



**HAL**  
open science

# Caractérisation de l'inconfort induit par les vibrations d'un volant automobile sous la sollicitation du groupe motopropulseur

Luc Laroche

► **To cite this version:**

Luc Laroche. Caractérisation de l'inconfort induit par les vibrations d'un volant automobile sous la sollicitation du groupe motopropulseur. Acoustique [physics.class-ph]. Université de Lyon, 2021. Français. NNT : 2021LYSEI080 . tel-03624448

**HAL Id: tel-03624448**

**<https://theses.hal.science/tel-03624448>**

Submitted on 30 Mar 2022

**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.



# INSA

N°d'ordre NNT : 2021LYSEI080

## THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON

Opérée au sein de

**Institut National des Sciences Appliquées de Lyon**

**Ecole Doctorale N°162**

**Mécanique, Énergétique, Génie civil, Acoustique (MEGA)**

**Spécialité/ discipline de doctorat :**

Acoustique

Soutenue publiquement le 09/11/2021, par :

**Luc Laroche**

---

# Caractérisation de l'inconfort induit par les vibrations d'un volant automobile sous la sollicitation du groupe motopropulseur

---

Devant le jury composé de :

Hamzaoui, Nacer, Professeur des universités, INSA Lyon

Président

Chimentin, Xavier, Maître de conférence HDR, URCA Reims

Rapporteur

Marcotte, Pierre, Associate Professor, IRRST Montréal

Rapporteur

Meunier, Sabine, Chargée de Recherche HDR, LMA Marseille

Examinatrice

Totaro, Nicolas, Professeur des universités, INSA Lyon

Examineur

Hamzaoui, Nacer, Professeur des universités, INSA Lyon

Examineur

Parizet, Etienne, Professeur, INSA de Lyon

Examineur

Parizet, Etienne, Professeur, INSA de Lyon

Directeur de thèse

Bornet, Frédéric, Ingénieur du Groupe Stellantis

Invité

**Département FEDORA – INSA Lyon - Ecoles Doctorales – Quinquennal 2016-2020**

<b>SIGLE</b>	<b>ECOLE DOCTORALE</b>	<b>NOM ET COORDONNEES DU RESPONSABLE</b>
<b>CHIMIE</b>	<b>CHIMIE DE LYON</b> <a href="http://www.edchimie-lyon.fr">http://www.edchimie-lyon.fr</a> Sec. : Renée EL MELHEM Bât. Blaise PASCAL, 3e étage <a href="mailto:secretariat@edchimie-lyon.fr">secretariat@edchimie-lyon.fr</a> INSA : R. GOURDON	<b>M. Stéphane DANIELE</b> Institut de recherches sur la catalyse et l'environnement de Lyon IRCELYON-UMR 5256 Équipe CDFA 2 Avenue Albert EINSTEIN 69 626 Villeurbanne CEDEX <a href="mailto:directeur@edchimie-lyon.fr">directeur@edchimie-lyon.fr</a>
<b>E.E.A.</b>	<b>ÉLECTRONIQUE, ÉLECTROTECHNIQUE, AUTOMATIQUE</b> <a href="http://edeea.ec-lyon.fr">http://edeea.ec-lyon.fr</a> Sec. : M.C. HAVGOUDOUKIAN <a href="mailto:ecole-doctorale.eea@ec-lyon.fr">ecole-doctorale.eea@ec-lyon.fr</a>	<b>M. Gérard SCORLETTI</b> École Centrale de Lyon 36 Avenue Guy DE COLLONGUE 69 134 Écully Tél : 04.72.18.60.97 Fax 04.78.43.37.17 <a href="mailto:gerard.scorletti@ec-lyon.fr">gerard.scorletti@ec-lyon.fr</a>
<b>E2M2</b>	<b>ÉVOLUTION, ÉCOSYSTÈME, MICROBIOLOGIE, MODÉLISATION</b> <a href="http://e2m2.universite-lyon.fr">http://e2m2.universite-lyon.fr</a> Sec. : Sylvie ROBERJOT Bât. Atrium, UCB Lyon 1 Tél : 04.72.44.83.62 INSA : H. CHARLES <a href="mailto:secretariat.e2m2@univ-lyon1.fr">secretariat.e2m2@univ-lyon1.fr</a>	<b>M. Philippe NORMAND</b> UMR 5557 Lab. d'Ecologie Microbienne Université Claude Bernard Lyon 1 Bâtiment Mendel 43, boulevard du 11 Novembre 1918 69 622 Villeurbanne CEDEX <a href="mailto:philippe.normand@univ-lyon1.fr">philippe.normand@univ-lyon1.fr</a>
<b>EDISS</b>	<b>INTERDISCIPLINAIRE SCIENCES-SANTÉ</b> <a href="http://www.ediss-lyon.fr">http://www.ediss-lyon.fr</a> Sec. : Sylvie ROBERJOT Bât. Atrium, UCB Lyon 1 Tél : 04.72.44.83.62 INSA : M. LAGARDE <a href="mailto:secretariat.ediss@univ-lyon1.fr">secretariat.ediss@univ-lyon1.fr</a>	<b>Mme Sylvie RICARD-BLUM</b> Institut de Chimie et Biochimie Moléculaires et Supramoléculaires (ICBMS) - UMR 5246 CNRS - Université Lyon 1 Bâtiment Curien - 3ème étage Nord 43 Boulevard du 11 novembre 1918 69622 Villeurbanne Cedex Tel : +33(0)4 72 44 82 32 <a href="mailto:sylvie.ricard-blum@univ-lyon1.fr">sylvie.ricard-blum@univ-lyon1.fr</a>
<b>INFOMATHS</b>	<b>INFORMATIQUE ET MATHÉMATIQUES</b> <a href="http://edinfomaths.universite-lyon.fr">http://edinfomaths.universite-lyon.fr</a> Sec. : Renée EL MELHEM Bât. Blaise PASCAL, 3e étage Tél : 04.72.43.80.46 <a href="mailto:infomaths@univ-lyon1.fr">infomaths@univ-lyon1.fr</a>	<b>M. Hamamache KHEDDOUCI</b> Bât. Nautibus 43, Boulevard du 11 novembre 1918 69 622 Villeurbanne Cedex France Tel : 04.72.44.83.69 <a href="mailto:hamamache.kheddouci@univ-lyon1.fr">hamamache.kheddouci@univ-lyon1.fr</a>
<b>Matériaux</b>	<b>MATÉRIAUX DE LYON</b> <a href="http://ed34.universite-lyon.fr">http://ed34.universite-lyon.fr</a> Sec. : Stéphanie CAUVIN Tél : 04.72.43.71.70 Bât. Direction <a href="mailto:ed.materiaux@insa-lyon.fr">ed.materiaux@insa-lyon.fr</a>	<b>M. Jean-Yves BUFFIÈRE</b> INSA de Lyon MATEIS - Bât. Saint-Exupéry 7 Avenue Jean CAPELLE 69 621 Villeurbanne CEDEX Tél : 04.72.43.71.70 Fax : 04.72.43.85.28 <a href="mailto:jean-yves.buffiere@insa-lyon.fr">jean-yves.buffiere@insa-lyon.fr</a>
<b>MEGA</b>	<b>MÉCANIQUE, ÉNERGÉTIQUE, GÉNIE CIVIL, ACOUSTIQUE</b> <a href="http://edmega.universite-lyon.fr">http://edmega.universite-lyon.fr</a> Sec. : Stéphanie CAUVIN Tél : 04.72.43.71.70 Bât. Direction <a href="mailto:mega@insa-lyon.fr">mega@insa-lyon.fr</a>	<b>M. Jocelyn BONJOUR</b> INSA de Lyon Laboratoire CETHIL Bâtiment Sadi-Carnot 9, rue de la Physique 69 621 Villeurbanne CEDEX <a href="mailto:jocelyn.bonjour@insa-lyon.fr">jocelyn.bonjour@insa-lyon.fr</a>
<b>ScSo</b>	<b>ScSo*</b> <a href="http://ed483.univ-lyon2.fr">http://ed483.univ-lyon2.fr</a> Sec. : Véronique GUICHARD INSA : J.Y. TOUSSAINT Tél : 04.78.69.72.76 <a href="mailto:veronique.cervantes@univ-lyon2.fr">veronique.cervantes@univ-lyon2.fr</a>	<b>M. Christian MONTES</b> Université Lyon 2 86 Rue Pasteur 69 365 Lyon CEDEX 07 <a href="mailto:christian.montes@univ-lyon2.fr">christian.montes@univ-lyon2.fr</a>

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

# Table des matières

## Résumé/ Abstract

## Chapitre 1 : Revue Bibliographique et contexte de l'étude

1.	Notions de confort .....	10
1.1	Approche ergonomique et relation à l'environnement .....	10
1.2	Evaluer le confort par la mesure de l'inconfort .....	11
1.3	Les modèles fonctionnels existants .....	13
1.4	Confort au poste de conduite .....	15
1.5	Position optimale de conduite .....	16
2.	L'environnement vibratoire automobile .....	17
2.1	Les sources vibratoires automobiles .....	18
2.1.1	Excitation route .....	18
2.1.2	Le moteur à combustion interne .....	19
2.2	Réponse dynamique du système de direction/volant .....	20
2.3	Couplage statique main-volant et réponse dynamique de la main .....	24
2.3.1	Contact Main-poignée .....	24
2.3.2	Réponse biodynamique du bras .....	27
2.4	Synthèse .....	33
3	Perception des vibrations .....	34
3.1	Les systèmes perceptifs .....	34
3.1.1	Les mécanorécepteurs .....	35
3.2	Minimum de sensation .....	37
3.3	La norme ISO 5349 .....	40
3.4	ISO-sensations .....	42

3.4.1 Influence de la direction d'excitation .....	42
3.4.2 Influence de l'amplitude d'excitation .....	43
3.5 Perception des vibrations de rotation du volant.....	45
3.6 Conclusion .....	47
Synthèse de la littérature et objectifs de travail.....	48

## Chapitre 2 : couplage mécanique des mains et du volant

Introduction.....	53
1. Efforts appliqués sur le volant en fonction de la situation de conduite.....	54
1.1 Stratégie expérimentale .....	54
1.2 Montage expérimental .....	55
1.2.1 Système de mesure de poussée et de préhension .....	55
1.2.2 Mesures vibratoires.....	56
1.3 Participants.....	57
1.4 Protocole expérimental .....	57
1.5 Résultats .....	59
1.5.1 Pré analyse des mesures .....	59
1.5.2 Analyse interindividuelle .....	63
1.5.3 Effets des paramètres anthropométriques.....	63
1.5.4 Nature du contact en fonction de la situation de conduite.....	65
1.6 Analyse des excitations vibratoires (Situation 2) .....	67
1.6.1 Pré traitement .....	67
1.6.2 Influence de la situation de conduite.....	68
1.6.3 Influence des efforts de poussée et de préhension.....	72

1.7	Conclusion .....	73
2.	Couplage dynamique main(s)/volant (Exp.2).....	75
2.1	Prérequis : mise en équation du couplage Main(s)-volant .....	75
2.1.1	Cas du volant tenu à une main.....	75
2.1.2	Cas du volant tenu à deux mains .....	77
2.2	Réponse mécanique du système main-bras.....	78
2.3	Expérience en véhicule .....	80
2.4	Montage expérimental .....	80
2.4.1	Système .....	80
2.4.2	Mobilité du volant aux interfaces main-volant.....	82
2.5	Participants.....	83
2.6	Protocole expérimental .....	83
2.7	Pré-analyse .....	85
2.7.1	Approximation de corps rigide.....	85
2.7.2	Variabilité de la mesure .....	86
2.8	Résultats .....	87
2.8.1	Calcul de l'atténuation relative.....	87
2.8.2	Influence de l'excitation vibratoire.....	87
2.8.3	Influence de la situation de conduite sur la réponse vibratoire.....	88
2.8.4	Influence de la direction d'excitation .....	90
2.8.5	Synthèse.....	91
2.9	Prédiction à partir du modèle de la norme .....	92
2.9.1	Mise en place du modèle prédictif .....	92
2.9.2	Influence du modèle .....	93
2.9.3	Cas du couplage à une main .....	93
2.9.4	Cas du couplage à deux mains .....	97

2.10 Conclusion .....	99
2.11 Préconisations de mesure .....	99
Conclusion du chapitre 2.....	100

## Chapitre 3 : perception des vibrations du volant

Introduction.....	101
1. Exp.3 : influence des vibrations transmises au travers d'une poignée instrumentée ...	103
1.1 Littérature existante pour répondre à la problématique.....	103
1.2 Stimuli .....	104
1.3 Montage expérimental .....	104
1.4 Participants .....	106
1.5 Protocole expérimental .....	106
1.6 Prétraitement .....	107
1.6.1 Variabilité du banc .....	107
1.6.2 Standardisation de l'échelle.....	109
1.7 Résultats .....	110
1.8 Conclusion.....	117
2. Exp.4 : perception des vibrations à travers un volant.....	118
2.1 Introduction .....	118
2.2 Expérience .....	120
2.2.1 Montage expérimental .....	120
2.2.2 Participants .....	122
2.2.3 Stimuli .....	122
2.2.4 Procédure.....	123
2.3 Résultats .....	123

2.3.1 Standardisation de l'échelle.....	124
2.3.2 Différences inter individuelle.....	124
2.3.3 Analyse statistique.....	125
2.3.4 Lois de Stevens.....	128
2.3.5 Construction d'une pondération fréquentielle.....	132
2.4 Conclusion.....	134
Conclusion du chapitre 3.....	135
Conclusion générale.....	137

## Annexes

Annexe 1 : discrétisation en pression du volant.....	145
Annexe 2 : comparaison des niveaux vibratoires entre les situations volant libre et volant tenu.....	146
Direction <b>t</b> .....	146
Direction <b>n</b> .....	147
Annexe 3 : comparaison entre les mesures et les prédictions du modèle de couplage....	148
Situation Main Gauche : point G.....	148
Situation Deux Mains : point G.....	149
Annexe 4 : Consignes aux participants.....	150

# Résumé

Du fait des avancées technologiques dans le domaine du transport et de l'augmentation globale du confort, les constructeurs automobiles cherchent à transformer l'acte de conduite en expérience interactive et sensorielle. Parmi les différentes interactions entre le conducteur et le véhicule, les vibrations transmises par le volant figurent dans les premières sources de stimulation vibratoire. L'objectif des constructeurs automobiles est donc multiple : caractériser la source vibratoire, travailler sur son atténuation et évaluer son influence en terme de confort. Dans la littérature, l'inconfort généré par les vibrations dues à une déformation de la route ou un problème d'équilibrage des roues a largement été traité. En revanche, il existe peu d'information sur l'inconfort généré par les vibrations du moteur. Cette thèse cherche donc à caractériser l'inconfort induit par les vibrations du volant automobile selon deux thématiques : le couplage mécanique entre le conducteur et le volant et les paramètres d'influence de ces vibrations sur l'inconfort. Ce manuscrit synthétise les travaux réalisés au cours de cette thèse, proposant des solutions afin d'améliorer l'estimation des vibrations à l'interface conducteur/véhicule et leurs influences sur la sensation produite. Des perspectives de recherche sont également décrites afin de résoudre certaines problématiques mises en évidence dans la thèse. L'ensemble des travaux présentés ont été réalisés au sein du centre technique Belchamp du Groupe Stellantis et sur les installations du Laboratoire Vibration et Acoustique de l'INSA de Lyon. Cette thèse s'inscrit dans une collaboration entre le Groupe Stellantis et le Laboratoire Vibration Acoustique sous la forme d'une thèse Cifre de l'école doctorale MEGA (ED 162). L'encadrement a été réalisé par Etienne Parizet (professeur du Laboratoire Vibration et Acoustique de l'INSA de Lyon) et par Frédéric Bornet (Ingénieur du Groupe Stellantis).

# Abstract

Due to technological advances in transportation and the overall increase in comfort, car manufacturers aimed to transform the act of driving into an interactive and sensory experience. Among the various interactions between the driver and the vehicle, vibrations transmitted by the steering wheel are among the first sources of vibratory stimulation. Goals of car manufacturers are therefore multiple: characterize the vibratory source, work on reducing its emissivity and evaluate its influence in terms of comfort. In the literature, the discomfort generated by vibrations due to a road deformation or a wheel balancing problem has been widely treated. However, there is only few information on the discomfort generated by the engine vibrations. This PhD therefore aims at characterizing the discomfort induced by the vibrations of the steering wheel, according to two main topics: the mechanical coupling between the driver and the steering wheel and the influence parameters of the vibrations on discomfort. This document summarizes the work done during this PhD, providing solutions to improve the estimation of vibrations at the driver/vehicle interface and its influence on the sensation. All the work presented was carried out at the Belchamp technical center of the Stellantis Group and on the facilities of the *Laboratoire Vibration et Acoustique* of INSA Lyon engineering school.

# Chapitre 1 : Revue Bibliographique et contexte de l'étude

## 1. Notions de confort

Dans le sens commun, on identifie souvent la notion de confort à celles de bien-être, de plaisir ou de relaxation. Selon *De Looze et al.* [1], il existe trois types de confort : physique, psychologique et physiologique. Le dictionnaire Larousse définit le confort comme « l'ensemble des commodités, des agréments qui produit le bien-être matériel ». Cette définition est proche de la notion de « confort physique » proposée par De Looze et marque la relation forte qui existe entre confort et environnement matériel. De manière générale, la caractérisation et l'identification du confort s'inscrivent dans une thématique beaucoup plus large : comment caractériser une sensation et mesurer la perception ? D'après *Coren et al.* [2], une sensation fait référence à la réponse du corps à son environnement par le biais de récepteurs sensoriels et de cellules nerveuses. Ces informations sont ensuite interprétées et organisées sous la forme d'une perception. Cette définition de la sensation montre l'interaction physique qui existe entre l'environnement matériel et le corps. La notion d'interprétation induit quant à elle l'idée d'une dépendance au contexte et à l'environnement psychologique [3]. La compréhension de l'environnement semble donc déterminante dans l'évaluation de la notion de confort dans sa pluralité.

### 1.1 Approche ergonomique et relation à l'environnement

Dans une approche ergonomique, l'amélioration du confort passe par l'adaptation de l'environnement matériel pour faciliter la réalisation des besoins. Par ce biais, l'ergonome propose d'améliorer la qualité de vie et le bien-être des individus. Ainsi, la notion de confort peut prendre différentes formes en fonction des besoins, de l'environnement extérieur et des attentes de chacun. On retrouve ces thématiques dans des domaines variés comme l'habitat, le travail ou les transports. Cette vision ergonomique marque la relation forte qui existe entre la notion de confort et celles de modernité et d'innovation. On peut d'ailleurs imaginer que

les attentes en termes de confort sont en augmentation perpétuelle et qu'une amélioration du confort dans un domaine pourra faire évoluer l'attente générale dans un autre domaine. Par exemple, même s'il semble aujourd'hui difficile d'obtenir un confort équivalent entre un véhicule et une maison, les constructeurs automobiles cherchent à augmenter le confort dans l'habitacle en s'inspirant de l'habitation. L'étude de *Khoudeir et al.* [3] propose dans ce sens une analyse des similarités entre le domicile et la voiture en terme d'environnement et de fonctions à remplir. Les auteurs utilisent ensuite des méthodes d'analyse propres à l'architecture pour caractériser le « confort en véhicule ». Ils cherchent ainsi à proposer un véhicule, non plus uniquement centré sur le besoin primaire de se déplacer, mais comme un vrai espace de vie.

