stimuli ($N.(N - 1)/2$). L'ordre de présentation est aléatoire. Chaque sujet est soumis à une série différente. Deux apparitions d'un même stimulus sont éloignées au maximum l'une de l'autre (séries de Ross). Dans chaque paire, un stimulus apparaît autant de fois en première qu'en deuxième position. Enfin, le test débute par trois exemples et ne

fait pas intervenir de répétition. Chaque stimulus peut être rejoué autant de fois que nécessaire. La durée totale de l'épreuve est d'environ 20 minutes.

3.3 Résultats

Les résultats de cette épreuve perceptive se composent de 38 matrices carrées « produits x produits » de 16 lignes, qui contiennent chacune les résultats des évaluations des 120 comparaisons effectuées par un sujet. Ces matrices sont représentatives de la manière dont chaque sujet effectue ses évaluations de confort. Elles sont donc directement utilisées pour l'examen détaillé des résultats du test. Des analyses préliminaires s'avèrent nécessaires préalablement à l'exploitation des résultats selon la problématique de l'expérience.

3.3.1 Analyses préliminaires

La première étape du traitement consiste à rechercher des catégories parmi les sujets. A partir des matrices de préférence individuelle, une valeur de préférence U_i , telle que la probabilité de préférence P_{ij} entre deux stimuli i et j soit $P_{ij} = U_i - U_j$, est attribuée à chaque stimulus. Ces 16 valeurs de U_i telles que $U_i = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i \neq j} P_{ij}$ sont alors représentatives de la préférence d'un sujet entre les stimuli. Une CAH (distance euclidienne – méthode de Ward) calculée sur les 38 jeux de valeurs ainsi obtenues ne fait apparaître aucune segmentation des sujets.

La précision des résultats de l'épreuve perceptive est ensuite estimée. Plusieurs estimateurs sont calculés :

- le nombre d'erreurs circulaires (ou triades) : celles-ci désignent les cas de non-transitivité dans une relation de préférence : le stimulus A est plus confortable que le stimulus B, le B plus confortable que le C, mais le C plus confortable que le A ;
- le coefficient de consistance ξ : cet indicateur permet de tester l'hypothèse nulle selon laquelle les réponses d'un sujet sont aléatoires. Il se calcule à partir du nombre d'erreurs circulaires. Ce coefficient est compris entre 0 et 1, la valeur 1 indiquant qu'un sujet n'a commis aucune erreur circulaire. Sa distribution suit approximativement une loi du χ^2 à $n - 1$ degrés de liberté.

Le nombre moyen de triades est de 63,2 sur un total de 520 permutations possibles et l'écart-type associé est de 24,1. La Figure 56 présente la répartition des effectifs en fonction du coefficient de consistance. Le taux moyen d'erreurs circulaires est important : $\bar{\xi} = 0,62$. L'écart type associé est de 0,15. Seuls 13 sujets sur 38 obtiennent une valeur de ξ supérieure à 0,7, valeur

généralement considérée comme le seuil de rejection [WEBE 99]. Ces résultats sont considérés comme révélateurs de la difficulté qu'ont les sujets à effectuer leur tâche mais ne remettent pas en question leur fiabilité. Ainsi, étant donné qu'aucun sujet n'a commis excessivement plus d'erreurs que les autres, aucun sujet n'est écarté de la suite des analyses.

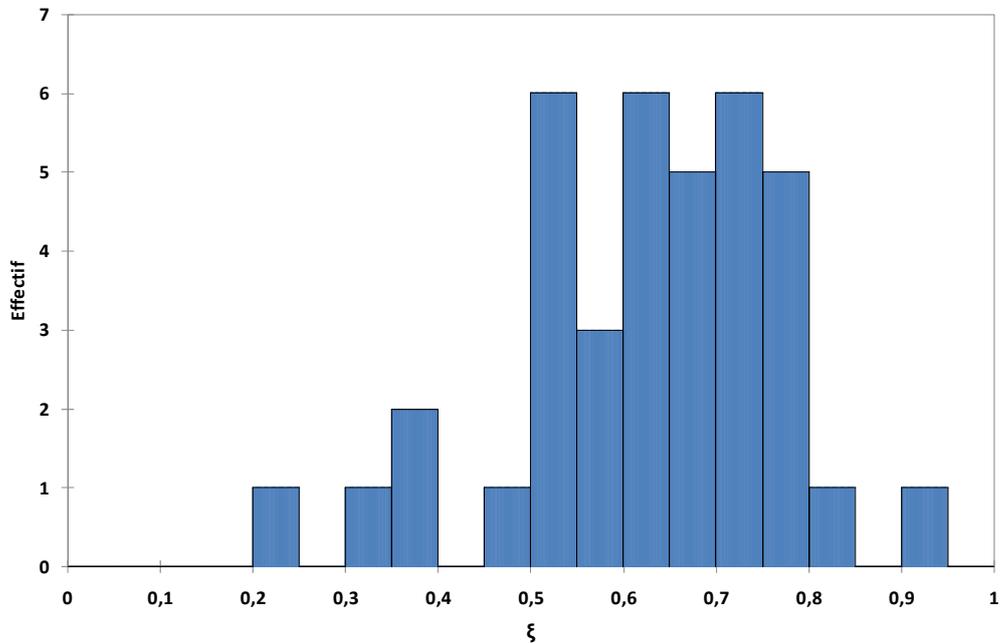


Figure 56 : Histogramme du coefficient de consistance

Le coefficient d'accord entre les sujets (coefficient of agreement) est ensuite calculé. Cet indicateur de consensus se base sur une sommation du nombre d'accords entre des paires de sujets. Il prend la valeur 1 lorsque l'accord est parfait et décroît avec le nombre de désaccords entre les sujets. Enfin, ce coefficient est indépendant du coefficient de consistance ξ : l'accord entre les sujets peut-être parfait même si de nombreuses erreurs circulaires sont présentes. Le manque d'accord n'implique pas non plus nécessairement l'existence d'erreurs circulaires. La valeur suivante est obtenue : $u = 0,351$. Un test statistique approprié montre que cette valeur est très faible. Le choix d'un protocole d'évaluation permettant de répondre que les deux stimuli d'une paire sont équivalents en confort augmenterait sans doute l'accord entre les sujets.

Ces analyses préliminaires sont complétées par une étude détaillée de la discrimination des stimuli. Le Tableau 41 présente la matrice de préférence (somme des matrices « produits x produits » individuelles). Les valeurs P_{ij} de cette matrice représentent le nombre de fois que le produit P_i (ligne) a été préféré au produit P_j (colonne). Les éléments présentés en rouge vérifient l'hypothèse statistique selon laquelle la préférence d'un stimulus n'est pas due

au hasard (loi binomiale, $p < 0,05 : P_{ij} \leq 12$ ou $P_{ij} \geq 26$). 37 comparaisons sur 120 ne sont pas discriminantes pour l'un ou pour l'autre des stimuli. La valeur très faible du coefficient d'accord peut s'expliquer ainsi.

Préférence	S_01 (_ _ _)	S_02 (_ _ +)	S_03 (_ + _)	S_04 (_ + +)	S_05 (+ _ _)	S_06 (+ _ +)	S_07 (+ + _)	S_08 (+ + +)	S_09 (+ _ _)	S_10 (+ _ +)	S_11 (+ + _)	S_12 (+ + +)	S_13 (+ + _)	S_14 (+ + +)	S_15 (+ + +)	S_16 (+ + +)
S_01 (_ _ _)	-	26	35	34	36	36	36	35	37	38	37	38	38	36	36	38
S_02 (_ _ +)	12	-	32	31	36	35	35	36	34	37	36	37	36	38	36	37
S_03 (_ + _)	3	6	-	14	29	33	30	27	29	24	26	36	32	38	33	35
S_04 (_ + +)	4	7	24	-	33	32	27	33	34	29	34	34	37	36	36	34
S_05 (+ _ _)	2	2	9	5	-	12	23	21	25	21	27	33	28	29	33	28
S_06 (+ _ +)	2	3	5	6	26	-	20	28	25	17	25	29	26	26	28	28
S_07 (+ + _)	2	3	8	11	15	18	-	23	20	16	22	27	29	28	34	32
S_08 (+ + +)	3	2	11	5	17	10	15	-	11	15	16	26	26	24	27	33
S_09 (+ _ _)	1	4	9	4	13	13	18	27	-	11	23	26	29	23	21	25
S_10 (+ _ +)	0	1	14	9	17	21	22	23	27	-	24	29	23	26	26	28
S_11 (+ + _)	1	2	12	4	11	13	16	22	15	14	-	24	20	20	21	24
S_12 (+ + +)	0	1	2	4	5	9	11	12	12	9	14	-	15	14	16	13
S_13 (+ + _)	0	2	6	1	10	12	9	12	9	15	18	23	-	22	19	26
S_14 (+ + +)	2	0	0	2	9	12	10	14	15	12	18	24	16	-	22	24
S_15 (+ + +)	2	2	5	2	5	10	4	11	17	12	17	22	19	16	-	16
S_16 (+ + +)	0	1	3	4	10	10	6	5	13	10	14	25	12	14	22	-

Tableau 41 : Matrice de préférence des évaluations de confort

En conclusion, ces résultats préliminaires renseignent sur les deux questions intimement liées que sont la fiabilité des évaluations et la discrimination des stimuli. Les analyses révèlent un nombre de triades moyen élevé ainsi qu'une moyenne de coefficient de consistance faible. Aucun sujet n'a commis beaucoup plus d'erreurs circulaires qu'un autre. Enfin, l'accord entre les sujets s'est révélé très faible. Ces résultats contrastent avec la très forte discrimination et le haut degré de consensus observés dans toutes les précédentes évaluations de confort (Chapitre 3). L'hypothèse avancée pour expliquer de telles observations est la difficulté du test : les paramètres et le protocole choisis entraînent la comparaison de stimuli très proches les uns des autres. Dès lors, la finesse des différences serait à l'origine du grand nombre de stimuli non-discriminés. Cependant, la précision des résultats et la discrimination demeurent satisfaisantes pour étudier le lien entre les caractéristiques des stimuli et les évaluations de confort.

3.3.2 Evaluations de confort et paramètres de synthèse

Dans un premier temps, la sensation rattachée aux comparaisons de confort des stimuli est identifiée. Si est avancée l’hypothèse d’un critère de préférence correspondant à un continuum perceptif unique qui ne varie pas au fur et à mesure des évaluations, la valeur de cette sensation peut être modélisée par la méthode de Bradley-Terry-Luce (BTL). Cette méthode consiste à calculer, à partir de la matrice de préférence, une probabilité de préférence de chaque stimulus par rapport aux autres ($P_{ij} = U_i / (U_i + U_j)$). Chaque probabilité est associée à une valeur de la sensation sur une échelle continue. La Figure 57 présente les résultats de cette analyse. Les stimuli préférés sont ceux les mieux discriminés les uns des autres et correspondent aux modifications dans les bandes de fréquences les plus élevées. Des tests statistiques ($p < 0,05$) montrent que 7 groupes de stimuli se distinguent sur cette échelle (Tableau 42).

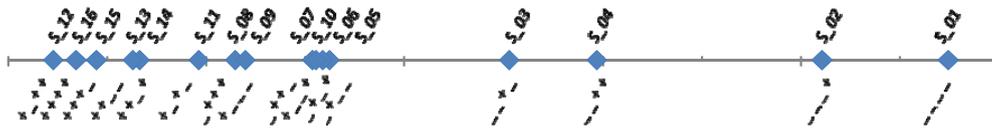


Figure 57: Modélisation de la préférence des stimuli (BTL)

Groupe	Stimuli
1	S_01 (_ _ _)
2	S_02 (_ _ +)
3	S_04 (_ _ + +)
4	S_03 (_ _ +)
5	S_05 (_ + _) S_06 (_ + _ +) S_10 (+ _ _ +) S_07 (_ + + _)
6	S_09 (+ _ _) S_08 (_ + + +) S_11 (+ _ +)
7	S_14 (+ + _ +) S_13 (+ + _) S_15 (+ + + _) S_16 (+ + + _) S_12 (+ _ + +)

Tableau 42 : Discrimination des stimuli (BTL)

A partir des résultats, la validité du modèle obtenu est testée par le calcul des valeurs des probabilités de préférence. La précision de la reconstruction montre que très peu d’informations sont perdues lors du processus de modélisation. L’approche du type BTL, selon laquelle un critère perceptif unique explique les évaluations, est donc bien adaptée à la description de la préférence. De plus, des résultats similaires sont de plus obtenus avec des méthodes de modélisation linéaire ($P_{ij} = U_i - U_j$) ou de Thurstone. Des approches multidimensionnelles plus complexes qui conduisent à la réalisation d’arbres de préférences ne s’avèrent pas nécessaires.

Enfin, les caractéristiques physiques qui permettent d'expliquer la préférence sont mises en évidence. La Figure 58 présente la variation de la préférence des stimuli en fonction du niveau vibratoire. La corrélation entre ces deux paramètres est forte. Comme dans les expériences précédentes (Chapitre 3, Chapitre 4), les différences de niveaux dominant encore les évaluations de confort. Toutefois, la corrélation est moins grande que précédemment car la méthodologie déployée donne une plus grande importance au contenu fréquentiel des signaux (protocole, variations fréquentielles, différences restreintes de niveaux). De nombreux signaux de niveaux vibratoires équivalents obtiennent des scores de préférence très éloignés (exemple : S_04 - S_07 - S_13, S_02 - S_05, etc.).

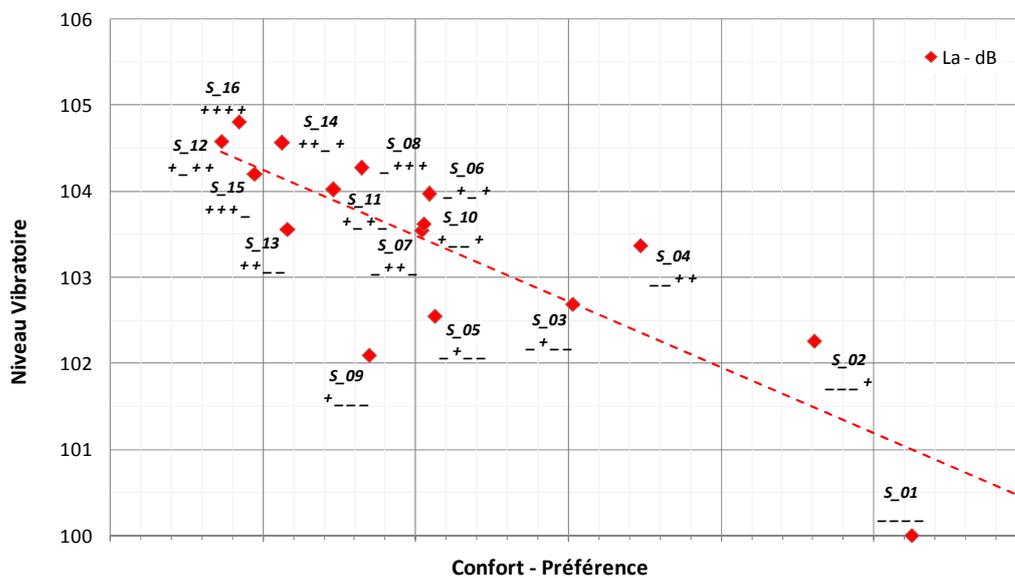


Figure 58 : Préférence et niveau vibratoire

L'influence des paramètres de synthèse sur les évaluations de confort est maintenant étudiée en détail. Pour cela, les différentes comparaisons sont analysées, une à une, en tenant compte des différences de niveaux entre chaque stimulus. Ainsi, la Figure 59 présente la variation de la préférence normée P_{ij} entre deux stimuli en fonction de leurs différences de niveau $\Delta L_{ij} = L_{ai} - L_{aj}$. Le plan est découpé en différentes zones à partir des valeurs de seuil différentiel de perception (JNDL = 1,5 dB) et des valeurs de P_{ij} critiques pour la discrimination (loi binomiale, $p < 0,05 : P_{ij} \leq 0,32$ ou $P_{ij} \geq 0,81$). Il est alors possible d'associer ces deux critères pour analyser l'ensemble des comparaisons faites par les sujets. L'espace est replié sur lui-même pour

améliorer la lisibilité. Ainsi, si $P_{ij} < 0,5$, alors $P_{ij} \rightarrow 1 - P_{ij}$ et $\Delta L_{ij} \rightarrow \text{abs}(\Delta L_{ij})$.

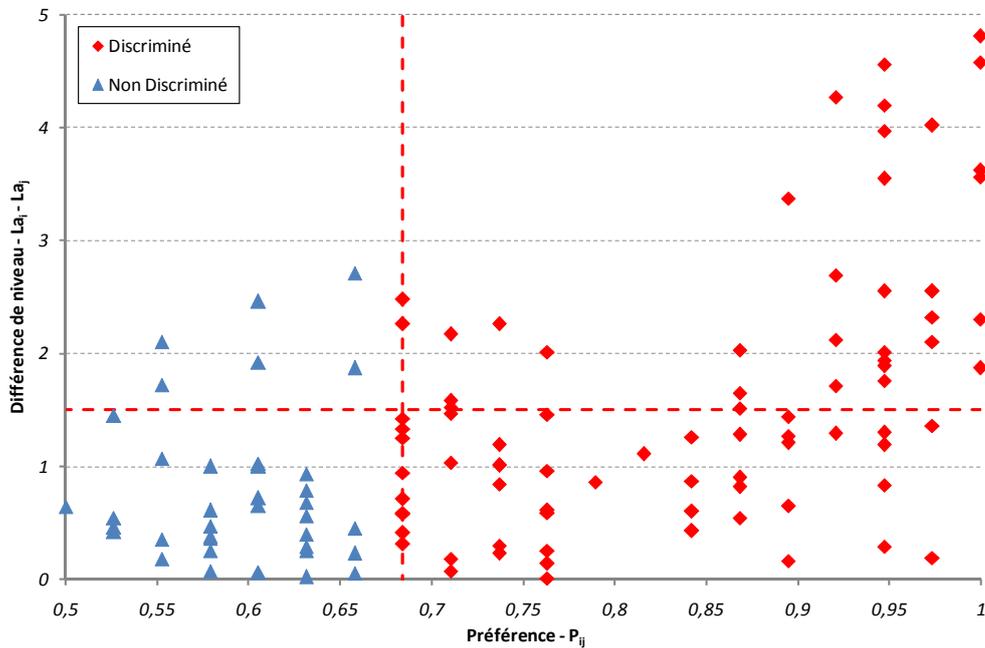


Figure 59 : Préférence et différence de niveau mesurée à la glissière

Lorsque leur différence de niveau est supérieure au seuil différentiel de perception, deux stimuli sont, dans la quasi-totalité des cas, discriminés (34 fois sur 40). Seules 6 paires de stimuli ne sont pas discriminées mais l'analyse de leurs paramètres de synthèse ne laisse apparaître aucun lien particulier entre les stimuli concernés (exemple : S_09 - S_15 et S_09 - S_16). La préférence s'oriente systématiquement vers le stimulus de niveau le plus faible. Toutes ces observations sont en accord, d'une part avec la grande discrimination observée précédemment entre des stimuli vibratoires de niveau différent (Chapitre 3), et d'autre part, avec la prépondérance du niveau dans les évaluations de confort (Chapitre 4).