Lors d'une analyse fonctionnelle basique du confort en véhicule, on peut identifier plusieurs formes de confort :

- La fiabilité du véhicule dans sa réponse au besoin primaire : permettre d'aller d'un point A à un point B sans tomber en panne et en sécurité.
- Rendre l'expérience automobile la plus agréable possible : espaces dégagés, lumineux, personnalisables et dont l'ergonomie des accessoires est étudiée.

On retrouve ici la relation forte qui existe entre confort, modernité et attentes. Le domaine automobile est vaste et présente un nombre important de catégories de véhicules, dont l'usage peut être très différent selon les segments (utilitaires, berlines, citadines). On peut donc s'attendre à ce que les attentes en termes de confort soient également différentes.

## 1.2 Evaluer le confort par la mesure de l'inconfort

La définition de la notion de confort peut également soulever la question de l'inconfort, dont le dictionnaire Larousse propose deux définitions :

- « Manque de confort matériel. »
- « Caractère désagréable, incommode de l'état dans lequel se trouve quelqu'un. »

La première approche décrit une notion d'inconfort opposée à celle de confort, comme si l'on pouvait décrire la perception de ces deux sensations sur une même échelle. Par exemple, sur une échelle bornée d'un côté par « inconfortable » et de l'autre par « confortable ». Dans la

deuxième approche, l'inconfort n'est pas caractérisé par une relation au confort. Il est décrit comme un état déplaisant, dont la cause pourrait être d'origine physique et/ou psychologique. Ainsi, confort et inconfort sont décrits comme deux notions distinctes. Prenons pour exemple le confort d'un siège automobile. Lorsque l'on s'installe dans un véhicule, on peut trouver que le siège est confortable. Si ce même siège est ensuite soumis à une vibration, il n'en perd pas forcément ses qualités initiales. On pourrait donc toujours percevoir le confort apporté par le siège. Cependant, les vibrations provoquent un inconfort. L'idée développée ici est qu'il est possible d'évaluer à la fois la sensation de confort du siège et celle de l'inconfort induit par la vibration bien que ces évaluations ne sont pas décorrélées.

Afin de clarifier les définitions de confort et d'inconfort, *Zhang et al.* [4] proposent une expérience linguistique pour définir les termes qui caractérisent ces deux sensations. Le

Tableau 1 présente quelques termes issus de cette étude. Comme on peut le voir, les termes associés à l'inconfort : *Fatigue*, *Posture*, *Douleur*, correspondent plus à des caractéristiques physiques, souvent synonymes de douleur. Douleur pouvant être directement corrélée à une interaction physique entre le corps et l'environnement [5]. Le confort est quant à lui associé à des paramètres psychologiques, comme la sécurité ou le bien-être.

<b>Facteurs liés à l'inconfort</b>	<b>Facteurs liés au confort</b>
<i>Fatigue</i>	<i>Douceur</i>
<i>Douleur</i>	<i>Sécurité</i>
<i>Posture</i>	<i>Rafraîchissant</i>
<i>Rigidité</i>	<i>Bien-être</i>
<i>Jambes lourde</i>	<i>Relaxation</i>

*Tableau 1 : Facteurs influençant le confort et l'inconfort en position assise. Extrait de Zhang et al. [4].*

Si ce tableau laisse apparaître une vision plutôt décorrélée des notions de confort et d'inconfort, *Zhang et al.* [4] propose de les schématiser comme une transition continue entre

confort et inconfort, présenté Figure 1. Ce schéma décrit l'idée qu'une sensation d'inconfort trop importante ne permet pas de ressentir la sensation de confort et inversement. Ainsi si l'inconfort devient trop important, le confort passe au second plan.

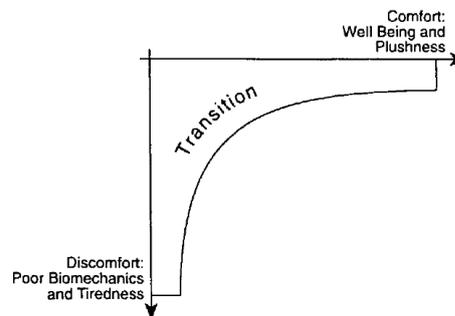


Figure 1 : schéma d'interaction confort-inconfort. Extrait de de Zhang et al. [4].

Issu de ces différentes constatations et des flous existants dans les définitions, plusieurs études ont cherché à construire des modèles fonctionnels de confort et d'inconfort.

### 1.3 Les modèles fonctionnels existants

Il existe principalement deux modèles pour décrire confort et inconfort, celui décrit par *De Looze et al.* [1] et celui décrit dans l'article de *Vink et al.* [6]. Dans l'étude de *De Looze et al.*, le modèle fonctionnel est construit dans la continuité de l'étude terminologique de *Zhang et al.* [4]. Comme on peut le voir sur la Figure 2, le modèle fait apparaître trois caractéristiques : *human, product et environnement* pour décrire le processus de confort et d'inconfort. On peut voir que les éléments propres aux deux notions sont en partie différents, avec des éléments plus rattachés aux caractéristiques physiques pour l'inconfort et psychologiques pour le confort. Dans cette schématisation, il n'y a pas de flèches reliant le confort et l'inconfort, marquant une faible interaction entre les deux sensations.

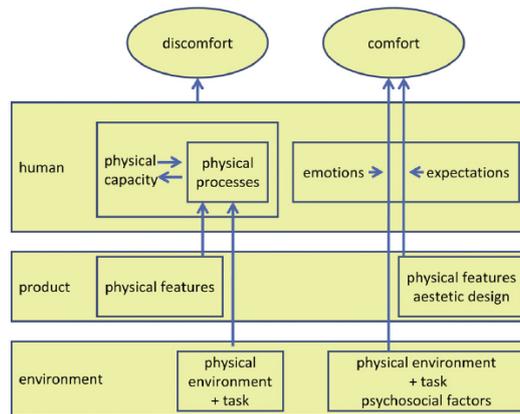


Figure 2 : Modèle de De Looze et al. [1].

Vink [6] propose de compléter ce modèle avec un schéma en boucle fermée, présenté sur la Figure 3. On retrouve tout d'abord trois caractéristiques similaires à celles proposées sur la Figure 2. Le modèle décrit un utilisateur en interaction (I), physique ou non physique avec l'environnement. Cette interaction résulte ensuite en un effet sur le corps (H), décrit par des récepteurs sensoriels. Le (P) caractérise finalement la perception de cet effet, elle-même influencée par la notion d'attente (E), selon l'une des trois réponses ; Confortable (C), Non perçue (N) et Inconfortable (D). On peut donc remarquer que le modèle met en avant une relation d'opposition entre confort et inconfort.

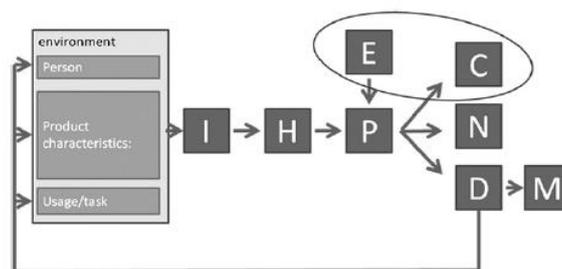


Figure 3 : Modèle de Vink et al. [6]. Cette dernière peut également être exprimée sous la forme de troubles Musculo-squelettiques (M). Interaction entre (E) et (C) est marqué par un cercle.

Ces modèles synthétisent les définitions et les approches adoptées pour décrire les sensations de confort et d'inconfort d'un point de vue fonctionnel. Dans le domaine automobile, le développement des postes de conduite s'inscrit dans la continuité de ceux-ci et présente des problématiques connexes.

## 1.4 Confort au poste de conduite

Depuis longtemps, les constructeurs automobiles cherchent à caractériser la notion de confort de conduite. Si le style d'un véhicule peut s'apprécier au premier coup d'œil, le confort s'appréciera quant à lui à l'usage. Même si la sensation de confort peut être immédiate et provoquer une satisfaction, une petite nuisance peut devenir une vraie source d'inconfort si elle est récurrente.

D'après l'analyse fonctionnelle et l'expérience du groupe Stellantis, on peut distinguer deux catégories de confort :

- « Le confort d'accueil »
  - Donner envie de s'installer (visuel, texture de l'habitacle)
  - Faciliter l'accès dans le véhicule
  - Proposer un contact agréable avec le siège et le volant (doux, moelleux)
  - Permettre à tous les utilisateurs une position fonctionnelle et confortable (ergonomie des réglages du siège et du volant)
- « Le confort dynamique »
  - Maintenir le corps pour limiter les efforts musculaires
  - Isoler le passager de l'environnement extérieur (des nuisances sonores et vibratoires par exemple)

D'après les définitions du confort et de l'inconfort présentées précédemment, « le confort d'accueil » semble plus relié à la notion de confort et « le confort dynamique » au besoin d'éliminer les sources d'inconfort. Ces deux notions sont complémentaires et doivent être traitées simultanément. Dans cette thèse, l'objectif est de quantifier l'influence des nuisances vibratoires sur le confort de conduite. Ainsi, si le confort d'accueil n'est pas suffisant, c'est-à-dire que la position statique du conducteur ou du passager provoque une gêne, la situation sera initialement inconfortable. Il sera donc difficile d'évaluer distinctement l'inconfort apporté par la position et par la présence d'une nuisance. A fortiori, il sera compliqué de prédire l'augmentation de confort apporté par la réduction de la nuisance. Il semble donc tout d'abord nécessaire de satisfaire le confort d'accueil pour permettre l'évaluation du confort dynamique.

## 1.5 Position optimale de conduite

Dans l'ensemble des points proposés pour satisfaire le confort d'accueil, l'ergonomie des réglages de la position de conduite constitue la première source d'inconfort chez l'utilisateur. Afin d'assurer une position adéquate à un large panel d'utilisateur, la construction de l'espace d'accueil se base sur des études anthropométriques poussées. Comme on peut le voir sur la Figure 4, le nombre de paramètres mesurables est très important.

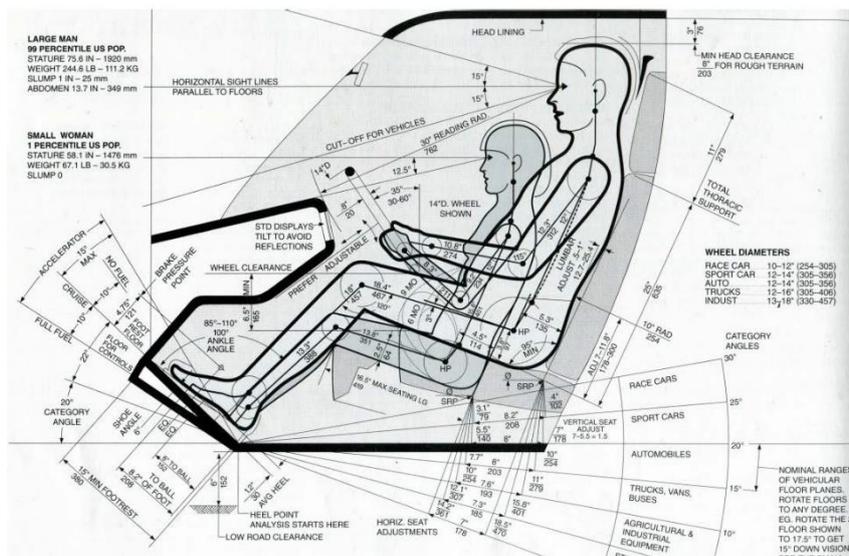


Figure 4 : paramètres influents sur la position du conducteur [7].

Afin de simplifier cette étude, la littérature s'est intéressée à la caractérisation des paramètres les plus influents et à la définition d'une position optimale de conduite. Les études de *Porter et al.* [8], *Kyung et al.* [9] et de *Schmidt et al.* [10] s'accordent sur l'utilisation de deux angles, appelés angles d'abduction et de subduction, présentés Figure 5, pour décrire la position du haut du corps. Il ne semble cependant pas qu'il y ait un réel consensus sur la position optimale du haut du corps du fait de la grande variabilité des morphologies et des habitudes de conduite des utilisateurs [10]. On retiendra d'après [10], qu'un angle de subduction autour de 30° et un angle d'abduction de 120° semble être une position moyenne confortable lors de la tenue du volant à deux mains. D'après un questionnaire proposé par *Giacomin et al.* [11] à un panel de 350 conducteurs, la position des mains sur le volant « 10h10 » est majoritairement préférée lors d'une conduite à deux mains. Sur le panel interrogé, 76% affirment conduire

principalement à deux mains, 12% seulement avec la main gauche et 12% seulement avec la main droite. En revanche, aucune précision n'est donnée sur le confort généré par la position des mains sur le volant. Dans la suite, l'étude de l'influence de la position sur la réponse du corps aux vibrations sera analysée plus en détails. Mais revenons tout d'abord sur la définition de l'environnement vibratoire automobile.

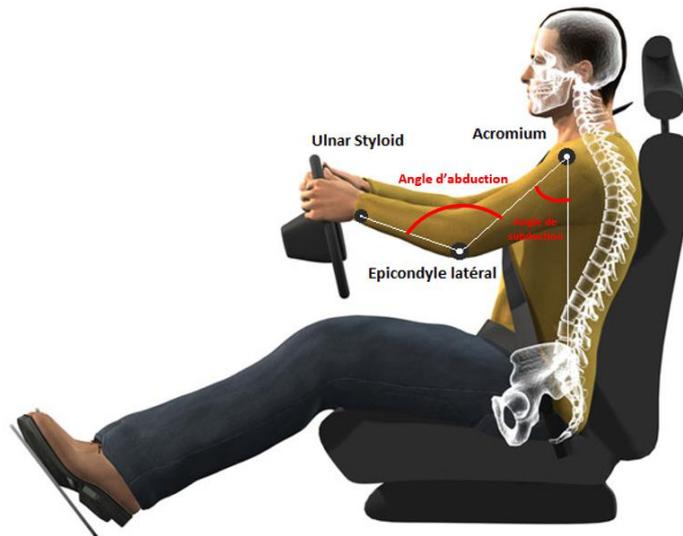


Figure 5 : caractérisation de la position du haut du corps.

## 2. L'environnement vibratoire automobile

Lors de la mesure des vibrations, les amplitudes d'excitations sont souvent représentées sur une échelle logarithmique du fait de la forte dynamique rencontrée. On définit alors la notion de dB vibratoire pour décrire l'amplitude de l'accélération, tel que :  $a_{dB} = 20 \log_{10} \left( \frac{a}{a_0} \right)$  avec  $a_0 = 10^{-6} m/s^2$  et  $a$  correspond à l'accélération en  $m/s^2$  [12]. Dans la suite du manuscrit, toutes les valeurs annoncées en dB correspondront à des dB vibratoires si aucune précision n'est apportée sur la référence utilisée ou écrit sous la forme  $dB_{vib}$ .

## 2.1 Les sources vibratoires automobiles

Lors d'un voyage automobile, les passagers sont principalement soumis à trois sources de bruits : le Groupe Motopropulseur (GMP), l'interface pneus/chaussée et la contribution aérodynamique. Cette dernière induit principalement du bruit dans l'habitacle lorsque le véhicule roule à une vitesse élevée et génère peu de vibrations à l'interface usager/véhicule. La contribution aérodynamique ne sera donc pas présentée dans ce manuscrit. Le GMP et la chaussée génèrent quant à eux des vibrations perceptibles par les conducteurs, dont le contenu d'excitation principal (fréquence, niveau et direction) est identifiable en fonction de la source. Afin de limiter le niveau d'excitation dans l'habitacle, il existe deux modes d'actions ; limiter l'excitation induite par la source ou atténuer sa propagation par les chaînes de transmissions. Dans ces deux champs d'action, l'étude des sources d'excitation est nécessaire.

### 2.1.1 Excitation route

En fonction du type de route (asphalte, pavés, dalles en béton) de la granulométrie du revêtement et des imperfections de la route, trois types d'excitations peuvent être engendrés :

- Bruit de roulement:

Le bruit de roulement est une excitation aléatoire, induite au niveau du contact pneus-chaussée. La répartition de l'énergie dans le domaine fréquentiel est directement liée à la granulométrie de la route. L'excitation vibratoire est principalement comprise entre 20 Hz et 400 Hz et l'excitation acoustique entre 400 Hz et 2 kHz.

- Percussions:

Les percussions sont des excitations transitoires, induites sous la forme de chocs créés par le passage des roues sur des raccords de revêtement, des plaques d'égout ou des aspérités de la route. Ces aspérités provoquent un ébranlement des trains, sollicitant directement les amortisseurs et la caisse. L'excitation vibratoire est comprise entre 10 Hz et 70 Hz et l'excitation acoustique entre 40 Hz et 250 Hz.

- Trépidations:

Lorsque le véhicule roule sur une route dégradée, le véhicule se met à vibrer dans une bande de fréquence comprise entre 5 Hz à 40 Hz, par l'intermédiaire des modes de trains, des modes de caisse, du GMP sur ses cales de suspensions et de l'habitacle (planche de bord, colonne de direction). On peut également noter que dans le cas particulier d'une déformation en grandes longueurs d'ondes de la route (amplitudes de l'ordre du mm) le véhicule peut être excité dans cette gamme de fréquences pour des vitesses d'environ 100 km/h, vitesse variant avec la longueur d'onde d'excitation de la route.