Lorsque la différence de niveau est inférieure au seuil différentiel de perception, les nombres de paires de stimuli qui sont discriminés, ainsi que les nombres de paires qui ne le sont pas, sont plus équilibrés. Ainsi, 47 comparaisons statistiquement significatives sont dénombrées contre 33 non discriminantes. Certaines tendances se dégagent de l'analyse détaillée des paramètres de synthèse des signaux discriminés :

- l'amplification des différentes bandes d'octaves entraîne une orientation de la préférence vers les signaux possédant le moins de basses fréquences ($S_{02} > S_{03} > S_{05}$) (Tableau 43). Cette tendance est très nette, même si la discrimination est moins bonne

en basse fréquence (S_05 – S_09). Cette tendance se vérifie également pour des bandes de fréquences de largeur égale à 1,5 octave (S_04 > S_07 > S_13) et à 2 octaves (S_08 > S_15) ;

Préf.	S_02 (___+)	S_03 (__+)	S_05 (_+)	S_09 (+)	ΔL_a (dB)	S_02 (___+)	S_03 (__+)	S_05 (_+)	S_09 (+)
S_02 (___+)	-	32	36	34	S_02 (___+)	0	-0,4	-0,3	0,2
S_03 (__+)	6	-	29	29	S_03 (__+)	0,4	0	0,1	0,6
S_05 (_+)	2	9	-	25	S_05 (_+)	0,3	-0,1	0	0,5
S_09 (+)	4	9	13	-	S_09 (+)	-0,2	-0,6	-0,5	0

Tableau 43 : Extrait de la matrice de préférence accompagné des différences de niveaux correspondantes

- l'amplification simultanée de bandes de fréquences voisines ne fait pas apparaître de tendance aussi marquée. Si certaines comparaisons montrent qu'à niveaux équivalents ($\Delta L \leq JNDL$) le confort décroît nettement à mesure que le contenu basses fréquences augmente (S_02 > S_04 > S_08 > S_16) (Tableau 44), d'autres montrent à l'inverse que les signaux les moins riches en hautes fréquences (S_09 > S_13 > S_16) sont préférés. Dans ce cas, le nombre de comparaisons pertinentes est toutefois diminué par les différences de niveaux élevées entre les stimuli ; certaines sont supérieures au seuil (S_09 - S_15 et S_09 - S_16).

Préf.	S_02 (___+)	S_04 (__++)	S_08 (_+++)	S_16 (++++)	ΔL_a (dB)	S_02 (___+)	S_04 (__++)	S_08 (_+++)	S_16 (++++)
S_02 (___+)	-	31	36	37	S_02 (___+)	0	-1,1	-2,1	-2,5
S_04 (__++)	7	-	33	34	S_04 (__++)	1,1	0	-0,9	-1,4
S_08 (_+++)	2	5	-	33	S_08 (_+++)	2,1	0,9	0	-0,5
S_16 (++++)	1	4	5	-	S_16 (++++)	2,5	1,4	0,5	0

Tableau 44 : Extrait de la matrice de préférence accompagné des différences de niveaux correspondantes

Enfin, d'autres comparaisons de stimuli de niveaux équivalents révèlent des interactions significatives entre les bandes de fréquences ($S_{06} > S_{12}$, $S_{06} > S_{14}$, $S_{10} > S_{12}$, $S_{10} > S_{14}$) (Tableau 45). Aucun lien particulier n'apparaît entre les stimuli concernés. Ainsi, la seule tendance claire qui se dégage des résultats est qu'à niveaux équivalents et entre 5,6 et 16 Hz, les fréquences les plus basses amoindrissent systématiquement le confort, indépendamment de la bande de fréquences concernée ou de sa largeur. Ces affirmations découlent de l'hypothèse selon laquelle les différences de niveaux vibratoires, inférieures au seuil différentiel de 1,5 dB, ne sont pas à l'origine de la préférence d'un stimulus en termes de confort. Ces résultats doivent donc être nuancés par le fait que cette valeur de seuil n'est pas mesurée dans des conditions expérimentales strictement identiques à celles de l'épreuve perceptive (dispositif, protocole, stimuli). La préférence s'oriente ainsi majoritairement en fonction du niveau pour les comparaisons faisant intervenir des ΔL très proches du seuil ($S_{02} > S_{04} > S_{08} > S_{16}$ et $S_{09} > S_{13} > S_{16}$). En toute rigueur, il serait préférable d'effectuer une mesure de seuils dans des conditions identiques à cette épreuve.

Préf.	S_06 (_-+_)	S_10 (+_-+)	S_11 (+_-+)	S_12 (+_-+)	S_14 (++_-)	ΔL_a (dB)	S_06 (_-+_)	S_10 (+_-+)	S_11 (+_-+)	S_12 (+_-+)	S_14 (++_-)
S_06 (_-+_)	-	17	25	29	26	S_06 (_-+_)	0	0,3	-0,1	-0,6	-0,6
S_10 (+_-+)	21	-	24	29	26	S_10 (+_-+)	-0,3	0	-0,4	-1	-0,9
S_11 (+_-+)	13	14	-	24	20	S_11 (+_-+)	0,1	0,4	0	-0,6	-0,5
S_12 (+_-+)	9	9	14	-	14	S_12 (+_-+)	0,6	1	0,6	0	0
S_14 (++_-)	12	12	18	24	-	S_14 (++_-)	0,6	0,9	0,5	0	0

Tableau 45 : Extrait de la matrice de préférence accompagné des différences de niveau correspondantes

Enfin, le rôle du siège dans l'ensemble de ces évaluations doit être pris en compte. Pour cela, les niveaux vibratoires de l'assise sont estimés à partir de la fonction de transfert du siège (Chapitre 2 - Figure 22). Le même type d'analyse est effectué qu'avec les mesures à la glissière. De par le filtrage conséquent qu'introduit le siège pour les fréquences les plus élevées, la répartition de la préférence des stimuli en fonction de leurs différences de niveau change par rapport à celle obtenue précédemment (Figure 60). Une nouvelle fois, des analyses détaillées de chacune des comparaisons révèlent qu'à niveau global équivalent, les basses fréquences réduisent le confort, même

si la tendance observée est moins marquée que pour les mesures à la glissière. En conséquence, la préférence des hautes fréquences ne semble pas provenir du comportement dynamique du siège.

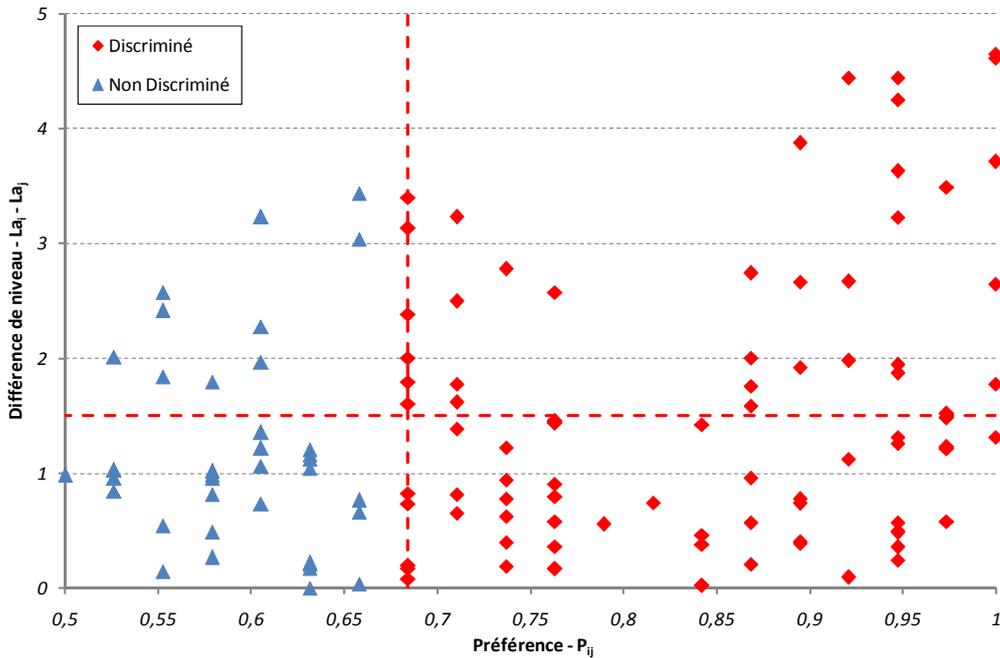


Figure 60 : Préférence et différence de niveau estimée au niveau de l’assise

4 Conclusion

Ces deux expériences complémentaires visent à établir le lien entre les items de cotations liés aux prestations de confort vibro-acoustique et les évaluations de confort des sujets. Pour cela, des stimuli artificiels, proches de ceux rencontrés dans les véhicules, sont présentés à des experts ainsi qu’à des sujets naïfs.

Les évaluations de la première expérience permettent d’écarter quatre items de cotations et d’en identifier trois autres pertinents vis-à-vis des paramètres de synthèse choisis (« E1 : Xxxxx – amplitude », « E3 : Xxxxx – amplitude » et « E5 : Xxxxx – amplitude »). Même si la dépendance fréquentielle attendue pour chacun de ces items de cotations n’est pas mise en évidence, les résultats aboutissent à la restriction du champ d’investigations aux bandes d’octaves de fréquences centrales inférieures à 16 Hz.

La deuxième expérience met en évidence l’influence des paramètres fréquentiels utilisés. Ainsi, à niveau vibratoire équivalent et entre 5,6 et 16 Hz, les fréquences les plus basses amoindrissent systématiquement le confort indépendamment de la bande de fréquence concernée ou de sa largeur.

En conclusion, à travers cette comparaison d'évaluations expertes et naïves, si les liens entre les items de cotation, le confort et les paramètres de synthèse des stimuli ne sont pas complètement établis, ces expériences identifient, sans nul doute, le domaine de fréquences le plus pertinent pour le confort vibratoire (5 -16 Hz) et la réelle tendance des sujets à préférer les hautes fréquences à niveau équivalent.

Partie 6

Conclusion

6

CONCLUSION

1	Synthèse	183
2	Perspectives	186

VI Conclusion

Le confort de roulage est une préoccupation majeure pour l'industrie automobile. Aussi s'efforce-t-elle d'optimiser les caractéristiques des véhicules pour répondre aux exigences accrues des consommateurs en matière de confort, et d'intégrer leurs attentes dès les premières étapes de la conception d'un véhicule.

Cette problématique demande d'importants moyens de mesure et de simulation qui permettent la reproduction fidèle des sollicitations d'un habitacle automobile. Les paramètres de l'environnement simulé les plus pertinents pour le confort sont identifiés par l'étude d'évaluations effectuées par des sujets naïfs soumis à des stimuli artificiels dont les caractéristiques varient de manière systématique.

Les principaux résultats de cette étude sont rappelés ci-dessous. Enfin, des perspectives qui doivent conduire à une meilleure compréhension du confort de roulage à basse vitesse sont également envisagées.

1 Synthèse

Par définition, la réalisation d'expériences en milieu artificiel place le sujet dans un environnement différent de celui d'une situation réelle. Dans ces conditions, il est indispensable de mesurer l'influence de cet environnement simulé sur les évaluations.

La première expérience du travail de recherche étudie l'influence du degré d'immersion et de contextualisation liés aux modalités vibratoires, acoustiques et visuelles sur les évaluations de confort de roulage en simulateur. Pour cela, des sujets sont exposés à différentes combinaisons de bruits, de vibrations et d'images de la route.

Parmi les trois associations de modalités présentées, le niveau des vibrations s'avère primordial pour l'évaluation du confort global. Des interactions entre les modalités sonores et vibratoires sont mises en évidence, mais leurs influences restent faibles et aucune tendance générale ne se dessine. L'association supplémentaire de la modalité visuelle aux modalités vibratoires et acoustiques entraîne une légère translation de l'échelle de notation ainsi qu'une faible augmentation de la discrimination des véhicules.

La deuxième expérience mesure l'influence du type de contexte visuel associé à des stimuli vibro-acoustiques. Pour cela, des enregistrements acoustiques et vibratoires sont associés à des visuels très variés qui modifient l'attente du sujet vis-à-vis de la situation.

L'association de différents contextes visuels à des stimuli vibro-acoustiques, si opposés soient-ils, n'influence pas vraiment les évaluations de confort chez les sujets. À cette nouvelle association ne correspond qu'une très légère augmentation ou diminution du confort global, significative que pour une minorité de véhicules. À nouveau, les effets de la modalité visuelle sont très faibles.

Le caractère méthodologique de ces deux expériences, menées sur des signaux réels, permet d'une part d'optimiser la restitution en simulateur et montrent que l'on peut s'affranchir de la restitution visuelle, ce qui simplifie considérablement le dispositif expérimental à mettre en place. D'autre part, elles traduisent le rôle prépondérant du niveau vibratoire dans les évaluations de confort vibro-acoustique global et révèlent une très forte discrimination des véhicules, indépendamment des conditions de circulations testées.

Les contributions relatives des niveaux sonores et vibratoires au confort automobile sont ensuite modélisées. L'existence d'une image perceptive du confort vibratoire des véhicules est également recherchée.

Dans la troisième expérience, des signaux acoustiques et vibratoires mesurés dans des véhicules, et modifiés en niveaux, sont évalués en termes de confort par des sujets naïfs. Un modèle de confort vibro-acoustique automobile permet alors de prédire les évaluations en fonction des niveaux vibratoires et sonores mesurés dans un habitacle automobile.

Les résultats montrent que les contributions des niveaux vibratoires et sonores se combinent de façon linéaire pour diminuer le confort. Le rôle prépondérant du niveau vibratoire apparaît à nouveau. Le rôle du niveau sonore s'avère également significatif, mais de moindre importance (la contribution du son est environ deux fois moins importante que celle des vibrations). Enfin, une interaction, très faible mais tout de même significative, apparaît entre ces deux paramètres.

La quatrième expérience détermine, pour des conditions de circulation différentes ainsi que pour des véhicules différents, si la sensation du passager varie ou reste relativement constante. L'épreuve perceptive consiste en un test de classement des vibrations mesurées dans plusieurs véhicules en circulation sur des routes différentes, puis égalisées en niveau avant d'être restituées dans le simulateur.

Les résultats montrent que la sensation éprouvée par les sujets dépend essentiellement de l'excitation (la route), et non du système excité (la voiture).

Ces résultats s'opposent aux précédentes observations faites sur des signaux de niveaux réels. Ainsi, à niveau vibratoire équivalent, les sensations des sujets varient pour des conditions différentes de circulation, alors qu'elles ne varient pas en fonction du véhicule. De plus, une analyse approfondie des propriétés physiques des stimuli montre que la segmentation est étroitement liée aux profils basses fréquences de l'enveloppe temporelle des stimuli.

Ces deux expériences affinent la connaissance des paramètres qui influent sur les évaluations en simulateur. Le modèle obtenu permet de prédire avec robustesse les contributions relatives des niveaux vibratoires et sonores aux évaluations de confort vibro-acoustique en simulateur. Si le domaine d'application des résultats doit se limiter aux conditions expérimentales testées, les contributions aux évaluations de confort des niveaux vibratoires et sonores sont dorénavant établies. Enfin, dans la quatrième expérience, les informations qui permettent aux sujets de discriminer les véhicules sont atténuées par l'égalisation en niveau. Les sujets sont alors plus sensibles aux différences liées aux conditions de roulage. Les sujets ont donc la capacité de distinguer et surtout d'identifier la source du résonateur vibratoire.

Pour finir, des évaluations expertes d'items de cotation des véhicules sont comparées à des évaluations de confort faites par des sujets naïfs. Pour cela, deux expériences perceptives qui font intervenir des stimuli artificiels sont mises en place.

La cinquième expérience est une épreuve perceptive d'évaluations expertes de stimuli vibratoires. Elle consiste à faire évaluer des signaux artificiels par des experts en charge d'évaluations de prestations de véhicules. Ces signaux sont évalués selon les principaux items utilisés pour décrire les vibrations automobiles. Le lien entre les paramètres de synthèse et les évaluations est établi.

Ces évaluations permettent d'écarter quatre items de cotations et d'en identifier trois autres pertinents vis-à-vis des paramètres de synthèse choisis (« Xxxxx – amplitude », « Xxxxx – amplitude » et « Xxxxx – amplitude »). Même si la dépendance fréquentielle attendue pour chacun de ces items de cotations n'est pas mise en évidence, les résultats aboutissent à la restriction du champ d'investigations aux bandes d'octaves de fréquences centrales inférieures à 16 Hz.

Ensuite les évaluations de confort de stimuli vibratoires de synthèse sont recherchées : des sujets naïfs sont exposés à des signaux artificiels dont la

composition est inspirée des résultats des évaluations expertes. L'analyse de ces données permet, d'une part de déterminer objectivement les liens entre le confort et les paramètres de synthèse utilisés, et d'autre part d'identifier les items de cotation les plus pertinents pour le confort.

Cette dernière expérience met en évidence l'influence des paramètres fréquentiels utilisés. Ainsi, à niveau vibratoire équivalent et entre 5,6 et 16 Hz, les fréquences les plus basses amoindrissent systématiquement le confort, indépendamment de la bande de fréquence concernée ou de sa largeur.

Ces deux expériences complémentaires établissent le lien entre les items de cotations liés aux prestations de confort vibro-acoustique et les évaluations de confort des sujets. À travers cette comparaison d'évaluations expertes et naïves, ces expériences identifient le domaine de fréquences le plus pertinent pour le confort vibratoire et la réelle tendance des sujets à préférer les hautes fréquences à niveau équivalent.

2 Perspectives

Des tests en situation réelle seraient utiles pour confronter les résultats des expériences menées en simulateur. Des sujets naïfs et des experts pourraient ainsi procéder à des évaluations de confort de véhicules réels en circulation sur des routes spécifiques, selon un protocole très précis. Ce dernier, reproduit à l'identique en simulateur, permettrait alors de comparer avec précision les évaluations en véhicule réel aux évaluations en simulateur. Une telle expérience, difficile à mettre en place d'un point de vue expérimental, permettrait de prédire avec robustesse les effets du passage de la réalité à la simulation.

Enfin, les définitions des items de cotations des prestations véhicules liées au confort vibro-acoustique ont été formalisées de manière empirique à partir du ressenti des experts en charge des évaluations. Mais, seule une minorité de ces items s'avère utile pour le confort. Dans ces conditions, l'utilisation d'une démarche d'analyse sensorielle pour définir de nouveaux items de cotation plus pertinents pour le confort constituerait une piste d'amélioration très nette de la procédure d'évaluation des prestations de confort automobile.

Bibliographie

Bibliographie

- AMMA 05** *S. Amman, R. Meier, T. Mouch and P. Gu*, "A survey of sound and vibration interaction", *SAE Noise and Vibration conference and exhibition*, 2005.
- AMMA 07** *S. Amman, T. Mouch and R. Meier*, "Sound and vibration perceptual contributions during vehicle transient and steady-state road inputs", *Int. J. Vehicle Noise and Vibration*, Vol. 3, No. 2, 2007.
- BELL 02** *M. A. Bellmann*, "Perception of whole-body vibrations: From basic experiments to effects of seat and steering-wheel vibrations on the passenger's comfort inside vehicles", *Oldenburg University*, 2002.
- BENS 81** *A. J. Benson and S. Dilnot*, "Perception of whole-body linear oscillation", *Proceedings of the UK informal group meeting on human response to vibration*, Edimburgh, 1981.
- BENS 89** *A. J. Benson*, "Thresholds for the perception of whole body angular movement about a vertical axis", *Aviation space and environmental medecine*, 1989.
- BENS 90** *A. J. Benson*, "Sensory functions and limitations of the vestibular system (Chap. 8) - in The perception and control of self-motion", *Ed. R. Warren and A. H. Wertheim*, Hillsdale, 1990.
- BERT 03** *P. Bertelson*, "Temporal ventriloquism: crossmodal interaction on the time dimension. Evidence from auditory-visual temporal order judgment", *Int. Journal of Phychophysiology*, Vol. 50, pp 147-155, 2003.
- BERT 66** *A. Berthoz*, "Etude biomécanique des vibrations de basses fréquences subies par l'homme", *Thèse de doctorat, Université de Paris*, 1966.