### 2.1.2 Le moteur à combustion interne

Lorsqu'un moteur est en fonctionnement, on dénombre principalement deux sources d'efforts internes : la combustion des gaz dans les cylindres et les effets d'inerties liés aux masses alternatives (pistons, bielle et vilebrequin). Dans un moteur à quatre cylindres et quatre temps, il se produit une explosion dans chaque cylindre tous les deux tours de vilebrequin. Ainsi, il y a deux explosions par tour de vilebrequin et l'excitation est  $4\pi$ -périodique. Afin d'exprimer la périodicité des phénomènes vibratoires, on introduit la notion « d'ordre moteur », noté  $H_N$ . Elle décrit le nombre  $N$  d'événements survenus durant un tour de vilebrequin. Selon cette nouvelle nomenclature, l'acyclisme moteur induit par l'explosion des gaz génère une excitation d'ordre 2, noté  $H_2$  et une fréquence fondamentale  $f_{H_2} = \frac{rpm}{30} Hz$ , où  $rpm$  correspond au nombre de tour de vilebrequin par minute. Pour les masses alternatives, les efforts produits sont proportionnels à la masse de la structure en mouvement et à son accélération. La plus forte variation d'accélération se produit lors du changement de direction du piston et génère un fort niveau de vibration. Si l'arrangement des cylindres est régulier, cet événement induit également une fréquence fondamentale d'excitation selon l'harmonique 2. Le même raisonnement peut être conduit pour un moteur à trois ou à six cylindres, conduisant à des harmoniques moteurs différents. Sur une plage d'utilisation classique du régime moteur (entre 800 et 6000 tr/min), le moteur conduit à des excitations principalement comprises entre 20 Hz et 200 Hz. A ces excitations harmoniques, d'autres sources peuvent s'ajouter, souvent liées à des imperfections du moteur. On note parmi elles le mauvais calage temporel des cycles de combustion, dont l'effet peut provoquer des efforts à composantes aléatoires. Ceci tend à générer un contenu spectral plutôt plat que l'on appelle

fond de spectre. Une grande variété d'excitations parasites peuvent apparaître, mais elles ne correspondent pas au fonctionnement nominal du moteur et sont souvent moins importantes que les effets d'acyclisme et des masses alternatives dont le contenu est harmonique.

## 2.2 Réponse dynamique du système de direction/volant

La vibration est transmise au volant par deux entrées d'effort différentes : l'extrémité de la colonne de direction et les points de fixation du support de colonne de direction sur la traverse de planche de bord, représenté sur la Figure 6. Ces deux voies de transmissions mettent en jeu des modes locaux différents du système de direction et génèrent des vibrations caractéristiques du volant. Plusieurs études se sont intéressées à la dynamique du volant et plus généralement celle du système de direction, parmi elles les études de *Shim et al.* [13], *Whang et al.* [14], *Britto et al.* [15] ou de *Chatterjee et al.* [16]. D'après *Shim et al.* [13] et *Chatterjee et al.* [16], la dynamique du système de direction peut être modélisée sous la forme d'un système masse-ressort-amortisseur à 6 degrés de liberté. A partir d'une base de mesures sur véhicule disponible au sein du groupe Stellantis et des études [14] et [16], on peut identifier 3 modes propres du système de direction :

- Mode 1 : déformation de la colonne de direction selon la direction **XZ**, présenté sur la Figure 6 (a). Sa fréquence propre se situe généralement entre 30 Hz et 50 Hz.
- Mode 2 : déformation de la traverse de planche de bord, entraînant à son tour un mode de déformation de la colonne de direction selon la direction **XY**, présenté sur la Figure 6 (b). Sa fréquence propre est systématiquement plus élevée que celle du *mode 1*. Elle se situe généralement entre 30 Hz et 60 Hz. Afin de limiter l'excitation vibratoire, les spécifications du Groupe Stellantis préconise une différence d'au moins 2 Hz entre les fréquences propres des *modes 1* et 2. Cette différence a pour vocation de limiter la superposition de ceux-ci et à terme l'excitation vibratoire.
- Mode 3 : mode de structure de la jante du volant. Il correspond à la déformation du haut de la jante du volant et induit une vibration principalement dans la direction **X**. Selon la matière, la taille et la géométrie du volant, sa fréquence propre peut varier entre 65 Hz et 100 Hz sur les véhicules du Groupe Stellantis.

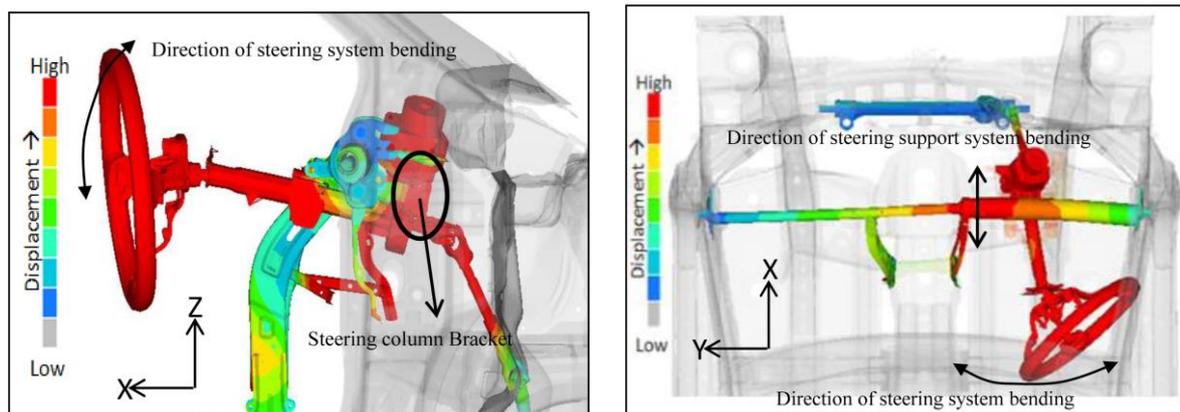


Figure 6 : modes propres de la colonne de direction selon [16]: (a) mode 1,  $f = 36 \text{ Hz}$  et (b) mode 2,  $f = 52 \text{ Hz}$ .

De la même manière, *Whang et al.* [14] proposent que le *mode 1* soit positionné entre 30 Hz et 35 Hz et le *mode 2* entre 35 Hz et 40 Hz afin que les modes ne se superposent pas. Indépendamment de la conception du système, ces deux modes peuvent varier en fréquence et en amplitude d'excitation du fait des réglages de la colonne de direction. Ces réglages sont accessibles au conducteur pour satisfaire sa position de conduite. En pratique, la mesure est réalisée dans la position la plus sollicitante. Elle correspond à la position pour laquelle le moment statique généré par la masse du volant sur le point de fixation de la colonne de direction est le plus important. Une comparaison des différentes marques et modèles de voitures a été réalisée au sein du groupe Stellantis afin d'évaluer l'influence de ce réglage sur la fréquence propre des modes. Sur les 35 véhicules testés, la fréquence propre du *mode 1* varie en moyenne de 2 Hz du fait de ces réglages. Cette étude montre également que la position la plus sollicitante est principalement la position « tirée-haute » de la colonne de direction. Dans la suite du manuscrit, cette position sera utilisée lors des expériences afin de décrire la situation vibratoire la plus inconfortable.

Si l'on compare à présent les bandes de fréquences d'excitation du GMP et la dynamique du système de direction, on peut voir qu'elles coïncident. En pratique, dans un cas d'usage « normal », sur une route ne présentant pas de grosses aspérités, le système de direction est peu excité par la chaussée. Comme on peut le voir sur la Figure 7, présentant la vibration du volant lors d'une montée en régime moteur en 3<sup>ème</sup> vitesse sur piste, l'excitation est majoritairement réalisée par l'harmonique principal moteur. On peut voir que le maximum

de l'excitation vibratoire est générée à des fréquences particulières. L'excitation est principalement générée entre 1200 rpm et 1500 rpm, avec un maximum autour de 40.2 Hz. La mesure du premier mode propre de la colonne de direction coïncide avec cette excitation. Le second mode apparaît autour de 47 Hz, pour lequel on peut également remarquer que l'excitation vibratoire est importante. Il est donc nécessaire d'étudier ces modes dont l'influence pourra être une source d'inconfort pour les conducteurs.

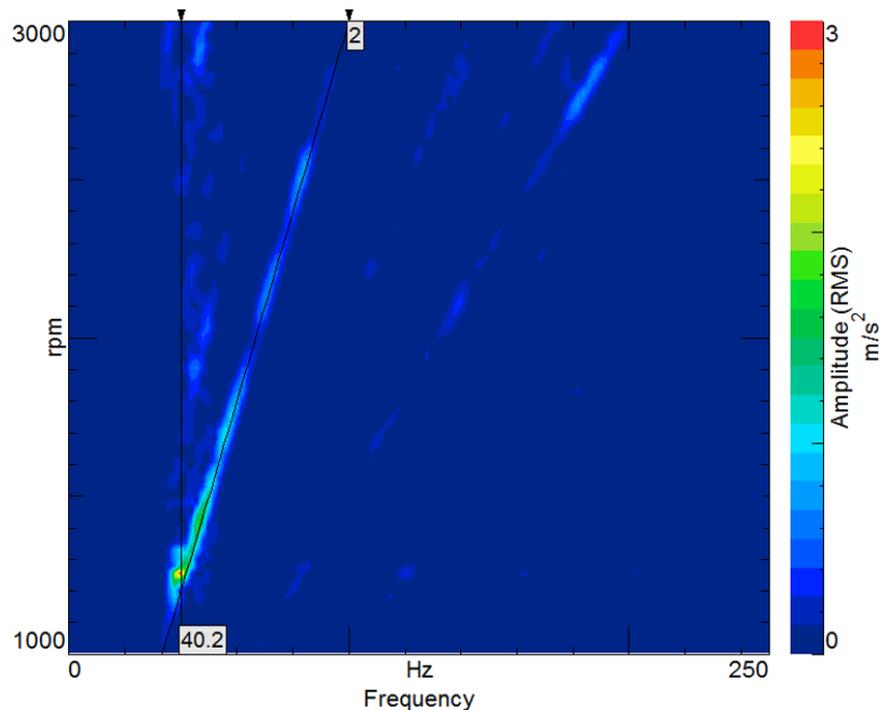


Figure 7 : représentation temps-fréquence de l'accélération mesurée sur la jante du volant lors d'une montée en régime moteur entre 1000 et 3000 tours/min.

Dans certaines conditions particulières, une chaîne dynamique différente peut être mise en jeu. L'une des situations principales est le balourd de roue. Sur une architecture classique de train, comme présenté sur la Figure 8, un déséquilibre sur une roue, représenté par  $F_{balourd}$ , génère un effort au niveau de la biellette. Cet effort est en partie dû au fait d'un déport à l'axe non nul entre l'axe du pivot et le centre de la roue et amplifié par le mode longitudinal de train avant. Il se transmet finalement au système de direction, se traduisant par des vibrations angulaires du volant, souvent appelées « Rotational vibrations » dans la littérature. Cependant, aujourd'hui ces vibrations sont peu présentes dans les véhicules. En effet, l'utilisation de directions assistées électriques tend à diminuer l'occurrence de ces

vibrations du fait de la faible réversibilité de ces systèmes. De plus, ces mouvements sont induits par un balourd de roue, donc ne correspondent pas à un état de fonctionnement nominal du véhicule. Le GMP reste donc la source principale de l'excitation vibratoire volant et pourra être, à terme, la source d'inconfort la plus importante pour les conducteurs.

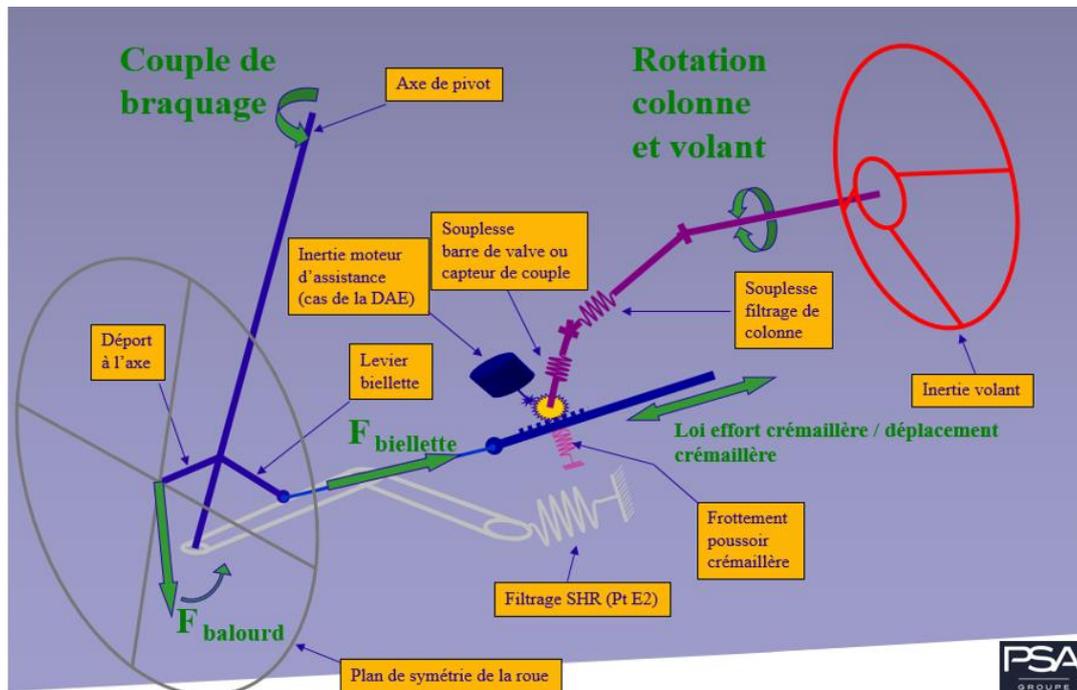


Figure 8 : Schéma cinématique des vibrations en rotation du volant.

Afin de caractériser l'excitation vibratoire du volant, un protocole de mesure existe au sein du Groupe Stellantis, sur lequel nous reviendrons plus en détail par la suite. Cette mesure est délicate car le volant et les mains forment un système mécanique couplé, dont la réponse vibratoire va certainement varier en fonction des utilisateurs. Afin de décrire ce couplage, il est tout d'abord nécessaire de définir le contact main-volant et plus largement le couplage simplifié main-poignée, puis de connaître la nature de la réponse dynamique de la main.

## 2.3 Couplage statique main-volant et réponse dynamique de la main

### 2.3.1 Contact Main-poignée

La norme ISO 8727 [17] définit trois directions d'excitation basées sur des points de repère biologique pour décrire les vibrations de la main, schématisées sur la Figure 9. L'étude de *Dong et al.* [18] décrit un ensemble de systèmes de coordonnées, dérivés de celui de la norme, afin de s'adapter à la géométrie de différents objets vibrants. Dans le cadre des vibrations induites par un volant automobile, le système de coordonnées suggéré par la norme est souvent utilisé.

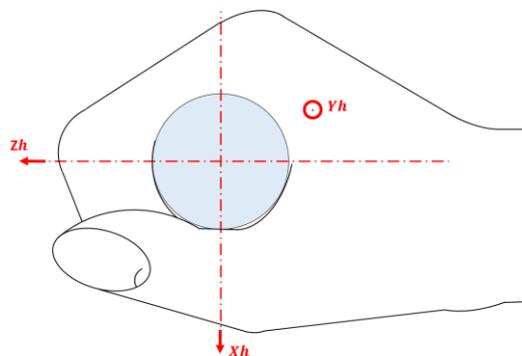


Figure 9 : système de coordonnées de la main d'après la norme ISO 8727 [17].

Afin d'évaluer le couplage statique entre une main et un objet vibrant, la norme ISO 15230 [19] décrit une méthode de mesure des efforts appliqués à l'interface main-poignée. Cette caractérisation est effectuée à l'aide d'une nappe de capteurs surfacique disposée à l'interface. Pour chaque capteur, on peut définir une force élémentaire  $F_{ci}$ , normale à la courbure géométrique de la poignée, comme schématisée sur la Figure 10, proportionnelle à la surface du capteur et à la pression mesurée. L'ensemble de ces capteurs permet donc le maillage en pression et en force du contact main-poignée.

A partir de ce maillage, la norme préconise le calcul de trois forces pour caractériser le couplage statique :

- La force de contact  $\vec{F}_c$ , définie comme la somme des forces élémentaires  $\mathbf{F}_{ci}$  :

$$\vec{F}_c = \sum \vec{F}_{ci}$$

Elle représente la résultante globale de l'effort appliqué.

- La force de poussée  $\vec{F}_{po}$ , qui représente la résultante de l'effort appliqué par la main sur la poignée. Cette force peut être évaluée dans chaque direction de l'espace et elle correspond à la projection de  $\vec{F}_c$  dans une direction choisie, par exemple la direction  $x_\alpha$ , schématisée sur la Figure 10. A partir de la schématisation,  $\vec{F}_{po}$  s'écrit donc de la façon suivante :

$$\vec{F}_{po} = \sum (\vec{F}_{ci} \cdot \vec{e}_\alpha) \vec{e}_\alpha$$

Généralement, cette force est évaluée dans l'axe d'utilisation de l'outil afin d'évaluer l'effort appliqué par l'utilisateur. Cette direction est souvent proche de la direction **Zh**.

- La force de préhension, notée  $\vec{F}_{pr}$  par relation au terme anglais « grip », correspond à la force de serrage de la poignée, schématisée sur la Figure 10. De la même façon que pour la force de poussée, cette force peut être évaluée dans toutes les directions de l'espace. La norme propose dans le cadre de la force de préhension une évaluation dans la direction qui maximise son amplitude. Il est donc possible que les directions d'évaluation de  $\vec{F}_{po}$  et de  $\vec{F}_{pr}$  soient différentes. Dans la pratique la direction qui maximise la résultante de préhension est également proche de **Zh**. Sur la Figure 10, cette force est représentée dans la direction  $x_\alpha$  afin d'améliorer la lisibilité de la figure. Cette force, évaluée sur une direction  $\vec{e}_\alpha$  s'exprime par la relation suivante :

$$F_{pr,e_\alpha} = \frac{1}{2} \max_{0 \leq \alpha \leq 2\pi} (\sum |\vec{F}_{ci} \cdot \vec{e}_\alpha| - \vec{F}_{po} \cdot \vec{e}_\alpha)$$

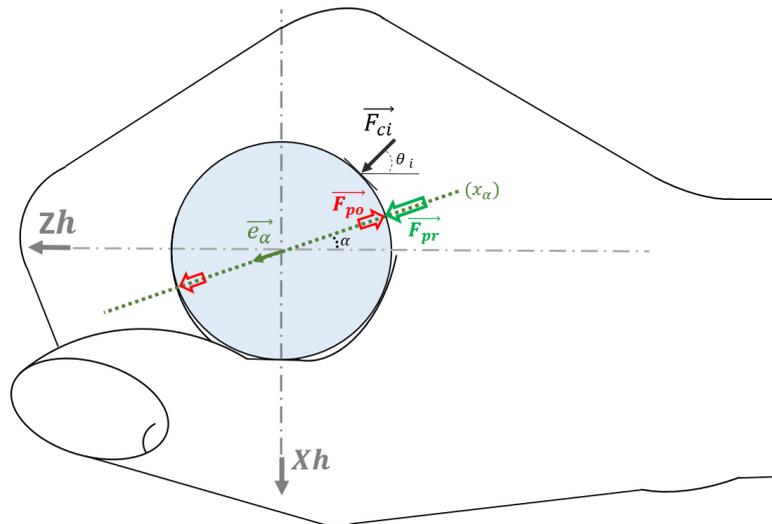


Figure 10 : Représentation géométrique des forces de poussée et de préhension évaluées sur l'axe  $x_\alpha$ .

La mesure de la force de contact donne une information sur l'effort global appliqué par la main sur la poignée. L'évaluation des forces de poussée et de préhension donnent quant à elles une information plus complète sur la façon dont la poignée est tenue. Ces deux forces sont donc souvent utilisées lors d'expériences subjectives afin de contrôler le contact entre main et poignée.

Dans le domaine automobile, *Eksioglu et al.* [20] et *Garinei et al.* [21] ont cherché à caractériser la nature du contact entre une main et un volant. L'étude de *Eksioglu et al.* s'est principalement intéressée à la mesure de la force de préhension, en fonction du type de revêtement de la route, de la vitesse et du genre des participants. Elle montre que l'effort moyen appliqué est de l'ordre de 58 N, correspondant à 31% de l'effort maximum applicable par les conducteurs de l'étude. Cependant, cette étude [20] ne s'est pas intéressée à l'effort de poussée, nécessaire à la caractérisation complète du contact main-volant. L'article de *Garinei et al.* [21] propose une étude plus détaillée des zones de pressions. En condition de conduite « normale », sur une route en ligne droite, la main applique une pression de l'ordre de 5 kPa principalement appliquée par les doigts. Dans une zone de virage, la pression appliquée augmente jusqu'à environ 10 kPa. Enfin, pour une condition de conduite critique, décrite comme un arrêt brutal ou une forte accélération, le maximum de la pression appliquée peut atteindre 30 kPa. Cette étude montre que le contact entre la main et le volant peut varier

en fonction de la situation de conduite. Cependant, cette étude n'a pas cherché à caractériser les efforts appliqués par la main dans chacune de ces situations.

### 2.3.2 Réponse biodynamique du bras

La Réponse Biodynamique de l'ensemble {main-bras} peut être quantifiée par l'impédance mécanique au point d'application, souvent notée  $Z$ . Elle est définie comme le rapport entre l'effort dynamique  $F(C, \omega)$ , et la vitesse  $V(C, \omega)$ , mesurée au point d'interface  $C$  entre la main et l'objet vibrant. Il est également possible de la définir sous la forme d'une mobilité, notée  $Y(C, A, \omega)$ .

$$Z(C, C, \omega) = \frac{F(C, \omega)}{V(C, \omega)} \quad ; \quad Y(C, A, \omega) = \frac{1}{Z(C, A, \omega)} = \frac{V(C, \omega)}{F(A, \omega)}$$

La mesure de l'impédance mécanique du système {main-bras} a été largement étudiée dans la littérature [22], [23], [24], [25] et [26]. Il existe à ce jour peu de consensus entre les mesures d'impédances réalisées. A titre d'exemple, la Figure 11 présente une série de mesures réalisées dans la direction **Zh**. On peut voir qu'à la fois la forme et les amplitudes de l'impédance varient beaucoup. Entre ces études, les conditions d'expériences sont différentes (position du bras, effort appliqué, différentes sources d'excitation). Les effets cumulés de ces paramètres expliquent certainement les écarts trouvés entre les mesures d'impédances mais cette représentation ne permet pas de les identifier clairement. Regardons plus en détails l'influence de ceux-ci lorsqu'ils sont contrôlés.

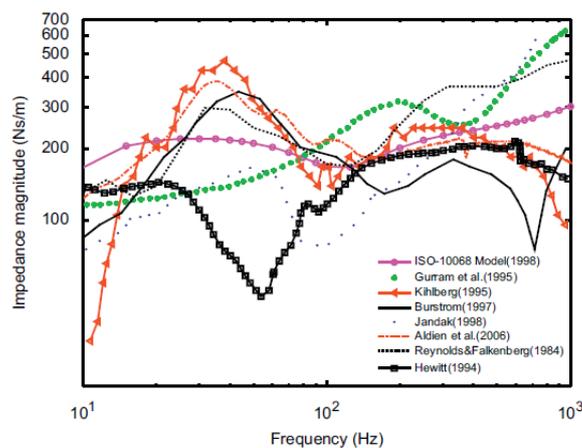


Figure 11 : Synthèse des mesures d'impédance dans la direction **Zh**. Extrait de [27].

### Influence de l'effort de poussée et de préhension

D'après les études de *Gurram et al.* [23], *Aldien et al.* [24], *Aldien et al.* [25] et de *Marcotte et al.* [28], une augmentation de l'effort de préhension conduit à une augmentation de l'impédance mécanique du bras et de sa fréquence de résonance. Par exemple, dans l'étude proposée par *Marcotte et al.* [28], un effort de préhension de 25 N induit une résonance du système bras autour de 40 Hz alors qu'un effort de 75 N induit une résonance autour de 50 Hz. Cette constatation peut s'expliquer par l'augmentation de la rigidité apparente du bras lors de l'augmentation de l'effort appliqué. Cet effet provoque ainsi une augmentation de la fréquence propre. *Dong et al.* [29] s'est également intéressée à l'influence de ces forces sur la réponse mécanique dans la direction **Zh** et propose d'étudier trois situations, *Push only*, *Grip only* et *Push+Grip*. Comme on peut le voir sur la Figure 12, l'effort appliqué a un impact sur la réponse mécanique de l'ensemble et la situation *Push only* semble se démarquer des deux autres situations.

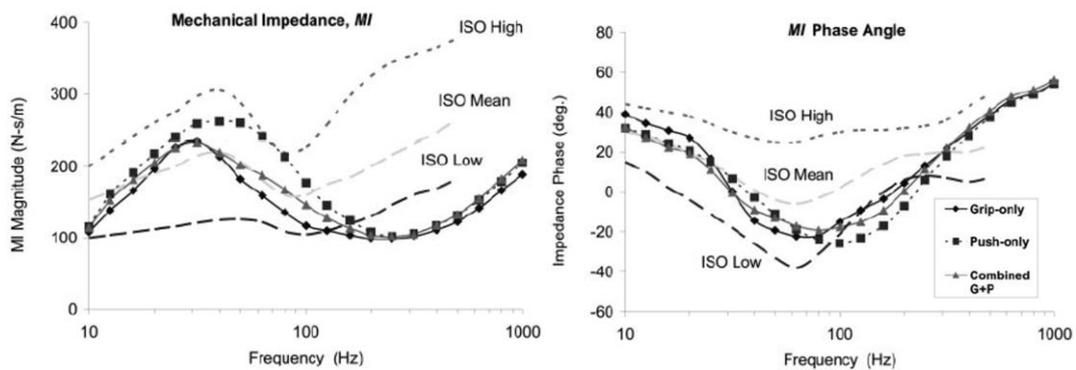


Figure 12 : Effet de l'effort statique appliqué sur l'impédance mécanique mesurée dans la direction **Zh** à l'interface main-poignée en comparaison des impédances proposées par la norme ISO 10068. Extrait de [29].

### Influence de la position du conducteur

*Aldien et al.* [24] [25] proposent d'étudier l'influence de la position des bras sur la réponse mécanique dans les directions **Xh** et **Zh**. Pour cela, les deux études décrivent deux positions du bras : coude plié à 90° et le bras tendu. Ces positions englobent la majeure partie des positions du haut du corps possible lors de la conduite automobile et apparaissent comme les deux positions pour lesquelles le comportement mécanique du bras risque d'être différent.

L'étude de *Aldien et al.* [24] montre que l'effet de la position sur l'amplitude de l'impédance est faible dans la direction **Xh**, affectant uniquement la phase en dessous de 30 Hz. En revanche, dans la direction **Zh**, l'influence de la position est importante à la fois sur la phase et sur l'amplitude. Comme on peut le voir sur la Figure 13, cet effet est important en basses fréquences puis diminue jusqu'à 30 Hz. Entre 30 Hz et 100 Hz, une inversion se produit et l'impédance devient plus importante dans la position *P1*. Enfin, lorsque la fréquence augmente encore, il semble que l'effet de la position devient négligeable.

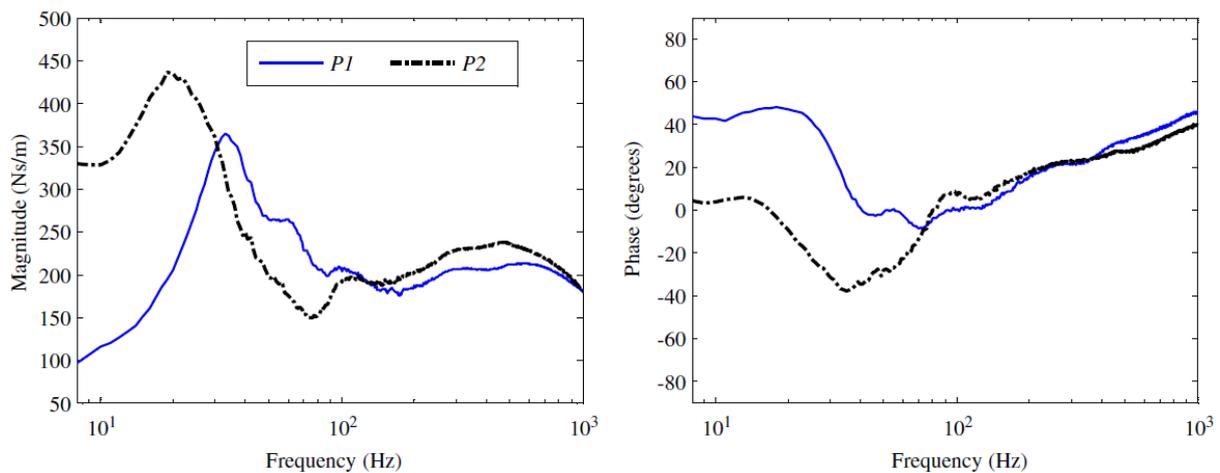


Figure 13 : influence de la position du bras sur la réponse mécanique dans la direction **Zh**. En position debout, *P1* correspondant au coude plié à 90° et *P2* au bras tendu. Extrait de [25].

#### Influence de la source d'excitation vibratoire

L'effet de l'amplitude des signaux a été caractérisé par *Lundstrom et al.* [30]. L'étude montre que l'augmentation de l'amplitude (de 27 mm/s à 53 mm/s, correspondant à 5 m/s<sup>2</sup> et 10 m/s<sup>2</sup> à 30Hz) tend à accroître l'impédance mécanique à basses fréquences et à la faire diminuer à hautes fréquences. Ce résultat est en accord avec ceux décrits dans les études de *Mishoe et al.* [31] et de *Burstrom et al.* [32], proposant qu'une augmentation d'amplitude induit une augmentation de la masse apparente du bras. L'effet de masse étant plus visible à basses fréquences qu'à hautes fréquences, ce résultat pourrait expliquer l'augmentation de l'impédance en basses fréquences. En revanche, dans l'étude proposée par *Aldien et al.* [24], l'influence du niveau d'excitation est négligeable dans la direction **Xh** et le même résultat est trouvé dans la direction **Zh** [25]. Dans ces expériences, les niveaux d'excitation varient entre 2.5 et 5 m/s<sup>2</sup>, soit nettement inférieures à ceux utilisés par Lundstrom. Il est donc possible que

les niveaux d'excitations ne soient pas suffisant pour générer une modification de l'impédance mécanique. Cette plage d'excitation est proche de celle rencontrée pour un volant automobile, avec des niveaux pouvant aller jusqu'à  $5 \text{ m/s}^2$  dans les cas les plus extrêmes et une bande passante de l'ordre de 30 Hz à 100 Hz. Ainsi, il est possible de considérer que la réponse biodynamique du bras est indépendante de l'amplitude vibratoire dans cette situation.

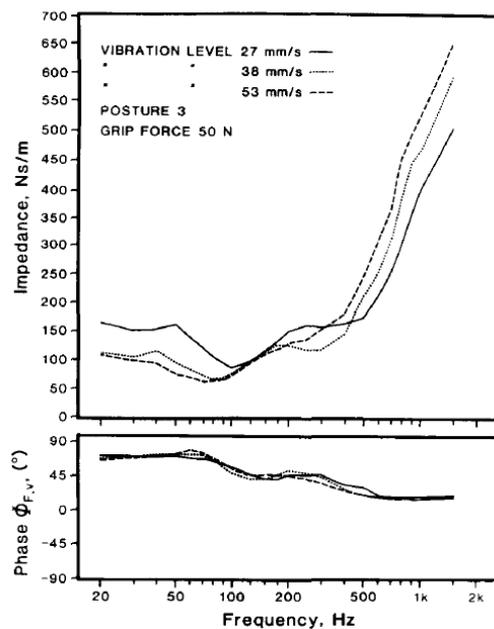


Figure 14 : influence du niveau d'excitation sur l'impédance mécanique mesurée à l'interface main-poignée pour la Posture 3 (analogue à une excitation dans la direction **Zh**). Extrait de [30].

### La norme ISO 10068

Les différents points évoqués précédemment ont montré une certaine variabilité de l'impédance en fonction de l'effort appliqué et du niveau d'excitation. La norme ISO 10068 [33] propose de décrire l'impédance mécanique sous la forme d'une courbe d'impédance moyenne et d'une enveloppe composée d'une impédance minimum et maximum, présentées Figure 15. Ces enveloppes ont pour vocation d'englober une grande majorité des mesures réalisées dans la littérature. Comme on peut le voir, les écarts entre les courbes sont équivalents dans les trois directions d'excitation, proportionnellement aux amplitudes proposées. On peut également remarquer que l'impédance est sensiblement plus faible dans la direction **Yh** par rapport aux deux autres directions. Dans la direction **Zh**, la norme décrit un

phénomène de résonance très marqué autour de 40 Hz. Ce mode a été largement décrit dans la littérature, notamment au travers des travaux de *Aldien et al.* [25] ou lors de la description du comportement mécanique du corps de Griffin [34].

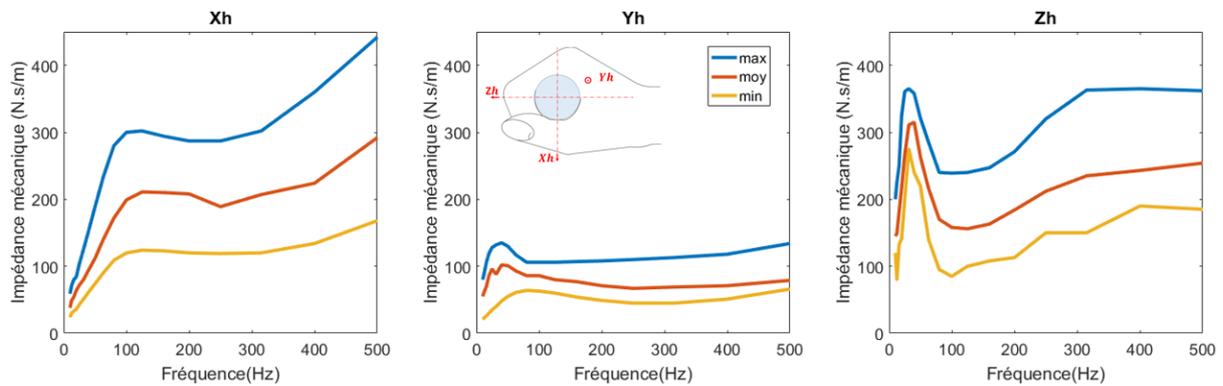


Figure 15 : Impédance mécanique dans les directions  $X_h$ ,  $Y_h$  et  $Z_h$ , selon la norme ISO 10068 [33].

Ces courbes permettent ainsi de tenir compte des différences existantes entre les études. Elles décrivent le comportement vibratoire du bras d'un panel d'hommes, pour les conditions suivantes :

- Poignée circulaire d'un diamètre compris entre 19 et 45 mm
- Gamme de fréquence : 10 – 500 Hz
- Effort de poussée inférieur à 50 N
- Effort de préhension compris entre 25 et 50 N
- Une position du bras respectant les conditions décrites Figure 16

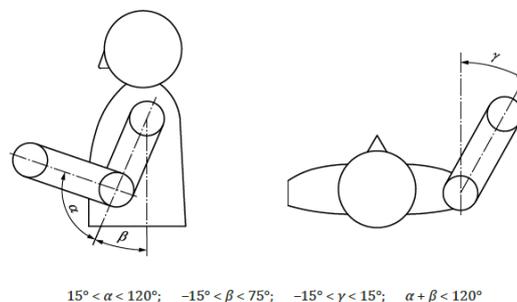


Figure 16 : positions du bras préconisées pour l'utilisation de la norme ISO 10068 [33]

La norme propose également des représentations mécaniques sous la forme de systèmes masses-ressorts-amortisseurs, avec plusieurs degrés de liberté (entre 2 et 5) dont la réponse mécanique est proche de celle du système main-bras. Une même représentation mécanique est choisie pour décrire le comportement de la main dans les trois directions de l'espace. Cependant, les paramètres de cette représentation sont choisis pour chaque direction d'excitation, de sorte à représenter au mieux le comportement mécanique dans chacune d'elles. La Figure 17 montre un exemple de ces modèles (ici à quatre degrés de liberté).

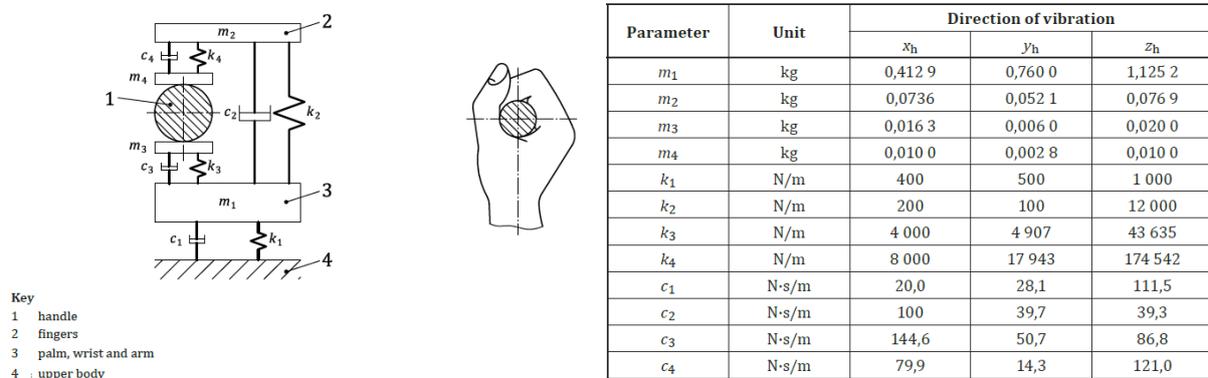


Figure 17 : Modèle à 4 degrés de libertés. D'après la norme ISO 10068 [33].