Bibliographie

- BESL 07** *J. Besle*, "Interactions audiovisuelles dans le cortex auditif chez l'homme", *Thèse de doctorat, Université de Lyon 2*, 2007.
- BEZA 07** *M.C. Bézat*, "Perception de bruits d'impact. Application au bruit de fermeture de porte automobile", *Thèse de doctorat, Université de Provence - Aix-Marseille*, 2007.
- BUSE 82** *P. Buser et M. Imbert*, "Neurophysiologie fonctionnelle", *Hermann*, 1982.
- CHIE 62** *A. Chiesa and L. Oberto*, "Car tire and body vibration", *Automobil. Engin.*, pp501-506, 1962.
- CHIE 64** *A. Chiesa and L. Oberto*, "Comportement vibratoire d'un véhicule automobile", *Bulletin de novembre du laboratoire des caoutchoucs et des Ets Pirelli, Milan*, 1964.
- CITR 91** *Citroën*, "Les phénomènes vibratoires en automobile", *Publication interne*, 1991.
- CLAR 75** *M.J. Clarke and D. J. Osborne*, "Techniques for obtaining subjective response to vertical vibration", *NASA Ride quality symposium*, pp437-470, *Williamsburg Virginia*, 1975.
- COUR 07** *T. Couronne*, "De la prise d'information visuelle à la formation d'impressions: apports de l'oculométrie pour l'étude des processus de la perception et de la cognition visuelle des objets manufacturés", *Thèse de doctorat, Université de Grenoble 1*, 2007.
- CRAN 63** *H. S. Crandall and W. D. Mark*, "Random vibration in mechanical systems", *Academic Press, New York*, 1963.
- DELO 03** *A. Delorme et M. Flückiger*, "Perception et réalité : une introduction à la psychologie des perceptions", *Ed. De Boeck*, 2003.
- DEMP 76** *T. K. Dempsey and J. D. Leatherwood*, "Prediction of passenger ride quality in a multifactor environment", *Nasa technical memorandum*, 1976.
- DEMP 79** *T. K. Dempsey, J. D. Leatherwood, and S. A. Clevenson*, "Development of noise and vibration ride confort criteria", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 65(1), 1979.
- DENN 01** *L. Denninger*, "Analyse biomécanique des interactions homme siège en environnement automobile : modélisation par éléments finis du corps humain soumis à des vibrations verticales", *Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Paris*, 2001.

Bibliographie

- DRIV 00** *J. Driver, C. Spence*, "Multisensory perception: beyond modularity and convergence", *Current Biology*, Vol. 10, 2000.
- EBE 00** *K. Ebe and M. J. Griffin*, "Quantitative prediction of overall seat discomfort", *Ergonomics*, Vol. 43, No. 6, pp791-806, 2000.
- ELLE 06** *W. Ellermeier and S. V. Legarth*, "Visual bias in subjective assessments of automotive sounds", *Proceedings of Euronoise, Tampere Finland*, 2006.
- GELF 98** *S. A. Gelfand*, "Hearing - An introduction to psychological and physiological acoustics", *third edition, Marcel Dekker Inc., New York - Basel*, 1998.
- GENU 07** *K. Genuit and A. Fiebig*, "The influence of combined environmental stimuli on the evaluation of acoustical comfort: case studies carried out in an interactive simulation environment", *Int. J. Vehicle Noise and Vibration*, Vol. 3, No 2, 2007.
- GESC 90** *G. A. Gescheider*, "Vibrotactile intensity discrimination measured by three methods", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 87(1), 1990.
- GESC 96** *G. A. Gescheider*, "Effects of stimulus duration on the amplitude difference limen for vibroaction", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 100(4), Pt. 1, 1996.
- GIBS 66** *J.J. Gibson*, "The senses considered as perceptual systems", *Houghton Mifflin, Boston*, 1966.
- GORR 57** *R. B. Gorrill and F. W. Snyder*, "Preliminary study of aircrew tolerance to low frequency vertical vibration", *Technical report, Boeing Airplane Company, United States of America*, 1957.
- GRIB 78** *A. Gribenski*, "Interactions sensorielles : audition et vision", *Journal de psychologie*, Vol. 2, 1978.
- GRIF 96** *M. J. Griffin*, "Handbook of human vibration", *Academic Press*, 1996.
- GUND 78** *A. J. Gundry*, "Thresholds of perception for periodic linear motion", *Aviation Space and Environmental Medicine*, 1978.
- GUYO 97** *F. Guyot*, "Catégorisation et cognition : de la perception au discours", *Kimé*, 1997.
- HANE 70** *R. M. Hanes*, "Human sensitivity to whole-body vibration in urban transportation systems: a literature review", *Transportation programs report, John Hopkins University, USA*, 1970.

Bibliographie

- HELA 87** *M.G. Helander, S. J. Czaja, C. G. Drury, J. M. Cary and G. Burri*, "An ergonomic evaluation of office chairs", *Office technology and people* 3 246-262, 1987.
- HOWA 88** *H. V. C. Howarth and M. J. Griffin*, "The frequency dependence of subjective reaction to vertical and horizontal whole-body vibration at low magnitudes", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 83(4), 1988.
- HOWA 89** *H. V. C. Howarth*, "Annoyance caused by railway vibration and noise in buildings", *PhD Thesis, Université de Southampton*, 1989.
- HOWA 90a** *H. V. C. Howarth and M. J. Griffin*, "Subjective response to combined noise and vibration: summation and interaction effects", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 143(3), pp443-454, 1990.
- HOWA 90b** *H.V.C. Howarth and M. J. Griffin*, "The relative importance of noise and vibration from railways", *Applied Ergonomics*, Vol. 21,2, pp129-134, 1990.
- HOWA 91** *H. V. C. Howarth and M. J. Griffin*, "The annoyance caused by simultaneous noise and vibration from railways", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 89(5), 1991.
- HUBE 85** *L. Hubert and P. Arabie*, "Comparing partitions", *Journal of Classification* vol. 2(1), pages 193-218, 1985.
- INGV 99** *A. Ingvarsson and D. Vastfjall*, "A study on the human response to aircraft vibrations in flight", *Proceedings of the 5th AIAA Aeroacoustics Conference* pp.1179–1183, Seattle, WA, 1999.
- ISO 10819** *Norme internationale*, "Vibrations et chocs mécaniques - Vibrations main-bras", *AFNOR*, 1996.
- ISO 1683** *Norme internationale*, "Acoustique - Grandeurs normales de référence pour les niveaux acoustiques", *AFNOR*, 1983,
- ISO 2041** *Norme internationale*, "Vibrations et chocs. Vocabulaire", *AFNOR*, 1990.
- ISO 2631** *Norme internationale*, "Vibrations et chocs mécaniques. Evaluation de l'exposition des individus à des vibrations globales du corps.", *AFNOR*, 1997.
- ISO 389-7** *Norme européenne*, "Acoustique - zéro de référence pour l'étalonnage d'équipements audiométriques - Partie 7 : niveau liminaire de référence dans les conditions d'écoute en champ libre et en champ diffus", *AFNOR*, 2005.

Bibliographie

- ISO 532-b** *Norme internationale*, "Acoustique. Méthode de calcul du niveau d'isophonie", *AFNOR*, 1975.
- ISO 5349** *Norme européenne*, "Mesurage et évaluation de l'exposition des individus aux vibrations transmises par la main", *AFNOR*, 2002.
- ISO 5805** *Norme internationale*, "Vibrations et chocs mécaniques. Exposition de l'individu. Vocabulaire.", *AFNOR*, 1997.
- ISO 8002** *Norme internationale*, "Vibrations mécaniques. Véhicules terrestres. Méthode de présentation des résultats de mesure.", *AFNOR*, 1986.
- ISO 8041** *Norme européenne*, "Réponse des individus aux vibrations", Appareillage de mesure, *AFNOR*, 2005.
- ISO 8253-1** *Norme internationale*, "Acoustique - Méthodes d'essais audiométriques - Partie 1 : Audiométrie liminaire fondamentale à sons purs en conduction aérienne et en conduction osseuse", *AFNOR*, 1989.
- ISO 8662** *Norme européenne*, "Mesurage des vibrations au niveau des poignées", *AFNOR*, 1993.
- JANS 79** *J. Janssen*, "Simultaneous shipboard noise and vibration annoyance rating", *Proceedings of Internoise, Warszawa, Poland*, 1979.
- JIME 97** *M. Jimenez*, "Psychologie de la perception", *Ed. Flammarion*, 1997.
- JONE 74** *A. J. Jones and D. J. Saunders*, "A scale of human reaction to whole-body, vertical, sinusoidal vibration", *Journal of Sound and Vibration* 35 503-520, 1974.
- LEAT 76** *T. K. Dempsey, J. D. Leatherwood, and S. A. Clevenson*, "Noise and vibration ride comfort criteria", *Nasa technical memorandum*, 1976.
- LEAT 79** *J. Leatherwood*, "Human discomfort response to noise combined with vertical vibration," *NASA Technical memorandum*, 1979.
- LEAT 80** *J. Leatherwood, T. Dempsey and S. Clevenson*, "A design tool for estimating passenger ride comfort within complex ride environments", *Human Factors, Vol. 22 (3)*, 1980.
- LEAT 90** *J. Leatherwood, S. Clevenson and D. Stephens*, "The development of interior noise and vibration criteria", *NASA Technical Memorandum*, 1990.
- LEVI 71** *H. Levitt*, "Transformed Up-Down methods in psychoacoustics", *Journal of the American Society of America, Vol. 49, Part 2*, 1971.