Les études de *Reynolds et al.* [35] [36] et *Wood et al.* [37] ont montré qu'il était possible d'estimer l'impédance mécanique par un modèle de ce type et de décrire le comportement mécanique de la main par un système à au moins deux degrés de libertés. L'étude de *Adewusi et al.* [27] a également montré la validité de ces hypothèses par la construction d'un ensemble masse-ressort-amortisseur physique afin de vérifier les similarités de son comportement dynamique avec celui du bras. De la même manière qu'un grand nombre de courbes d'impédance existe, une multitude de modèles ont été construits. Ils présentent des formes et des complexités différentes, en fonction des paramètres d'influence présentés précédemment : la position du bras [38], le couplage main-poignée [39] [40], le niveau d'effort appliqué ou la méthode d'optimisation de la corrélation modèle-mesure [41], [38] et [42]. Dans un contexte automobile, l'utilisation des courbes d'impédance proposées par la norme ISO 10068 [33] semblent raisonnable. Elles permettent d'encadrer les différentes mesures proposées par la littérature et de tenir compte des différences interindividuelles. Lors d'une conduite en condition réelle, le contrôle des paramètres d'influence est compliqué et il semble

nécessaire d'utiliser un modèle qui soit le plus général possible. De plus, les plages d'utilisation de ces modèles sont adaptées à la position moyenne au poste de conduite, à savoir un angle de subduction de l'ordre de  $10^\circ$  et un angle de flexion autour de  $120^\circ$ . Il semble donc que les impédances proposées par la norme pourraient permettre de décrire le comportement mécanique des bras d'un conducteur moyen. Cependant, à notre connaissance aucune étude n'a encore cherché à appliquer ces modèles dans un contexte automobile.

## 2.4 Synthèse

Lors de la conduite, les conducteurs sont soumis à des excitations vibratoires au travers du volant. On notera en particulier les fréquences de résonance du système de direction, entre 30 Hz et 60 Hz. Ces différents modes sont principalement excités par le Groupe Motopropulseur, dont il est possible de prédire l'excitation en fonction du régime moteur du véhicule. Ainsi, certains cycles du véhicule génèrent une vibration importante sur le volant dans les trois directions de l'espace. Lorsque l'excitation est générée par un défaut lié à une déformation de la chaussée, les vibrations induites correspondent à une rotation du volant. Cependant, ces phénomènes tendent à être moins fréquents aujourd'hui du fait de la présence des directions assistées électriques. L'excitation est donc principalement réalisée par le moteur, sur une bande de fréquence entre 30 Hz et 100 Hz. Dans cette gamme de fréquence, la réponse mécanique des bras ou des mains est importante. En effet, la littérature a montré que des phénomènes de résonance tendaient à apparaître dans cette gamme d'excitation. Les différentes études ont également montré qu'il existe une forte variabilité individuelle et que la réponse mécanique du bras peut varier en fonction de la direction d'excitation ou de la nature du contact avec la poignée. Ainsi, la norme ISO 10 068 propose un modèle sous la forme d'un ensemble de courbes afin de représenter un maximum de situations.

La concordance entre les fréquences des modes propres du système de direction et du système main-bras pousse à penser que l'inconfort généré par les vibrations du volant pourraient être amplifiées. Afin d'évaluer l'inconfort apporté par les vibrations du volant, revenons tout d'abord sur les mécanismes de perception.

## 3 Perception des vibrations

### 3.1 Les systèmes perceptifs

Lors de la conduite automobile, les vibrations sont principalement perçues par trois interfaces : le plancher, le siège et le volant. Le corps est alors soumis aux vibrations et plusieurs mécanismes de perception peuvent être engagés en fonction de la zone d'exposition et du type de vibration. Par exemple, une vibration de faible intensité aura un effet localisé autour de la zone de contact, sur la peau et les premières couches de derme. Une vibration plus importante pourra quant à elle exciter une plus grande partie du corps. Il n'existe pas d'organe propre à la perception des vibrations mais un ensemble de mécanismes qui apportent des informations sur la position du corps dans l'espace ou sur sa mise en mouvement.

On peut les classer en fonction de leurs propriétés dans les catégories suivantes :

- La vision : à très basse fréquence, la vue est mise à contribution dans la perception des vibrations. En effet, la visualisation d'un objet en vibration peut donner une information sur la situation vibratoire. Par exemple, lorsque le rétroviseur central vibre, le déplacement du miroir peut être une source d'information pour le conducteur sur la vibration globale du véhicule. Cette source est liée au déplacement relatif de l'objet, donc décroît rapidement avec l'augmentation de la fréquence.
- La proprioception : elle permet la visualisation du corps dans l'espace. Ainsi, la mise en mouvement de parties localisées du corps peut être une source d'information.
- Le système vestibulaire : il permet l'orientation du corps dans l'espace par sa forte sensibilité aux variations d'accélération dans les 6 degrés de liberté de l'espace. Il est principalement actif à basse fréquence ( $f < 5$  Hz).

Le système vestibulaire permet la détection des vibrations lorsque le corps entier est sollicité, généralement par l'intermédiaire d'un siège ou d'une plateforme vibrante. Ces vibrations ne seront pas traitées dans cette thèse, car l'axe de discussion est principalement porté sur la perception à travers les mains. Lors d'une transmission à l'interface main(s)-volant, les mécanorécepteurs présents dans le derme de la peau sont la source principale d'information. Ces vibrations peuvent être perçues par l'ensemble des zones de contact entre l'objet vibrant et le corps.

### 3.1.1 Les mécanorécepteurs

Il existe quatre types de mécanorécepteurs dans le derme de la peau : les corpuscules de Pacini, de Merkel, de Meissner et de Ruffini. Comme on peut le voir Figure 18, ils se trouvent dans différentes stratifications du derme. Ces récepteurs permettent la sensibilité cutanée à savoir le toucher, la pression et les vibrations.

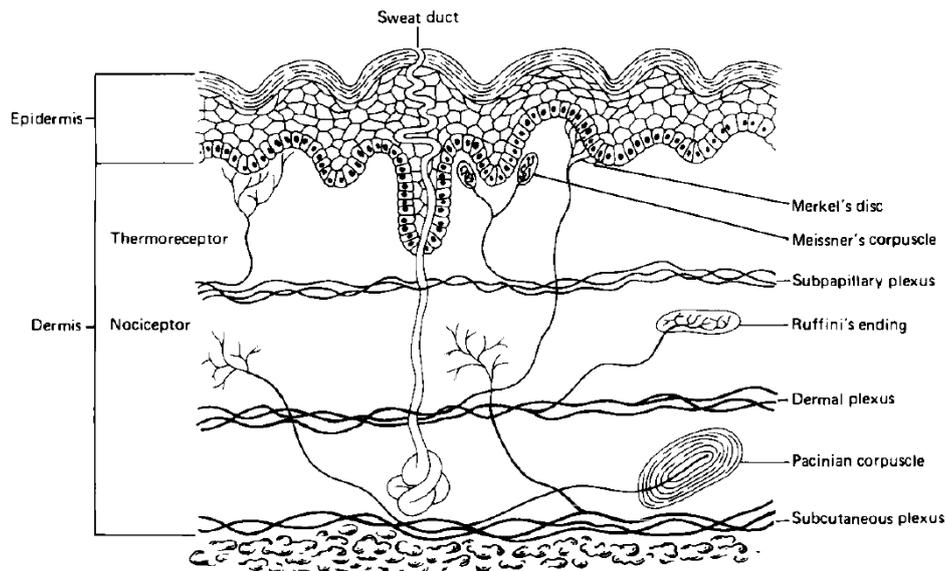


Figure 18 : position des mécanorécepteurs dans le derme de la peau d'après Griffin [34].

De nombreuses études sur les mécanorécepteurs ont permis de classer ces récepteurs selon leurs propriétés:

- Temps d'adaptation : adaptation rapide (appelés FA, pour Fast adapting) ou adaptation lente (appelés SA, pour Slow adapting). Un récepteur à adaptation rapide génère une série d'impulsions lors d'une variation de l'excitation vibratoire alors qu'un récepteur à adaptation lente génère un signal tant que le stimulus est actif.
- Réponse en fréquence : souvent classé en deux catégories (mécanorécepteurs Pacinien ou Non Pacinien) en référence à la réponse de ces capteurs aux fréquences supérieures à 40 Hz, lorsque la surface d'excitation de la peau est supérieure à 3 cm<sup>2</sup>.
- Intégration temporelle ou spatiale : capacité à accroître sa sensibilité de détection d'une vibration en fonction du temps ou de la surface d'exposition.

Le Tableau 2 présente ces différentes propriétés en fonction du type de récepteur. Comme on peut le voir, les récepteurs ont des gammes de fréquences de fonctionnement différentes, par exemple basses fréquences pour les récepteurs de Ruffini et hautes fréquences pour les récepteurs de Pacini.

Type of tactile channel	Associated neural receptors	Physiological characteristics	Frequency range response small contactor (0.008 cm <sup>2</sup> )	Frequency range response large contactor (2.9 cm <sup>2</sup> )	Frequencies of max sensitivity	Shape of threshold function	Spatial summation	Temporal summation
Pacinian (P) *	Pacinian corpuscles	fast adapting (FA 2)	none	high freq. (40 + 700 Hz)	250 + 300 Hz	U-shape	YES	YES
Non-pacinian (NP I) **	Meissner corpuscles	fast adapting (FA 1)	low freq. (3 + 100 Hz)	low freq. (3 + 35 Hz)	30 + 50 Hz	flat	NO	NO
Non-pacinian (NP II) ***	Merkel disks	slow adapting (SA 1)	high freq. (15 + 400 Hz)	none	250 + 300 Hz	U-shape	YES	YES
Non-pacinian (NP III) ****	Ruffini cylinders	slow adapting (SA 2)	low freq. (0.4 + 3 Hz)	low freq. (0.4 + 3 Hz)	0.4 + 2 Hz	flat	NO	NO

\* Verrillo (1985). \*\* (Talbot *et al.*, 1968; Mountcastle *et al.*, 1972). \*\*\* (Labs *et al.*, 1978; Gescheider *et al.*, 1985). \*\*\*\* (Bolanowski and Gescheider, 1988).

Tableau 2 : classification des mécanorécepteurs selon leur propriétés [43].

L'étude de Bolanowski *et al.* [44] s'est intéressée à la mesure du minimum de détection des vibrations pour chaque mécanorécepteur, c'est-à-dire à l'évaluation du niveau d'excitation minimum à partir duquel la vibration est perçue. Comme on peut le voir sur la Figure 19, la réponse en fréquence de chaque récepteur est différente, tant sur la plage d'activation fréquentielle que sur le niveau minimum requis pour que la vibration soit perçue.

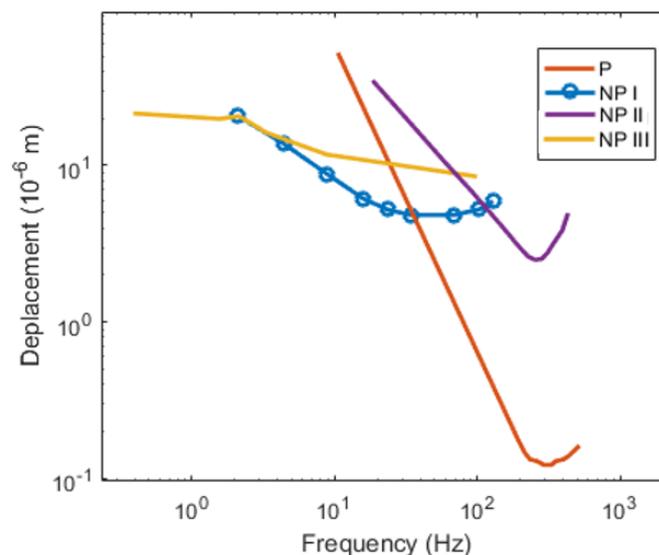


Figure 19 : Minimum de détection absolu pour chaque mécanorécepteur, redessiné d'après Bolanowski *et al.* [44].

Cependant, toutes les courbes ont une forme similaire, appelée U-shape et présentent un minimum global plus ou moins marqué. Au-dessus de 40 Hz, les vibrations sont principalement perçues par les récepteurs paciniens, dont la sensibilité est nettement supérieure. De plus, ces récepteurs sont particulièrement sensibles au temps d'exposition dont l'effet va être d'accroître leur sensibilité. Cet effet a une influence significative jusqu'à 1 seconde de stimulation [45] et peut être décrit par le modèle proposé par *Zwislocki* [46] :

$$shift\ threshold\ (dB) = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{1}{1 - e^{-\frac{t}{\tau}}} \right), \tau = 0.2\ s$$

D'après cette relation, le minimum de détection va donc décroître avec l'augmentation du temps d'exposition. On notera qu'entre une exposition de 1 ms et de 1 s, le minimum de détection pourra décroître d'environ 13 dB. De la même manière, l'effet de sommation spatiale tend à accroître la sensibilité des récepteurs paciniens [47]. Lorsque la surface de contact augmente, un effet d'intégration spatiale des récepteurs tend à augmenter leur sensibilité. Cet effet est significatif jusqu'à une surface de 2.9 cm<sup>2</sup> mais il n'existe pas de modèle à notre connaissance pour décrire cet effet.

Les différentes courbes présentées ci-dessus ont été mesurées dans des conditions de laboratoire, grâce à des contacteurs piézo-électriques de petite taille permettant d'isoler chaque mécanorécepteur. Lors d'une excitation dans une situation réelle, la surface de contact est généralement plus grande, sollicitant un ensemble de mécanorécepteurs. Le minimum de détection va donc évoluer selon la surface et la zone de la main excitée.

## 3.2 Minimum de sensation

Griffin [48] propose une synthèse des mesures de minimum de détection pour plusieurs types de contact : poignée vibrante (*Grip*), plaque vibrante (*Palm*) et vibration tactile (*Fingertip*). Comme on peut voir sur la Figure 20, la nature du contact a un effet sur le minimum de détection. On remarque que les situations *Grip* et *Palm* donnent des résultats similaires alors que la situation *Fingertip* apporte des résultats différents. En dessous de 40 Hz, la sensibilité est plus grande lorsque seul un doigt est excité, puis une inversion se produit au-dessus de 40 Hz. Cette tendance pourrait s'expliquer par le phénomène de sommation spatiale, principalement actif pour les conditions *Palm* et *Grip*. Ce phénomène agit en majorité

pour les récepteurs de Pacini, dont la sensibilité est importante au-dessus de 40 Hz. Il est donc important de tenir compte du type de contact entre la main et l'objet vibrant lors de l'étude du minimum de détection absolu.

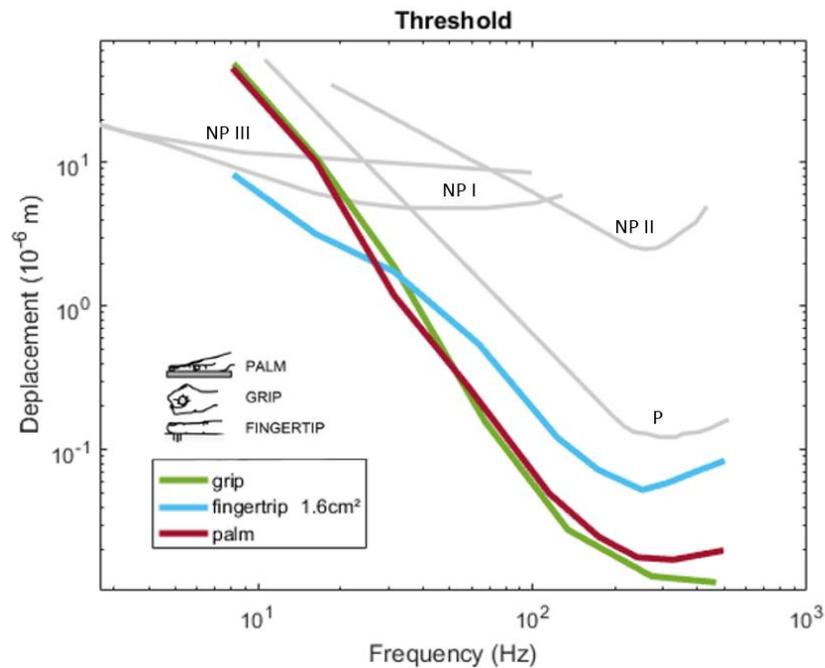


Figure 20 : Minimum de détection absolu en fonction du contact entre main et objet vibrant, réalisé à partir de [44] et de [48].

Parmi les contacts présentés ci-dessus, celui qui se rapproche le plus du cas du volant automobile est la poignée vibrante. La Figure 21, présente une synthèse sur les mesures de minimum de détection dans cette configuration. Comme on peut le voir, on retrouve une forme en U avec un seuil de détection compris entre 0.01 et 0.1 m./s<sup>2</sup>. On peut également remarquer que les courbes proposées par Reynolds et al. [49] sont particulièrement en écart avec le reste de la littérature.

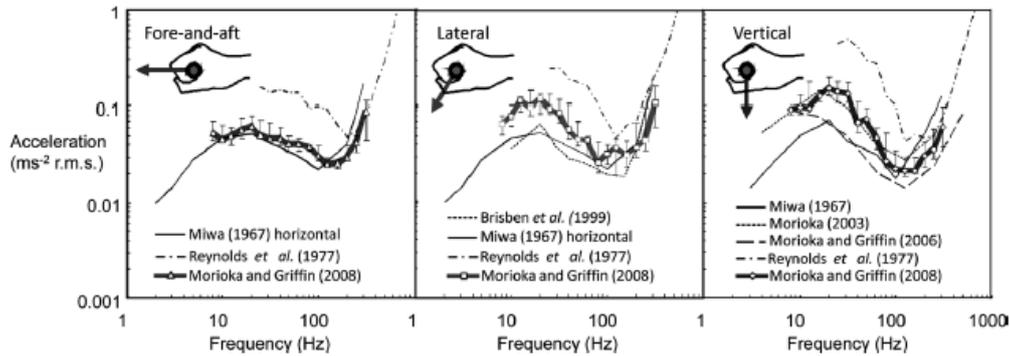


Figure 21 : Synthèse des mesures de minimum de détections dans 3 directions d'après [48].

D'après l'étude de Morioka et al. [50], les courbes de minimum de détection dans les trois directions de l'espace sont très similaires au-dessus de 40 Hz, comme présenté dans la Figure 22. En dessous de cette fréquence, la direction **Zh**, appelée « fore-and-aft » est légèrement plus sensible que les deux autres directions. Ces courbes seront prises comme référence du minimum de détection absolu dans la suite de l'étude.

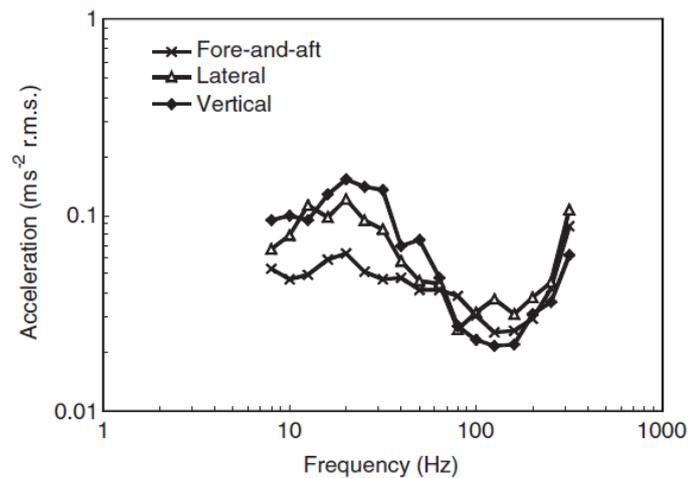


Figure 22 : Minimum de détection absolu dans les trois directions de l'espace, Fore-and-aft, Lateral et Vertical, correspondantes aux directions **Zh**, **Yh** et **Xh** de la norme ISO 8727. D'après [50].