Bibliographie

- LICK 64** *J. C. R. Licklider*, "Theory of signal detection, in Signal detection and recognition by Human observers", *Ed. Swets, Wiley, NY, 1964.*
- LOTH 97** *D. Loth*, "Biophysique sensorielle. Acoustique physiologique", *Techniques de l'ingénieur*, 1997.
- MANS 00** *N. J. Mansfield et M. J. Griffin*, "Difference thresholds for automobile seat vibration", *Applied Ergonomics, Vol. 31, pp255-261, 2000.*
- MANS 05** *N. J. Mansfield and S. Maeda*, "Equal sensation curves for whole-body vibration expressed as a function of driving force", *J. Acoust. Soc. Am., Vol. 117(6), 2005.*
- MCAD 94** *S. Mc Adams*, "Penser les sons, psychologie cognitive de l'audition", *Ed. Puf Psychologie et science de la pensée, 1994.*
- MCGU 76** *H. Mc Gurk*, "Hearing lips and seeing voices", *Nature, Vol. 264, 1976.*
- MCKA 72** *J. R. McKay*, "Human response to vibration : some studies of perception and startle", *Thèse de doctorat, Université de Southampton, 1972.*
- MIWA 71** *T. Miwa and Y. Yonekawa*, "Methods of evaluating sinusoidal vibrations (vibration evaluation methods 1)", *Nasa Technical Translation, 1971.*
- MIWA 73** *T. Miwa and Y. Yonekawa*, "Measurement and evaluation of environmental vibrations. Part 2. Interaction of sound and vibration", *Ind. Health, Vol. 11, pp177, 1973.*
- MIWA 86** *T. Miwa*, "Evaluation methods for vibration effect. Part 4. Measurement of vibration greatness for whole-body and hand in vertical and horizontal vibrations", *Ind. Health, Vol. 6, pp1-10, 1968.*
- MOOR 03** *B. C. J. Moore*, "An introduction to the psychology of hearing", *Academic Press, 2003.*
- MORI 00** *M. Morioka and M. J. Griffin*, "Difference thresholds for intensity perception of whole-body vertical vibration : effect of frequency and magnitude", *Journal of the American Society of America, Vol. 107-1, 2000.*
- MORI 06** *M. Morioka and M. J. Griffin*, "Magnitude dependence of equivalent comfort contours for fore-and-aft, lateral and vertical whole-body vibration", *Journal of sound and vibration, Vol. 298, pp755-772, 2006.*
- MORI 08** *M. Morioka and M. J. Griffin*, "Absolute thresholds for the perception of fore-and-aft, lateral and vertical vibration at the hand, the seat and the foot", *Journal of Sound and Vibration, Vol. 314, pp357-370, 2008.*

Bibliographie

- NEIS 76** *U. Neisser*, "Cognition and reality", *Freeman, San Francisco*, 1976.
- NF 13059** *Norme Européenne*, "Méthodes d'essai pour mesurer les vibrations", *AFNOR*, 2002.
- NF 61260** *Norme européenne*, "Electroacoustique. Filtres de bande d'octave et de bande d'une fraction d'octave", *AFNOR*, 1996.
- NF 90-400** *Norme Française*, "Vibrations et chocs mécaniques. Effets des vibrations sur l'homme", *AFNOR*, 1988.
- PARI 04** *E. Parizet, J. Brocard and B. Piquet*, "Influence of noise and vibration to comfort in diesel engine cars running at idle", *Acta Acustica united with acustica, Vol. 90*, pp987-993, 2004.
- PARI 05** *E. Parizet and B. Marpe*, "Loudness estimation in the presence of vertical vibrations", *Acoustical society of America Journal, Vol. 117, Issue 4*, pp2396-2397, 2005.
- PARS 88** *K. C. Parsons and M. J. Griffin*, "Whole-body vibration perception thresholds", *Journal of Sound and Vibration, Vol. 121*, pp237-258, 1988.
- PAUL 95** *R. Paulsen and J. Kastka*, "Effects of combined noise and vibration on annoyance", *Journal of Sound and Vibration, Vol. 181(2)*, pp295-314, 1995.
- PIEL 97** *W. J. Pielemeier, V. Jeyabalan, R. C. Meier and N. C. Otto*, "Just noticeable differences in vertical vibration for subjects on an automobile seat", *Proceedings of the 32th group meeting on noise and vibration*, 1997.
- PRIE 04** *J.M. Prieur*, "Orientation spatiale: référentiels égocentrique et géocentrique et intégration multi-sensorielle", *Thèse de doctorat, Université de la Méditerranée – Aix Marseille II*, 2004.
- QUEH 01** *J. Quehl*, "Comfort studies on aircraft interior sound and vibration", *PhD Thesis, Oldenburg University*, 2001.
- REIH 31** *H. Reiher and F. J. Meister*, "The sensitiveness of the human body to vibrations", *Forschung (VDI Berlin) 2(11)*, pp381-386, 1931.

Bibliographie

- RICH 76** *E. Richards and A. Middleton*, "Practical noise reduction in ships", *Proc. Vibration Noise Conference*, pp13-21, *Institute of Marine Engineers, London*.
- SAUV 08** *M. Sauvage, E. Gressant, O. Lescop and V. Roussarie*, "Hand-arm equal sensation curves for steering wheel translational and axial vibration", *The journal of the acoustical society of America*, Vol. 123(5), 2008.
- SCHN 69** *G. E. Schneider*, "Two visual systems", *Science*, Vol 163(870), pp895-902, 1969.
- SHOE 71** *R. W. Shoenberger and C. S. Harris*, "Psychophysical assessment of whole-body vibration", *Human Factors*, Vol. 13, pp41-50, 1971.
- SPEN 02** *C. Spence*, "The ICI report on the secret of senses", *the communication group, London*, 2002.
- SPEN 06** *C. Spence and M. Zampini*, "Auditory contributions to multisensory product perception", *Acta Acustica united with Acustica*, Vol. 92, pp1009-1025, 2006.
- STEP 92** *D. G. Stephens*, "Developments in ride quality criteria. In: M. S. Sanders and E. J. Mc Cormick - Human factor in engineering and design", *McGraw-Hill, New York*, 1992.
- STEV 75** *S. S. Stevens*, "Psychophysics", *Wiley, New York*, 1975.
- VAST 02** *D. Västfjäll, P. Larsson and M. Kleiner*, "Cross-modal interaction in sound quality evaluation: Some experiments using the virtual aircraft", *Institute of Noise Control Engineering Sound Quality Symposium Proceedings, Paper SQS02_03, Dearborn, MI*, 2002.
- VAST 04** *Daniel Västfjäll*, "Contextual influences on sound quality evaluation", *Acta Acustica united with Acustica*, Vol. 90, pp 1029-1036, 2004.
- VERR 85** *R. T. Verrillo*, "Psychophysics of vibrotactile stimulation", *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 77, pp225-232, 1985.
- VIOL 02** *S. Viollon, C. Lavandier, C. Drake*, "Influence of visual setting on sound ratings in an urban environment", *Applied acoustics*, Vol. 63, pp 493-511, 2002.

Bibliographie

- WALS 61** *E. G. Walsh*, "Role of the vestibular apparatus in the perception of motion on a parallel swing", *J. Physiol.*, Vol. 155, pp 506-513, 1961.
- WARR 83** *D. H. Warren, T. J. Mc Carthy and R. B. Welch*, "Discrepancy and nondiscrepancy methods of assessing visual-auditory interaction, Perception and Psychophysics", Vol. 33(5), pp-413-419, 1983.
- WEBE 00** *R. Weber, M. Bellmann and V. Mellert*, "The influence of sound on perception thresholds and JNDs of whole-body vibrations", *17th International Congress on Acoustics, Rome Italy*, 2001.
- WEBE 99** *R. Weber*, "Interior car sound quality - Assessment of acceleration noises", *Proceedings of DAGA*, 1999.
- WHIT 78** *E. M. Whitham and M. J. Griffin*, "The effects of vibration frequency and direction of the location of areas of discomfort caused by whole-body vibration", *Applied Ergonomics*, Vol. 9, pp231-239, 1978.
- ZHAN 96** *L. Zhang, M. G. Helander and C. G. Drury*, "Identifying factors of comfort and discomfort in sitting", *Human factors*, Vol. 38, pp377-389, 1996.

Annexes

A Indicateurs physiques

Indicateur [Unité]	Définition	Remarques
Accélération [m. s ⁻²]	$a(i)$	T_s : Durée du signal f_s : Fréquence d'échantillonnage N : Nombre de points du signal ($N = T_s \cdot f_s$)
Moyenne [m. s ⁻²]	$\bar{a} = \frac{1}{N} \cdot \sum_i a(i)$	Moment statistique d'ordre 1
Ecart-type [m. s ⁻²]	$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_i (a(i) - \bar{a})^2}$	Moment statistique d'ordre 2
Valeur Crête [m. s ⁻²]	$Peak = A = \max(a(i))$	$A^+ = \max(a(i))$ $A^- = \min(a(i))$
Valeur Crête à Crête [m. s ⁻²]	$A_{cc} = a_{cc} = A^+ - A^-$	
Valeur Efficace (root mean square) [m. s ⁻²]	$r. m. s. = a_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_i a(i)^2}$	Si $\bar{a} = 0$ alors $a_{rms} = \sigma$
Facteur de crête (Crest factor)	$C_f = \frac{Peak}{a_{rms}}$	
Niveau Vibratoire (Acceleration level) [dB (ref. a_0 m. s ⁻²)]	$L_a = 20 \cdot \log\left(\frac{a_{rms}}{a_0}\right)$	a_0 : Accélération de référence - 10^{-6} m. s ⁻²
Valeur r.m.q. (root mean quad) [m. s ⁻²]	$r. m. q. = a_{rmq} = \sqrt[4]{\frac{1}{N} \cdot \sum_i a(i)^4}$	