Lorsque le niveau d'excitation dépasse ces minima, la sensation produite dépend fortement de la fréquence [51], [52], [49]. En effet, comme on peut le voir sur la Figure 23, il semble que la sensation décroît fortement avec l'augmentation de la fréquence. Afin de décrire cette

dépendance et de prévenir les risques sur la santé liés aux expositions vibratoires, ces études ont conduites à la création de la norme ISO 5349 [53].

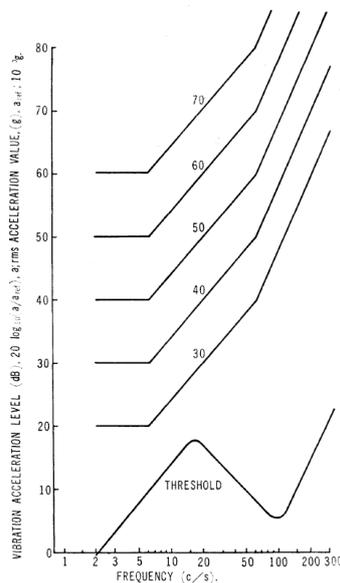


Figure 23 : courbes d'iso-sensations pour des vibrations de la main dans la direction  $Xh$ , référence 20 Hz. D'après [51].

### 3.3 La norme ISO 5349

La norme ISO 5349 [53] vise en premier lieu à protéger les utilisateurs d'objets vibrants, soit du fait d'une forte excitation vibratoire ou lors d'une utilisation prolongée de ces outils. Elle peut également être utilisée pour décrire la perception des vibrations à travers les mains. Afin d'y parvenir, la norme décrit la mesure des vibrations à l'interface main/objet et la construction d'un index d'inconfort. Elle s'applique principalement au traitement des vibrations périodiques et aléatoires stationnaires, dans une bande de fréquences comprises entre 8 Hz et 1000 Hz. En revanche, elle est peu adaptée aux phénomènes transitoires.

La norme préconise ainsi la procédure d'essais suivante pour caractériser l'accélération perçue :

- Mesure de l'accélération dans les trois directions de l'espace,  $Xh$ ,  $Yh$  et  $Zh$ , le plus proche de l'interface main/poignée :  $\{a_x, a_y, a_z\}$
- Utilisation de la pondération fréquentielle  $Wh$ , représentée sur la Figure 24 :

$$\forall i \in [x, y, z], \quad a_{Wh_i} = a_i \cdot Wh$$

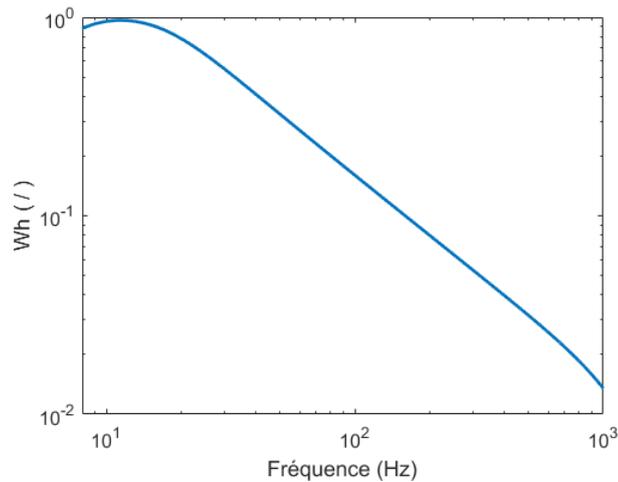


Figure 24 : pondération **Wh** proposée par la norme [53].

- Calcul de la moyenne quadratique des trois accélérations pondérées

$$a_{pondéré} = \sqrt{a_{Wh_x}^2 + a_{Wh_y}^2 + a_{Wh_z}^2}$$

- Prise en compte du temps d'exposition par la construction de l'indicateur  $A(8)$  :

$$A(8) = a_{pondéré} \sqrt{\frac{T}{T_0}}, T_0 = 28800 \text{ s (soit 8 heures ou environ une journée de travail)}$$

Comme on peut le voir sur la Figure 24, la pondération **Wh** décrit l'évolution de la sensation en fonction de la fréquence. Elle présente un maximum de la sensation autour de 12 Hz puis une décroissance de la sensation avec l'augmentation de la fréquence de l'ordre de 20 dB/décade. Cette décroissance est cohérente avec les résultats proposés sur la Figure 23. A partir de cette méthode, il est possible de tenir compte de la dépendance fréquentielle et du temps d'exposition. L'objectif principal de l'indicateur  $A(8)$  est de prévenir les risques sur la santé liés au temps d'exposition et à l'amplitude de l'excitation. Cette procédure est largement utilisée dans l'industrie dans une logique de protection des utilisateurs d'objets vibrants. Cependant, la pondération **Wh** semble peu adaptée dans l'évaluation du confort [54], [50], [55]. Ces études ont remis en cause son utilisation en proposant des pondérations corrigées et des courbes d'iso-sensation dépendantes de la fréquence, du niveau et de la direction d'excitation.

### 3.4 ISO-sensations

L'étude de *Morioka et al.* [50] s'est intéressée à l'influence des vibrations induites par une poignée vibrante tenue à une main sur la sensation d'inconfort pour chaque direction de l'espace (**Xh**, **Yh**, **Zh**). Comme on peut le voir sur la Figure 23, il semble que l'augmentation du niveau d'excitation modifie la dépendance en fréquence de la sensation.

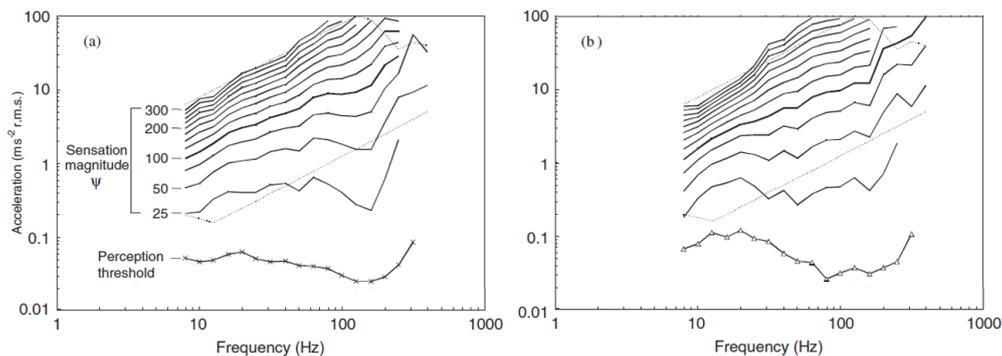


Figure 25 : courbes d'iso-sensations, excité dans la direction verticale, correspondant à **Xh** (a) et dans la direction latérale, correspondante à **Yh** (b). Figure modifiée d'après Fig.6 de l'article [50].

#### 3.4.1 Influence de la direction d'excitation

La Figure 26 (a) présente une série de courbes d'iso-sensation proposée par *Morioka et al.* [50]. Comme on peut le voir, en dessous de 50 Hz la sensibilité est plus importante dans les directions **Yh** et **Zh** par rapport à la direction **Xh**. Au-dessus de 60 Hz, une inversion de cette tendance apparaît. Ces courbes décrivent la sensation des vibrations lorsqu'une main est en contact avec une poignée vibrante. Dans une situation plus proche d'une sollicitation automobile, *Amman et al.* [54] proposent d'étudier la perception des vibrations induites par un volant tenu à deux mains dans les trois directions de l'espace. Dans cette étude, les directions d'excitations sont différentes de celles étudiées par Morioka, proposant un repère adapté au volant et à la position de la colonne de direction. Amman propose tout de même une comparaison entre les directions testées {latérale, verticale, longitudinale} et {**Xh**, **Yh**, **Zh**}. Selon lui, l'effet de la direction d'excitation est significatif, avec une sensation plus faible dans la direction latérale par rapport aux directions verticale et longitudinale, comme on peut le voir Figure 26 (b). Si l'on compare les résultats de ces deux études, les résultats ne sont pas concordants. En effet, Amman suggère que la direction latérale (analogue à **Yh**) est la direction

la moins sensible alors que Morioka suggère que ce soit principalement **Xh** (analogue à la direction verticale). La dépendance de la sensation en fonction de la direction d'excitation n'est donc pas clairement établie. Cependant, l'utilisation d'une unique pondération, comme proposée par la norme, semble peu appropriée.

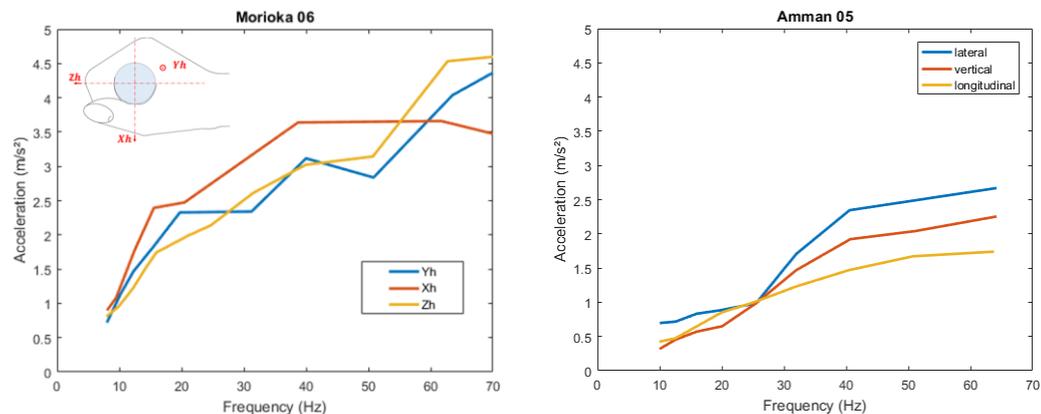


Figure 26 : Courbes d'iso-sensation redessinées d'après Morioka et al. [50] (a) et Amman et al. [54] (b).

### 3.4.2 Influence de l'amplitude d'excitation

Il est admis que plus l'amplitude de la vibration est grande et plus la situation est inconfortable. Cet effet a été décrit et quantifié par Stevens. Lors de l'étude des relations entre une sensation et une stimulation, la loi de Stevens [56] est très largement utilisée en psychophysique. Elle s'exprime sous la forme d'une loi de puissance :

$$\Psi = k\varphi^n$$

Où  $k$  est une constante, l'exposant  $n$  représente l'évolution de la sensation d'intensité  $\Psi$  et est l'intensité de la stimulation est représentée par  $\varphi$ .

Il existe de nombreuses procédures expérimentales permettant d'établir cette relation. La méthode d'estimation de grandeur [57], [58], est l'une d'entre elle et présente plusieurs avantages. Elle permet par exemple de contourner les biais liés aux effets de valeurs critique de l'échelle grâce à l'utilisation d'une échelle non bornée.

L'étude proposée par *Morioka et al.* [50] s'est intéressée au calcul des exposants de Stevens pour une poignée circulaire sur une plage fréquentielle de 8 Hz à 400 Hz. Elle conclut que l'exposant de Stevens est systématiquement inférieur à 1, avec des valeurs comprises entre 0.75 à 8 Hz et 0.14 à 400 Hz, présentés direction par direction en Figure 27 (a). Comme on peut le voir, l'exposant décroît avec l'augmentation de la fréquence jusqu'à 150 Hz. Au-delà de cette fréquence, l'exposant ne varie plus beaucoup dans les directions **Xh** et **Yh** et tend à augmenter en **Zh**.

Dans le cadre d'un volant tenu à deux mains, *Morioka et al.* [55] proposent d'évaluer la perception de vibrations induites par une double poignée en bois représentant un volant automobile. L'étude est conduite sur une gamme de fréquences entre 4 Hz et 250 Hz, une dynamique proche de celle d'un volant et pour différents efforts de préhension. Ici la direction d'excitation est une combinaison de **Xh** et **Yh**. Dans cette configuration, l'article conclut que les lois de puissance définies par Stevens décrivent correctement la sensation et que l'effet de la fréquence est significatif. L'exposant du modèle atteint sa valeur maximale à 31,5 Hz, oscillant entre 1 et 1.2 en fonction des situations comme on peut le voir sur la Figure 27 (b). Ces valeurs sont très différentes de celles précédemment proposées par *Morioka et al.* [50] dans le cadre d'une poignée tenue à une main. Cette nouvelle étude [55] note également une interaction entre le niveau et la fréquence d'excitation. En effet, pour produire une faible sensation identique à 31.5 Hz ou à 63 Hz, le niveau doit être plus élevé à 31.5 Hz qu'à 63 Hz. A l'inverse, pour produire une forte sensation, le niveau doit être plus faible à 31.5 Hz qu'à 63 Hz. Comme on peut le voir sur la Figure 27, le grip a un effet significatif sur l'exposant de Stevens à certaines fréquences particulières (125 Hz et 250 Hz) avec une tendance à une diminution de l'exposant avec l'augmentation du grip. Par ailleurs, la dépendance en fréquence de l'exposant de Stevens est similaire entre une main et deux mains, bien qu'on ne puisse pas directement comparer les exposants, car la direction de l'expérience à deux mains est une composition de **Xh** et **Yh**. L'exposant maximum est atteint pour la situation à deux mains avec une valeur d'environ 1.2 pour un grip de 50N. Ces variations d'exposants de Stevens en fonction de la fréquence d'excitation et de la situation vibratoire montrent également que l'utilisation d'une unique pondération pour décrire la sensation n'est pas suffisante.

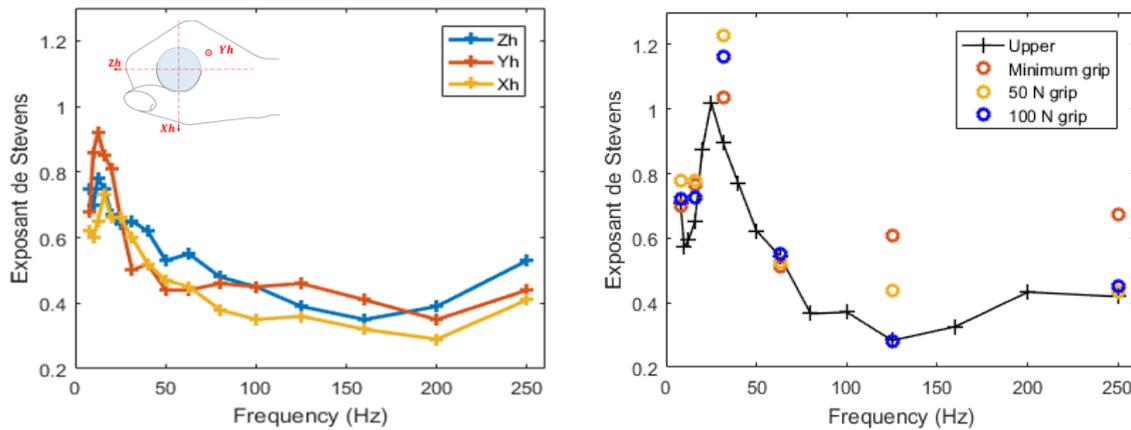


Figure 27 : Exposants de Stevens dans la situation « une main » (a) et « deux mains » (b), selon Morioka et al. [50] [55]. « Upper » correspond à une position des mains proche d'une conduite en véhicule, décrit dans [55].

Bien que ces études présentent certaines différences avec une situation de conduite automobile, on peut imaginer que des problématiques similaires peuvent exister. Dans la littérature, ces questions ont été principalement soulevées pour les vibrations de rotation du volant, dont la partie suivante va présenter les principaux résultats.

### 3.5 Perception des vibrations de rotation du volant

Comme cela a été présenté dans la partie 2.3, ces vibrations sont généralement induites par une excitation route ou un problème d'équilibrage des roues. Ce type de vibrations peut être une source d'information sur l'état de la route [59] ou du véhicule [60] et donner une information sur la stabilité du véhicule. Elles constituent également un facteur important de gêne pour le conducteur [61] et ont été largement traitées dans la littérature ; en fonction du temps d'exposition [62], du type de revêtement [59] ou du niveau de vibration [63]. Les études de *Shayaa et al.* [64] et de *Giacomin et al.* [63] proposent une expérience en laboratoire, proche d'une situation de conduite afin d'évaluer la pertinence de **Wh** pour décrire la sensation d'inconfort produite par ce type de vibrations. Ici encore **Wh** ne semble pas adapté et tend à sous-estimer l'accélération perçue. L'étude de *Giacomin et al.* [63] propose finalement la définition d'une nouvelle pondération, plus adaptée que **Wh**, appelée **Ws**, présentée Figure 28. **Ws** diffère de **Wh** en proposant que la sensation ne dépende pas de la fréquence en dessous de 6.3 Hz et entre 50 et 160 Hz.

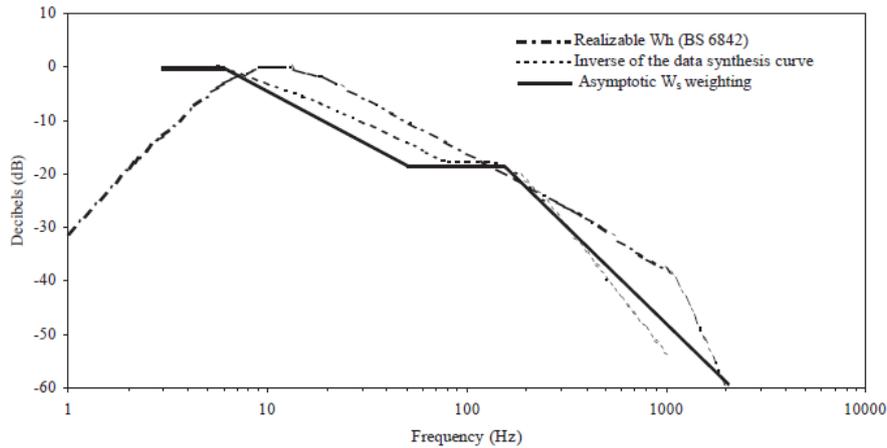


Figure 28 : Pondération  $W_s$  proposée par [63] afin de décrire la perception des vibrations de rotation du volant.

D'après Amman et al. [54],  $W_s$  fonctionne bien dans le cadre de ce type de vibrations, en appliquant un décalage à la pondération pour que celle-ci soit égale à 1 pour une fréquence de 14.5 Hz (correspondant au signal de référence de l'expérience). De plus, l'étude montre que son utilisation pour les vibrations en translations du volant fonctionne mieux que  $W_h$  pour les directions  $X$  et  $Z$  du volant, pour des fréquences inférieures à 14.5 Hz. Mais aucune autre étude n'a testé l'impact de  $W_s$  sur les vibrations en translation du volant. Enfin, Gnanasekaran et al. [65] proposent que l'utilisation des pondérations  $W_h$  et  $W_s$  améliorent la corrélation des lois de Stevens construites pour des signaux aux contenu spectral multi fréquentiel, dont l'exposant est de l'ordre de 0.7. Dans cette étude, les signaux testés sont des modélisations de vibrations générées par des routes, donc présentant un spectre plus riche que les signaux sinusoïdaux testés jusqu'ici. L'étude conclut qu'il n'y a pas de différence significative entre les deux pondérations pour les signaux testés du fait de leur contenu fréquentiel moyen (pics d'excitations entre 30 Hz et 50 Hz). En effet, les différences entre les deux pondérations se voient principalement en dessous de 10 Hz et au-dessus de 50 Hz.