Coefficient de dissymétrie (<i>Skewness</i>)	$S_k = \frac{1}{N \cdot \sigma^3} \cdot \sum_i (a(i) - \bar{a})^3$	Moment statistique d'ordre 3
Coefficient d'aplatissement (<i>Kurtosis</i>)	$K_t = \frac{1}{N \cdot \sigma^4} \cdot \sum_i (a(i) - \bar{a})^4$	
Vibration Dose Value [m. s ^{-7/8}]	$VDV = \sqrt[4]{\frac{T_s}{N} \cdot \sum_i a(i)^4}$	$VDV = T_s \cdot K_t \cdot \sigma^4$ Estimation du VDV (Estimated VDV) : $eVDV = \sqrt[4]{(1,4 \cdot a_{rms})^4 \cdot T_s}$
Spectre (<i>Spectrum</i>) [m. s ⁻²]	$A(k) = \sum_{n=1}^N a(n) \cdot e^{-j \frac{2\pi}{N} (k-1) \cdot (n-1)}$ $a(n) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^N A(k) \cdot e^{j \frac{2\pi}{N} (k-1) \cdot (n-1)}$	$a(n) \xrightarrow{TF} A(k)$ $a(n) \xleftarrow{TF^{-1}} A(k)$
Valeur efficace mobile (<i>Running r.m.s.</i>) [m. s ⁻²]	$a_{run_rms}(k) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \cdot \sum_{i=k-\tau}^{i=k} a(i)^2}$	τ : Temps d'intégration pour le calcul glissant k : Echantillon d'observation
Enveloppe temporelle (<i>Time envelope</i>) [m. s ⁻²]	$env(a(i)) = s_a(i) $	$s_a(t)$: Signal analytique ($s_a(t) = s(t) + j \cdot \hat{s}(t)$) $\hat{s}(t)$: Transformée de Hilbert de $s(t)$ ($s(t) \xrightarrow{H} \hat{s}(t) = s(t) * h(t)$ où $h = \frac{1}{\pi \cdot t}$)
Spectre de modulation (<i>Modulation spectrum</i>) [m. s ⁻²]	$A_{mod}(i) = TF(env(a(i)))$	
Accélération Pondérée (<i>Norme ISO-2631</i>) [m. s ⁻²]	$a_w(i) = a(i) * w_k(i)$ Ou $A_w(k) = A(k) \cdot W_k(k)$	$w_k(i)$: Réponse impulsionnelle du filtre de pondération $W_k(k)$: Courbe de pondération fréquentielle
Maximum de Vibration Transitoire (MTVV) [m. s ⁻²]	$MTVV = \max(a_{run_rms}(k))$	La valeur efficace mobile doit être calculée sur les accélérations pondérées selon la norme ISO-2631
Valeur totale de vibration [m. s ⁻²]	$a_v = \sqrt{k_x^2 \cdot a_{wx}^2 + k_y^2 \cdot a_{wy}^2 + k_z^2 \cdot a_{wz}^2}$	a_{wx}, a_{wy}, a_{wz} : Accélération pondérées selon les axes O_x, O_y et O_z . $k_x = k_y = k_z$: Constantes multiplicatives

Principaux indicateurs vibratoires

B Traitement des signaux

Dans cette étude, le filtrage numérique de signaux est utilisé pour :

- Corriger l'effet de la fonction de transfert mécanique du banc vibratoire : un filtre est appliqué aux signaux accélérométriques restitués sur le simulateur de manière à minimiser l'effet de la chaîne de restitution (système amplificateur - pot vibrant - ressorts) sur les accélérations reproduites au niveau de la glissière du siège.
- Créer des stimuli artificiels : le contenu fréquentiel de tirages de bruits blancs gaussiens est modifié en fonction du protocole expérimental.

L'algorithme de filtrage utilisé consiste à convoluer le signal à traiter par la réponse impulsionnelle du filtre. La relation entre les signaux d'entrée et de sortie (transformées en z) est décrite par l'équation suivante :

$$Y(z) = \frac{b_1 + b_2 z^{-1} + \dots + b_{nb+1} z^{-nb}}{1 + a_2 z^{-1} + \dots + a_{na+1} z^{-na}} \cdot X(z)$$

Les caractéristiques du filtre (coefficients a_i et b_i) sont déterminées à partir de la fonction de transfert souhaitée par la méthode de Yule-Walker (modèle ARMA).

La Figure 61 présente la fonction de transfert du banc, ainsi que celle du filtre utilisé pour minimiser son effet. Cette dernière est calculée en inversant la fonction de transfert du banc. Seules les basses fréquences sont « coupées », pour éviter qu'une amplification trop importante de celles-ci n'utilise toute la dynamique de l'amplificateur au détriment de la qualité de restitution des signaux.

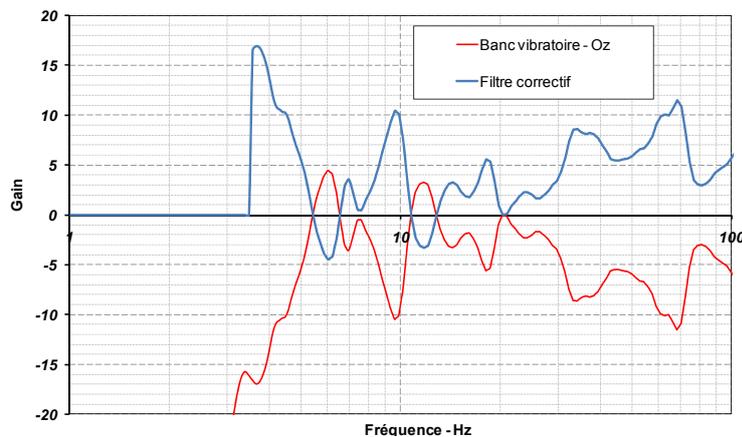


Figure 61 : Fonction de transfert du banc vibratoire et du filtre correctif

C Consignes

C.a Expériences 1, 2 et 3

L'objectif de l'expérience à laquelle vous allez participer est d'évaluer le confort de roulage de différents véhicules.

Vous devez vous imaginer étant installé à la place du passager. La ventilation est arrêtée et les vitres sont fermées. Vos mains sont placées sur vos jambes de manière détendues.

Vous allez être soumis à des signaux enregistrés à l'intérieur de véhicules circulant en 2nd à 30 km/h sur une route de campagne dont le revêtement est dégradé.

Lors de cette expérience, nous allons vous soumettre à des stimuli composés :

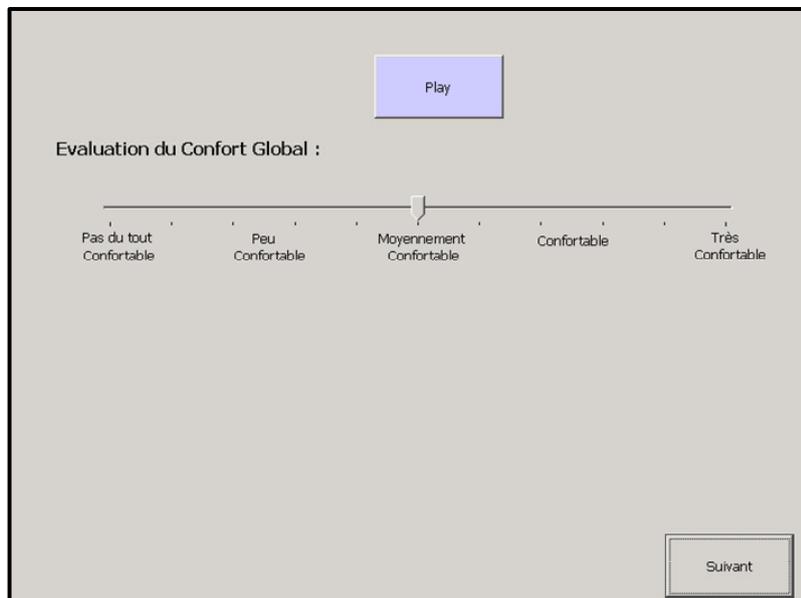
- de bruits,
- de vibrations du siège,
- d'images de la route.

Ils vous seront présentés successivement et pourront être rejoués autant de fois que nécessaire.

Votre tâche consiste, pour chacune des situations à :

- Evaluer le confort global de la situation
(Echelle allant de « pas du tout confortable » à « très confortable »)

Extrait des consignes des épreuves perceptives



The screenshot shows a software interface for a comfort evaluation test. At the top center, there is a blue rectangular button labeled "Play". Below it, the text "Evaluation du Confort Global :" is displayed. Underneath this text is a horizontal scale with five tick marks and corresponding labels: "Pas du tout Confortable", "Peu Confortable", "Moyennement Confortable", "Confortable", and "Très Confortable". A small white slider is positioned on the scale, currently resting on the "Moyennement Confortable" label. In the bottom right corner of the interface, there is a rectangular button labeled "Suivant".

Capture d'écran de l'interface de test

C.b Expérience 4

L'objectif de l'expérience à laquelle vous allez participer est d'évaluer le confort de roulage de différents véhicules.

Vous devez vous imaginer étant installé à la place du passager. La ventilation est arrêtée et les vitres sont fermées. Vos mains sont placées sur vos jambes de manière détendues.

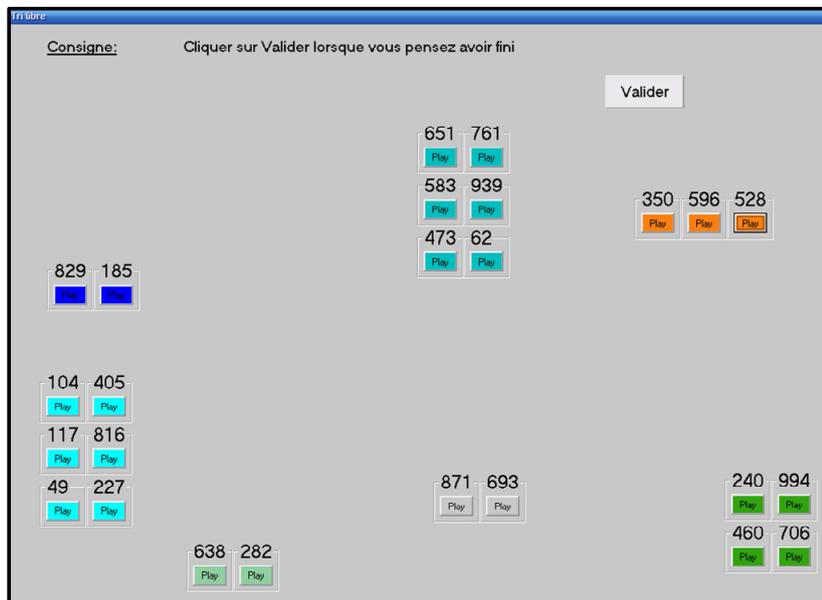
Vous allez être soumis à des sons et à des vibrations du siège enregistrés à l'intérieur de véhicules circulant en 2nd à 30 km/h sur une route de campagne dont le revêtement est dégradé.

Ils vous seront présentés successivement et pourront être rejoués autant de fois que nécessaire.

Votre tâche consiste, pour chacune des situations à:

- Regrouper les stimuli en fonction de leur similitudes.

Extrait des consignes des épreuves perceptives



Capture d'écran de l'interface de test

C.c Expérience 5

L'objectif de l'expérience à laquelle vous allez participer est d'évaluer le confort de roulage de différents véhicules.

Vous devez vous imaginer étant installé à la place du passager. La ventilation est arrêtée et les vitres sont fermées. Vos mains sont placées sur vos jambes de manière détendues.

Vous allez être soumis à des signaux enregistrés à l'intérieur de véhicules circulant en 2nd à 30 km/h sur une route de campagne dont le revêtement est dégradé.

Lors de cette expérience, nous allons vous soumettre à des stimuli composés :

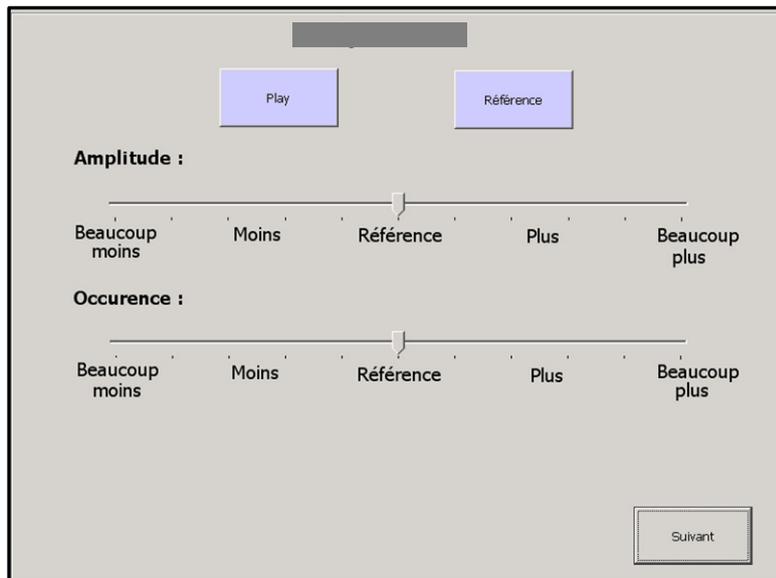
- de bruits,
- de vibrations du siège.

Ils vous seront présentés successivement et pourront être rejoués autant de fois que nécessaire.

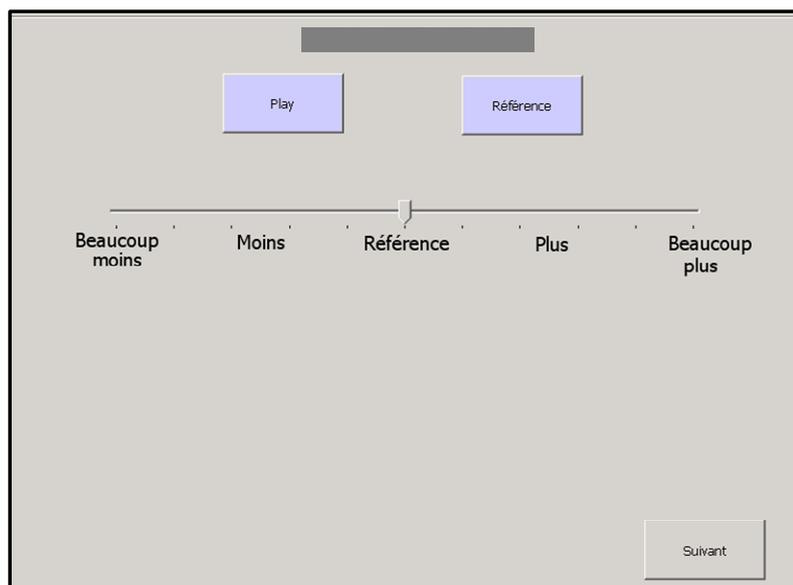
Votre tâche consiste, pour chacune des situations à comparer chaque association de stimuli à la référence sur les échelles suivantes :

- [] – Amplitude et Occurrence
(Echelles allant de « beaucoup moins » à « beaucoup plus »)
- [] – Amplitude et Occurrence
(Echelles allant de « beaucoup moins » à « beaucoup plus »)
- [] – Amplitude et Occurrence
(Echelles allant de « beaucoup moins » à « beaucoup plus »)
- []
(Echelles allant de « beaucoup moins » à « beaucoup plus »)
- Niveau vibratoire
(Echelles allant de « beaucoup moins » à « beaucoup plus »)

Extrait des consignes des épreuves perceptives



Capture d'écran de l'interface de test



Capture d'écran de l'interface de test

C.d Expérience 6

L'objectif de l'expérience à laquelle vous allez participer est d'évaluer le confort de roulage de différents véhicules.

Vous devez vous imaginer étant installé à la place du passager. La ventilation est arrêtée et les vitres sont fermées. Vos mains sont placées sur vos jambes de manière détendues.

Vous allez être soumis à des signaux enregistrés à l'intérieur de véhicules circulant en 2nd à 30 km/h sur une route de campagne dont le revêtement est dégradé.

Lors de cette expérience, nous allons vous soumettre à des stimuli composés :

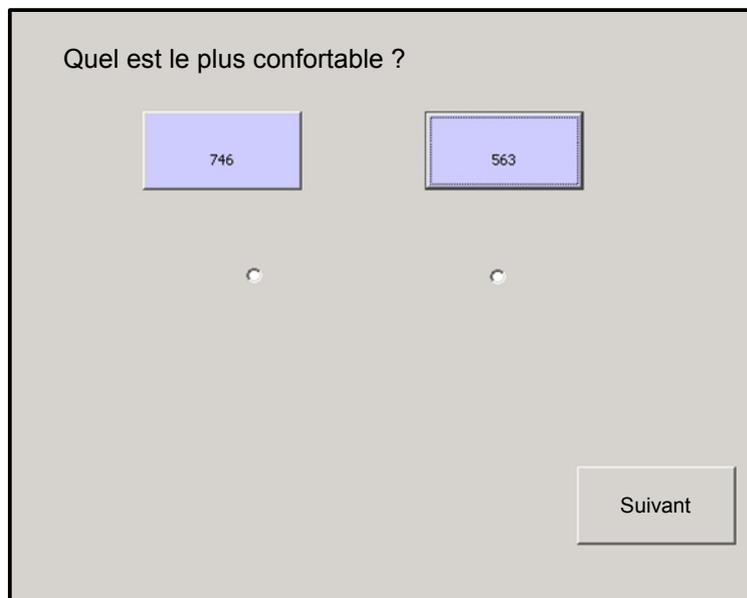
- de bruits,
- de vibrations du siège,

Ils vous seront présentés successivement et pourront être rejoués autant de fois que nécessaire.

Votre tâche consiste, pour chacune des paires de stimuli qui vous sont présentés à :

- Indiquer votre préférence en termes de confort
(le choix de l'un des deux éléments de la paire est obligatoire)

Extrait des consignes des épreuves perceptives



Capture d'écran de l'interface de test

FOLIO ADMINISTRATIF

THESE SOUTENUE DEVANT L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON

NOM : AMARI DATE de SOUTENANCE : 15/10/2009

Prénoms : Maël

TITRE : Etude du confort vibro-acoustique automobile en simulateur

NATURE : Doctorat Numéro d'ordre : XX XXXX

Ecole doctorale : MEGA

Spécialité : Acoustique

Cote B.I.U. - Lyon : T 50/210/19 / et bis CLASSE :

RESUME :

L'intégration des facteurs humains dans la conception automobile est aujourd'hui un enjeu majeur de l'innovation. De par l'utilisation de plus en plus urbaine des véhicules, le confort de roulage à basse vitesse est au cœur des préoccupations industrielles. Dans cette situation, le confort dépend essentiellement de l'environnement vibro-acoustique de l'habitacle. Les évaluations de confort d'une telle situation constituent le cadre de ce travail de recherche. En complément des études « in situ », ce type d'étude nécessite l'utilisation de simulateurs car ceux-ci permettent la maîtrise des caractéristiques de l'environnement d'un sujet. Mais, il existe toujours des limites à l'immersion et, la simulation modifie le contexte cognitif dans lequel se trouve le passager.

Dans le but d'optimiser la simulation, deux expériences sont tout d'abord réalisées pour mesurer l'influence de l'environnement de simulation sur les évaluations de confort. Les contributions relatives de l'immersion et des informations contextuelles apportées par les modalités vibratoires, sonores et visuelles sont estimées.

Les propriétés physiques des stimuli, significatives pour le confort, sont ensuite identifiées. À cet effet, les contributions relatives des niveaux sonores et vibratoires au confort automobile sont modélisées avec précision. L'existence d'une image perceptive du confort vibratoire des véhicules est également recherchée.

Enfin, les travaux s'attachent à appréhender, dès la conception, les liens entre les prestations offertes par un véhicule à son occupant et le confort vibro-acoustique de l'habitacle. Des évaluations expertes d'items de cotation des véhicules sont comparées à des évaluations de confort faites par des sujets naïfs. Deux expériences perceptives faisant intervenir des stimuli artificiels sont alors mises en place. Ainsi, les liens entre les paramètres de synthèse et les évaluations permettent d'identifier les items de cotation les plus pertinents pour l'évaluation du confort.

MOTS-CLES : acoustique, vibration, transports, automobile, perception, psychophysique, méthodologie, confort, multi-modalité, simulateur.

Laboratoire de recherche : Laboratoire Vibrations Acoustique, Institut National des Sciences Appliquées, Lyon

Directeur de thèse: E.PARIZET

Président de jury :

Composition du jury :

Mr. P. DONATI	Dr., INRS	Rapporteur
Mme. C. FILLOL	Dr., RATP	Invitée
Mr. P. GUILLEMAIN	Dr., CNRS	Examinateur
Mr. E. PARIZET	Pr., INSA de Lyon	Directeur de thèse
Mr. J.F. PETIOT	Pr., Ecole centrale de Nantes	Examinateur
Mr. V. ROUSSARIE	Dr., PSA Peugeot Citroën	Examinateur
Mr. R. WEBER	Pr., Université d'Oldenburg	Rapporteur