Afin de compléter la pondération proposée, Ajovalasit et al. [66] proposent la construction d'un modèle de régression linéaire multiple sous la forme  $Sensation = f(Niveau) + g(fréquence)$  pour décrire le jeu de courbes d'iso-sensation construites dans l'étude. Les modèles proposent différents niveaux de complexité, allant de l'ordre 1 à l'ordre 8 lors de représentations polynomiales de  $f$  et  $g$ . Cette étude montre que la relation entre perception, niveau et fréquence d'excitation n'est pas linéaire. En revanche, il est difficile de

trouver une interprétation physique des modèles proposés. La pondération **Ws** permet de décrire correctement les vibrations de rotation du volant et diffère sensiblement de **Wh** surtout pour des fréquences inférieures à 6.3 Hz [67].

### 3.6 Conclusion

Les différentes études présentées dans cette partie mettent en évidence la dépendance fréquentielle de la perception des vibrations. Au-dessus du seuil de détection, elles s'accordent sur une diminution de la sensation avec l'augmentation de la fréquence, dont le comportement est décrit dans la norme ISO 5349. Cependant, cette norme n'est pas suffisante pour décrire l'ensemble des paramètres dont la perception dépend. En effet, la perception des vibrations dépend également de la direction d'excitation ou de la gamme de niveaux d'excitation. Une analyse plus détaillée est donc nécessaire afin de décrire les vibrations auxquelles sont soumis les conducteurs automobiles. De nombreuses études se sont intéressées à la perception des vibrations à travers une poignée pour des forts niveaux d'excitations vibratoires. Dans un contexte automobile, les vibrations de rotation du volant ont été largement traitées, notamment au travers des travaux de Amman. Pour les vibrations en translations du volant, les études de *Amman et al.* [54] et de *Morioka et al.* [55] ont traité certains aspects mais présentent des contradictions. Ces études constitueront un point de départ dans l'évaluation de la perception des vibrations et pourront être complétées afin d'assurer une bonne compréhension des phénomènes engagés en véhicule.

# Synthèse de la littérature et objectifs de travail

Lors d'une expérience automobile, le confort des usagers peut se présenter sous plusieurs formes : confort physique, physiologique ou psychologique. Dans la première partie, une grande variété de ces aspects a été présentée. Il semble que les notions de confort et d'inconfort ne soient pas directement corrélées et qu'elles puissent être évaluées en parallèle. Cependant, lorsque le niveau d'inconfort augmente de façon significative, il s'avère qu'il est difficile d'apprécier la notion de confort. Ainsi, dans une logique d'évaluation des vibrations, il apparaît que l'estimation de l'inconfort est pertinente. En effet, cette notion est directement liée à celle de confort dynamique, par sa relation forte à l'interaction physique. De plus, l'évaluation de l'inconfort permettra à terme de travailler sur l'atténuation de la source et l'amélioration de la prestation automobile.

Afin d'y parvenir deux stratégies peuvent fonctionner, l'évaluation objective, basée sur la mesure de la nuisance et l'évaluation subjective, basée sur un ensemble d'estimations réalisées par un panel. D'après l'étude de Kolich [68], en se basant uniquement sur une mesure subjective réalisée lors d'un roulage pour caractériser un véhicule, on s'expose au risque de traiter des « avis personnels », biaisés par une variété de paramètres qu'il est difficile de contrôler. Il est par exemple difficile de s'assurer que les rouleurs sont exposés aux mêmes sources vibratoires. Les avis sur le modèle ou la motorisation du véhicule peuvent également être un biais. De plus, la tâche de conduite peut être une source de perturbation pour le conducteur, rendant l'évaluation des vibrations difficile. Afin d'éviter une grande partie de ces biais, il est préférable de réaliser des expériences subjectives sur un banc d'essais. Ces études, plus contrôlables, peuvent ensuite permettre la construction de modèles perceptifs. Enfin, une stratégie favorisant une mesure objective en véhicule et l'utilisation de ces modèles permettrait d'évaluer le véhicule de façon robuste.

En pratique, au sein du Groupe Stellantis, la caractérisation des excitations vibratoires induites par le groupe motopropulseur se fait par une montée en régime en pleine accélération, notée *PA*. Ce protocole correspond à un balayage de l'ensemble des régimes

moteur du véhicule. A partir d'un régime moteur donné, l'expérimentateur enfonce la pédale d'accélération au maximum, générant une augmentation du régime. D'un point de vue de l'excitation vibratoire, cette situation est la moins favorable car elle entraîne un couple maximum du moteur se traduisant par un acyclisme important à bas régime. Afin de caractériser le comportement vibratoire du volant, deux accéléromètres sont placés en haut et en bas de la jante du volant. Comme on a pu le voir au travers de la partie 2.2, les niveaux vibratoires sont maximum aux fréquences correspondantes aux premiers modes propres de la colonne de direction et de la jante du volant. Afin d'assurer une bonne reproductibilité de la mesure, la PA est réalisée volant libre car il est possible que les mains aient un effet sur la réponse vibratoire du volant. Une évaluation des vibrations volant libre permet donc de garantir une mesure répétable. Cependant, les excitations mesurées ne sont pas représentatives des niveaux auxquels sont soumis les conducteurs. Dans une logique d'évaluation de l'inconfort apporté par ces vibrations, il semble alors nécessaire de se rapprocher au plus près des niveaux réellement perçus. Ce constat établit la première phase de recherche de cette thèse. En effet, même si la partie 2.3.2 a permis de décrire le comportement mécanique d'une main, aucune étude n'a cherché à prédire son influence sur le système vibratoire associé. Il sera donc intéressant de quantifier l'effet de la main sur le volant et d'estimer les excitations à l'interface. De plus, si le comportement dynamique de la main a été largement étudié, le contact statique entre la main et le volant a été peu étudié. Cet élément est d'autant plus important que les efforts de poussée et de préhension affectent la réponse dynamique de la main et la perception des vibrations. Il paraît donc nécessaire dans un premier temps de caractériser le contact main(s)-volant et d'évaluer les efforts statiques appliqués par les conducteurs.

Bien que la dynamique du système {main-volant} ne soit à ce stade pas clairement établie, la concordance des excitations vibratoire et des plages de maximums de sensation laisse penser qu'un inconfort important pourrait apparaître. Comme cela a été présenté dans la partie 3, la dépendance de la sensation à la fréquence d'excitation a été clairement établie. En revanche, la norme ISO 5349 ne suffit pas à décrire tous les phénomènes mis en jeu. D'un point de vue automobile, les vibrations de rotation du volant, de moins en moins présentes aujourd'hui du fait des directions assistées électriques, ont été largement traitées dans la littérature. La pondération **Ws**, introduite par *Giacomin et al.* [63] permet d'évaluer

correctement la perception de ce type de vibrations. En revanche, les vibrations de translation du volant, fortement excitées par le moteur, ont été peu traitées. En effet, l'étude de l'inconfort induit par ce type de vibrations a été principalement conduite pour des applications dans le domaine du bâtiment, dont les forts niveaux d'excitations ont un impact sur la santé. La plupart des articles proposent donc des expériences sur des poignées vibrantes et de large gammes de fréquences et de niveau d'excitation. Ainsi, compte tenu d'un spectre d'excitation bien plus restreint en véhicule, il est difficile de conclure sur l'effet de la fréquence à partir de ces études. Enfin, si certaines études ont évalué l'influence des vibrations transmises à une main [51] [50] ou à deux mains [54] [55] aucune n'a cherché à montrer les différences existantes entre ces deux situations. Lors d'un déplacement en voiture, la conduite à deux mains et à une main sont familières. D'après *Giacomin et al.* [11], 76% des conducteurs affirment conduire principalement à deux mains, 12% seulement avec la main gauche et 12% avec la main droite. Au cours d'un trajet, ces deux situations arrivent régulièrement. Il serait donc intéressant d'évaluer l'influence de ces deux positions sur la perception des vibrations. De plus, cette question est double car ce changement de situation entraîne à la fois une modification du système mécanique (couplage d'une ou de deux mains avec le volant) et du nombre de mécanorécepteurs mis en jeu. Une synthèse associant réponse mécanique et perception vibratoire permettra d'accélérer la convergence du projet vers une synthèse vibratoire définie lors de la conception. De plus, cette synthèse permettra d'effectuer une caractérisation vibratoire des véhicules, plus robuste et intégrant la notion d'inconfort.

A partir de la revue de littérature et compte tenu des besoins du Groupe Stellantis, cette thèse va chercher à répondre à un ensemble de problématiques selon deux axes principaux : la caractérisation du couplage mécanique {main-volant} et la mise en place de modèles de perception. Ces deux axes de travail s'inscrivent dans la continuité l'un de l'autre. Le premier visera à la caractérisation de la réponse vibratoire du système couplé et permettra d'apporter une meilleure connaissance des niveaux d'excitations auxquels sont soumis les conducteurs. Le deuxième cherchera à évaluer l'inconfort induit par ces excitations.

Afin d'y parvenir, la caractérisation du couplage mécanique nécessite de répondre à un ensemble de problématiques peu ou pas traitées dans la littérature :

- **Quels efforts sont appliqués par un conducteur moyen dans différentes situations de conduite ?**
- **Le protocole de caractérisation vibratoire du volant utilisé au sein du Groupe Stellantis est-il représentatif des excitations réellement perçues ?**
- **La présence des mains modifie-t-elle de façon significative la réponse vibratoire du volant ?**
- **Peut-on quantifier la réponse du système {main(s)-volant} à partir des modèles mécaniques de main proposés par la littérature ?**

La réponse à ces questions permettra de quantifier la nature du contact entre la main et le volant et de positionner les efforts appliqués par rapport à la littérature. Il sera alors possible d'évaluer la pertinence des modèles mécaniques proposés par la littérature, dont l'utilisation est soumise à des gammes d'efforts appliquées par la main. A partir de ces premiers résultats, nous chercherons à trancher sur les modèles les plus adaptés pour reproduire le comportement mécanique de la main sur le volant.

La meilleure compréhension des sollicitations vibratoires du volant constituera un point d'entrée pour l'évaluation de l'inconfort apporté. Comme cela a été présenté, la littérature ne semble pas suffire pour décrire les phénomènes de perception mis en jeu lors d'une expérience automobile. Afin de la compléter, plusieurs problématiques seront traitées :

- **La fréquence d'excitation a-t-elle un effet sur la sensation autour des modes propres de la colonne de direction ?**
- **La direction d'excitation influence-t-elle la sensation ?**
- **Existe-t-il des différences de perception lorsqu'une ou deux mains sont soumises à une excitation vibratoire ?**

Afin de répondre à l'ensemble de ces problématiques, quatre expériences ont été mises en place et seront décrites au travers de deux chapitres. La première expérience a pour objectif la construction d'un système de mesure des efforts statiques à l'interface main(s)-volant et la caractérisation de ces efforts dans plusieurs situations de roulage. La deuxième expérience

visé à évaluer l'influence des mains sur la réponse vibratoire du volant et la capacité des modèles existant à prédire le niveau d'excitation présenté aux conducteurs. Ces deux premières expériences constituent le deuxième chapitre, dont le contenu a été présenté ci-dessus. Dans le troisième chapitre, dédié à la perception, une première expérience aura pour vocation d'évaluer la perception des vibrations autour des maximums d'excitation rencontrés en véhicule. Elle aura également pour but d'évaluer l'influence de deux directions d'excitations, **Xh** et **Zh** et de la fréquence. Cette expérience est conduite sur une poignée vibrante afin d'assurer un bon contrôle des directions d'excitation. Une dernière expérience a été conduite à partir d'un volant automobile monté sur un pot d'excitation vibratoire. Elle aura pour objectif d'évaluer les différences de sensations induites par le nombre de mains en contact avec le volant et l'influence de l'expertise des participants. La synthèse de l'ensemble de ces expériences permettra l'élaboration d'une stratégie d'objectivation de l'inconfort, mêlant mesure en véhicule et modèles perceptifs.

# Chapitre 2 : couplage mécanique des mains et du volant

## Introduction

La première étape dans l'évaluation de l'inconfort induit par les vibrations du volant consiste en une évaluation objective du niveau de vibration à l'interface main(s)-volant. Comme on a pu le voir précédemment, la caractérisation du niveau vibratoire en véhicule est réalisée sur le volant libre afin d'assurer la reproductibilité des essais. La mesure ne tient donc pas compte du comportement vibratoire de la main ni de son influence sur la réponse dynamique du système main(s)-volant couplé. Ainsi, la mesure n'est pas représentative de l'amplitude vibratoire à laquelle est soumise un conducteur. L'objectif de ce chapitre est de proposer un nouveau protocole, permettant à la fois d'assurer la reproductibilité de la mesure et une estimation du niveau de vibrations perçu par le conducteur. Afin d'y parvenir, il est tout d'abord nécessaire d'étudier la nature du contact main(s)-volant dont dépend la réponse biodynamique de la main par l'intermédiaire des efforts de poussée et de préhension (présentés Chapitre 1, partie 2.3.2). Il n'existe à ce jour que peu d'informations à ce sujet dans le contexte automobile.

L'objectif de la première expérience est d'évaluer l'effort moyen appliqué par un conducteur dans plusieurs situations de conduite. Cette expérience doit permettre de caractériser les efforts statiques appliqués et d'évaluer leur influence sur le comportement vibratoire du volant. Elle permettra ainsi d'évaluer la pertinence du contrôle des efforts de poussée et de préhension lors d'une expérience d'évaluation subjective. Elle permettra également de choisir un modèle mécanique de main approprié pour décrire son comportement lors du couplage main-volant.

L'objectif de la seconde expérience est de proposer un protocole permettant de prédire de façon objective les vibrations à l'interface main(s)-volant à partir d'une mesure « volant libre » habituellement réalisée pour caractériser les véhicules. Elle se basera sur les modèles mécaniques proposés par la littérature et sur une méthode de couplage des mobilités mécaniques.

# Exp.1 : interaction Homme/Véhicule : main(s)/volant

## 1. Efforts appliqués sur le volant en fonction de la situation de conduite

### 1.1 Stratégie expérimentale

Lors de la mesure des efforts appliqués par la main, on dénombre principalement deux types d'outils de mesures : les poignées instrumentées et les nappes de capteurs de pression surfacique. Historiquement, ce sont les poignées instrumentées qui étaient utilisées [24], [25], [69]. En revanche, leur utilisation dans un contexte automobile nécessite la construction d'un volant spécifique instrumenté de jauges de contraintes. Les poignées instrumentées s'adaptent donc difficilement à des conditions réelles d'utilisation et sont souvent mises en place en laboratoire. Les nappes de capteurs permettent quant à elles une mesure directement à l'interface entre la main et l'objet vibrant. Une mesure en condition réelle est alors possible. Ces capteurs ont souvent été adaptés sur des gants ou directement sur l'objet vibrant, permettant ainsi une mesure peu invasive. En revanche, les gants ne garantissent pas toujours un contact adéquat entre la main et l'objet et sont particulièrement onéreux et fragiles.

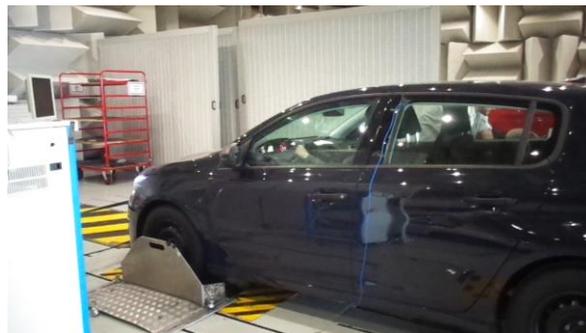
Dans le cadre d'un volant automobile, une configuration avec une nappe positionnée sur le volant semble être la solution technique la plus adéquate [20], [21]. L'étude de *Eksioglu et al.* [20] propose de mesurer l'effort de préhension appliqué sur le volant, en fonction du type de revêtement de la route, de la vitesse et du genre des participants. L'étude montre qu'en moyenne, l'effort de préhension appliqué par les participants est de l'ordre de 58 N, correspondant à 31% de l'effort de préhension maximum applicable par le panel. Elle montre également que les hommes appliquent en moyenne un effort significativement plus important que les femmes. En revanche, la situation de conduite ou le type de route n'ont pas d'effets significatifs. L'article note tout de même une tendance à l'augmentation de l'effort de préhension lorsque la route se dégrade. Cette expérience apporte une première approche de la mesure de l'effort de préhension. En revanche, elle présente un panel limité de 13

participants et ne propose pas la mesure de l'effort de poussée, nécessaire à la caractérisation du contact entre la main et le volant.

L'expérience présentée ici a pour objectif de décrire les efforts de poussée et de préhension appliqués par la main et de vérifier l'hypothèse selon laquelle la situation de conduite n'a pas d'effet sur les efforts appliqués par les participants, comme proposée par *Eksioglu et al.* [20].

## 1.2 Montage expérimental

L'expérience est réalisée dans une Peugeot 308 essence (quatre cylindres) montée sur un banc à rouleaux, en salle semi-anéchoïque, présentée Figure 29. Le choix d'une expérience sur un banc plutôt que sur route ouverte a été fait, car le montage expérimental ne permet pas de garantir une conduite en sécurité (présence d'une nappe et de câbles sur le volant).



*Figure 29 : voiture positionnée sur le banc à rouleau en salle semi-anéchoïque.*

### 1.2.1 Système de mesure de poussée et de préhension

Le montage expérimental a été construit à partir d'une nappe de capteurs de pression *Xsensor* composée d'une matrice de taille (48,47) de capteurs de 0.25 in<sup>2</sup> (environ 1.61 cm<sup>2</sup>) fixée sur le volant, comme on peut le voir sur la Figure 30. La nappe permet une mesure temporelle de l'effort surfacique dont la sensibilité de chaque cellule de la matrice est compris entre 0.14 N/cm<sup>2</sup> et 2.7 N/cm<sup>2</sup> avec une résolution temporelle maximum de 39 mesures par seconde. Ces nappes sont habituellement utilisées pour la mesure de pression à l'interface siège-conducteur. Une adaptation est proposée ici pour l'évaluation des efforts appliquées sur le volant.



Figure 30 : système de mesure nappe Xsensor.

### 1.2.2 Mesures vibratoires

Afin d'évaluer les niveaux vibratoires auxquels sont soumis les participants, trois accéléromètres triaxiaux sont installés sur le volant (capteur ICP® de sensibilité 10 mV/g), comme présenté Figure 31. Le régime et le couple moteur sont enregistrées au cours de l'expérience et permettent la synchronisation des essais. L'ensemble est enregistré par un système d'acquisition LMS SCADAS® multivoies.



Figure 31 : système de mesure vibratoire volant.

## 1.3 Participants

33 participants : 8 femmes et 25 hommes, entre 20 ans et 58 ans, taille moyenne 176 cm, ont participé à l'expérience. Les participants déclarent ne présenter aucune pathologie liée aux vibrations et être en bonne santé. En amont de l'expérience, les mains de chaque participant ont été mesurées et correspondent aux données anthropométriques moyennes selon la base de donnée de l'enquête CAESAR (Civilian American and European Surface Anthropometry Resource). L'enquête CAESAR regroupe les données anthropométriques de plus de 4 000 personnes d'une population européenne et nord-américaine.

## 1.4 Protocole expérimental

Les participants sont invités à s'installer à la place du conducteur et à régler la position du siège et du volant comme s'ils s'apprêtaient à conduire. La position des mains sur le volant est quant à elle restreinte à la position « 10h10 » afin qu'elles se trouvent dans les zones de mesures (encadrées par les clips de fixation de la nappe). En amont de l'expérience, les participants reçoivent des instructions orales en rapport avec le contexte de l'étude et la procédure de test. Une phase de familiarisation avec la conduite sur un banc à rouleau est également mise en place.

L'expérience se décompose en trois situations véhicule différentes : moteur éteint, régime stabilisé avec régulateur de vitesse à 70 km/h en 3<sup>ème</sup> vitesse et une montée en régime moteur entre 1000 tr/min et 2500 tr/min.

### Situation 1 : mesures sans perturbation vibratoire (moteur éteint)

L'objectif de cette situation est d'évaluer la capacité des participants à reproduire un effort sur le volant et de les familiariser avec la procédure et le montage expérimental. Ainsi, les participants sont invités à réaliser six tenue du volant à deux mains, chacune d'une durée de 10 secondes en maintenant un effort constant. Entre chacune des tenues, un temps de repos de 10 secondes est réalisé. Comme indiqué dans le titre, cette situation se déroule moteur éteint.

### Situation 2 : mesures en régime stabilisé (70 km/h, rpm = 1200 tr/min, 3<sup>ème</sup> vitesse)

Lors de cette situation, l'objectif est de construire une condition plus proche d'une situation de conduite en ajoutant des gestes usuels en voiture pour augmenter le réalisme. Tout d'abord, le participant roule jusqu'à arriver en 3<sup>ème</sup> vitesse, puis règle le régulateur de vitesse à 70 km/h. Une fois cette tâche réalisée, la voiture se stabilise et le participant n'a plus à se soucier de ses pieds ni de la vitesse.

A partir de cet instant, la procédure suivante est mise en place pour réaliser une série de gestes usuels :

- Volant tenu à deux mains : 10 s
- La main gauche lâche le volant pour ouvrir la fenêtre, puis la refermer : 10 s
- Le volant est de nouveau tenu à deux mains : 10 s
- La main droite lâche le volant pour régler la chaîne de radio : 10 s
- Le volant est de nouveau tenu à deux mains : 10 s

Cette procédure est réalisée deux fois avec une pause de 30 secondes entre les deux procédures.

### Situation 3 : mesures lors d'une montée en régime entre 1000 rpm et 2500 rpm, en pleine charge, en 3<sup>ème</sup> et en 5<sup>ème</sup> vitesse

Dans cette situation, une nouvelle condition est testée, appelée Pleine Accélération (PA). Afin de réaliser une PA, le participant se place en 3<sup>ème</sup> ou en 5<sup>ème</sup> vitesse, à un régime moteur inférieur à 1000 tr/min, sans tenir le volant. Lors du « top » donné par l'expérimentateur, le conducteur place ses deux mains sur le volant et dans un même temps enfonce la pédale d'accélérateur au maximum. Un second « top » vient avertir le conducteur afin qu'il relâche, dans un même temps, la pédale et la pression sur le volant.

Cette procédure est répétée 4 fois dans des situations vibratoires et de contact différentes :

- Montée en régime en 3<sup>ème</sup> sans contrainte sur la façon de tenir le volant
- Montée en régime en 3<sup>ème</sup> avec pour contrainte de serrer le volant comme dans une situation de conduite sportive ou par mauvaises conditions météo (souvent appelée « *windy condition* » dans la littérature)
- Montée en régime en 5<sup>ème</sup> : sans contrainte
- Montée en régime en 5<sup>ème</sup> : « *windy condition* »

Dans de cette situation, il est demandé aux participants d’imaginer se trouver dans une condition de conduite lors de mauvaises conditions météo mais celles-ci ne sont pas reproduites. Cette phase n’est donc pas naturelle par rapport à un roulage par temps de pluie ou de vent. Il sera nécessaire d’en tenir compte lors de l’analyse.

## 1.5 Résultats

### 1.5.1 Pré analyse des mesures

Cette partie a pour objectif de proposer une méthode de calcul des efforts de poussée et de préhension à partir des mesures brutes de pression réalisées lors de l’expérience, en s’appuyant sur les préconisations de la norme ISO 15 230 [19].

#### *Etape 1 : Prétraitement des données de la nappe Xsensor*

La norme ISO 15 230 [19] préconise l’utilisation de la pression moyenne appliquée sur une période de 8 secondes pour le calcul des efforts. Lors de l’expérience, la totalité des phases de préhension du volant étaient au minimum de 10 secondes. Comme on peut le voir sur la Figure 32, les variations importantes d’efforts semblent apparaître en début et en fin de chaque mesure. Ces phases correspondent au moment où le participant place puis enlève ses mains de la nappe. Afin de lisser ces effets, peu représentatifs de l’effort moyen appliqué, la pression appliquée sur chaque capteur de la matrice sera considérée comme la moyenne entre les secondes 1 et 9 de chaque mesure. Dans l’exemple présenté ci-dessous, on obtient en moyenne pour les six phases :  $P_{\text{moy}} \sim 0.87 \text{ N/cm}^2$  et un écart-type moyen de  $0.05 \text{ N/cm}^2$ .

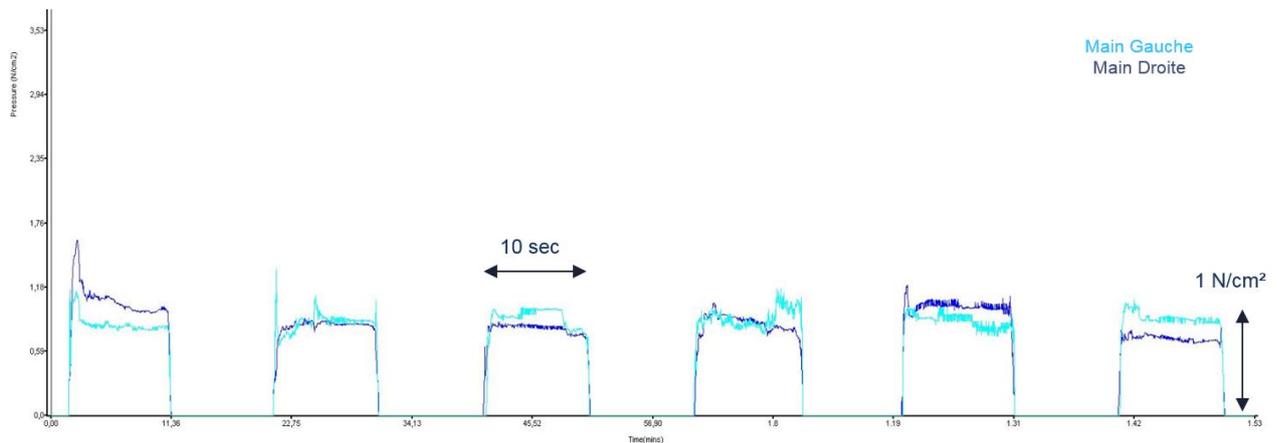


Figure 32 : Pression moyenne appliquée par le participant 22 au cours de la Situation 1, en fonction du temps.

### Etape 2 : discrétisation géométrique du volant

Il convient dans un premier temps de séparer le volant en deux parties afin de tenir compte de la géométrie du volant dans la discrétisation de la section du volant :

- Zone haute : circulaire
- Zone basse : présentant un méplat sur la partie frontale



Zone haute



Zone basse

Pour chaque zone, la nappe de capteurs permet de réaliser un maillage de la pression appliquée sur le volant et d'évaluer les efforts locaux  $F_{ci}$  appliqués pour chaque cellule de la matrice. Les discrétisations détaillées pour chaque zone sont présentées en Annexe 1. A partir des discrétisations proposées, il est possible de remonter aux efforts locaux calculés pour chacune des sections de volant, d'après les expressions des forces de poussée ( $F_{po}$ ) et de préhension ( $F_{pr}$ ) décrite dans la partie 2.3.1 du Chapitre 1. On obtient donc pour chaque section du volant, une résultante de poussée et de préhension, dont une représentation est

proposée en Figure 33. Cette figure représente en bleu la bordure de la poignée circulaire discrétisée. Ainsi, chaque section plane correspond à un capteur de la nappe. On retrouve donc pour chacune d'elle l'effort local  $F_{ci}$ . On peut voir qu'en fonction de la zone, l'effort appliqué est différent. Dans la zone du cercle autour de  $330^\circ$ , l'effort appliqué est sensiblement plus petit que sur la partie supérieure. Cette zone correspond à l'arrière du volant, non tenue par le conducteur ou pressée par le bout des doigts. La partie opposée du cercle, autour de  $120^\circ$ , est maintenue par la paume de la main, expliquant une pression locale plus importante. Ces représentations permettent de comprendre la façon dont est réparti l'effort pour chaque section du volant. Les directions des résultantes de poussée et de préhension, également représentées, apporte une information sur le contact main-volant. On peut voir, toujours sur la Figure 33, que sur cette section de volant, le conducteur pousse le volant vers l'avant et que l'axe de maximum de préhension est presque colinéaire à celui de la poussée. En pratique, les directions de ces deux efforts sont souvent très proches.

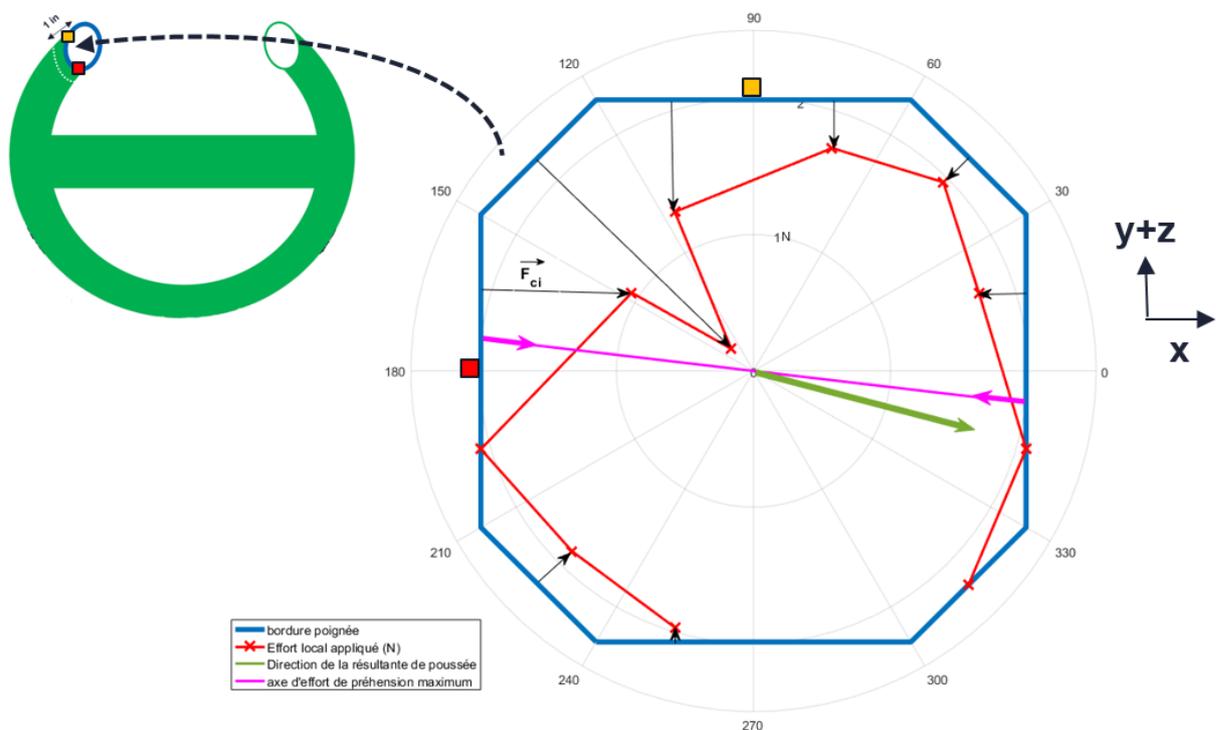


Figure 33 : Répartition de l'effort sur une section de volant de largeur 0.5 in.

Ces résultantes locales sont calculées pour chaque section du volant puis sont sommées afin de construire un effort de poussée global  $F_{po}$  et de préhension global  $F_{pr}$ . Ces deux efforts sont évalués au centre de la zone de contact pour chaque main, définie comme le centre de la position 10h10, dont la section volant présente un angle à  $45^\circ$  avec la verticale. Cette procédure permet ainsi de remonter aux résultantes et directions des efforts de poussée et de préhension appliqués par chaque main. La Figure 34, présente la résultante de l'effort de poussée, appliquée par le participant 22 lors d'une mesure dans la *Situation 1*. On peut voir, dans cette situation, que le participant 22 tend à pousser le volant vers l'avant et vers le bas. Si l'on regarde la direction de la résultante de poussée pour l'ensemble du panel, on peut voir que tous les conducteurs poussent le volant en direction du tableau de bord, principalement vers le bas. Ce résultat est certainement lié au positionnement des mains sur le volant, dont la masse résultante tend à pousser le volant.

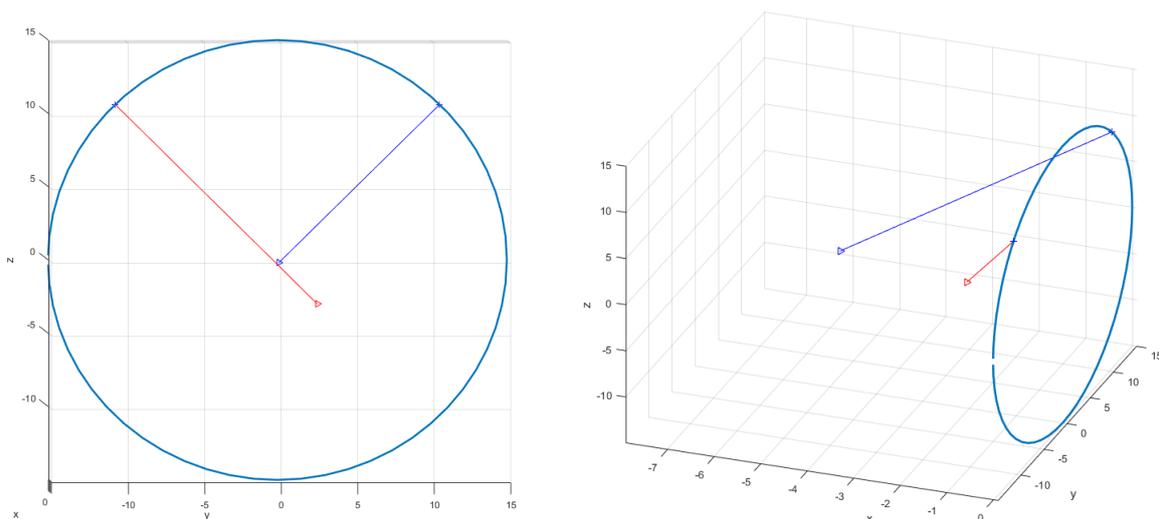


Figure 34: Résultante de l'effort de poussée appliquée par la main gauche (rouge) et droite (bleu), vue dans le plan et dans l'espace. Participant 22, Situation 1.

### Etape 3 : traitement statistique des données

Pour chaque situation, les moyennes marginales et les écart-types moyens des amplitudes des efforts sont calculés. Afin d'évaluer la significativité des différences entre deux jeux d'efforts, des test de Student sont réalisés avec un risque  $\alpha = 0.05$ . Lors de comparaisons multiples, une correction de Bonferroni est appliquée proportionnellement au nombre de comparaisons  $N$ , de sorte que  $\alpha = \frac{0.05}{N}$ . Lors des différentes comparaisons réalisées, la lettre  $p$

représente la *p-value* calculée à partir du test de Student. Enfin, les corrélations présentées sur les figures et dans le texte correspondent au coefficient de corrélation de Pearson calculées à partir des jeux de données.

### 1.5.2 Analyse interindividuelle

L'analyse des pressions appliquées par les participants révèle que les participants 3 et 5 ont saturé les capteurs de la nappe. Ils sont donc écartés de la suite de l'analyse. Pour chaque participant, la moyenne du coefficient de corrélation entre ses résultats et ceux des autres participants a été calculée. Afin d'écarter les participants trop en écart avec le reste du groupe, un seuil de corrélation moyenne de 0.5 a été choisi. Les participants 15, 17, 25 et 28 sont donc écartés de l'étude. On obtient ainsi un panel de 27 participants.

### 1.5.3 Effets des paramètres anthropométriques

D'après *Seo et al.* [70], l'effort de préhension maximal appliqué par la main est fortement lié à la dimension de la poignée et à la surface de la main. Dans cet article, *Seo et al.* proposent d'évaluer la surface de contact de la main simplement comme le produit de la longueur et de la largeur de la main. Afin de simplifier l'analyse, la même approximation est réalisée ici, tel que :  $S_{contact} = L_{main} \cdot l_{main}$ . Comme on peut le voir sur la Figure 35, l'effet de la surface de contact sur les efforts de poussée et de préhension moyens ne semble pas significatif. On ne retrouve donc pas le résultat proposé par *Seo et al.* [70]. Cependant, dans l'article il était demandé aux participants d'exercer leur effort maximum sur la poignée. On peut donc imaginer que dans ce type de tâche, à la fois la taille de la poignée, mais également la taille de la main va avoir un effet sur l'effort appliqué, comme illustré dans l'article de *Seo et al.* [70]. Dans notre étude, la consigne donnée aux participants était de serrer le volant comme dans une situation de conduite. On peut donc supposer que peu de participants ont appliqué leur effort de préhension maximum lors de cette tâche. On peut d'ailleurs noter que d'après *Eksioglu et al.* [20], l'effort de préhension appliqué lors d'une tâche de conduite correspond à environ 30% de l'effort maximum applicable. Cette différence de procédure peut expliquer la différence de résultats entre l'étude de *Seo et al.* et la nôtre.

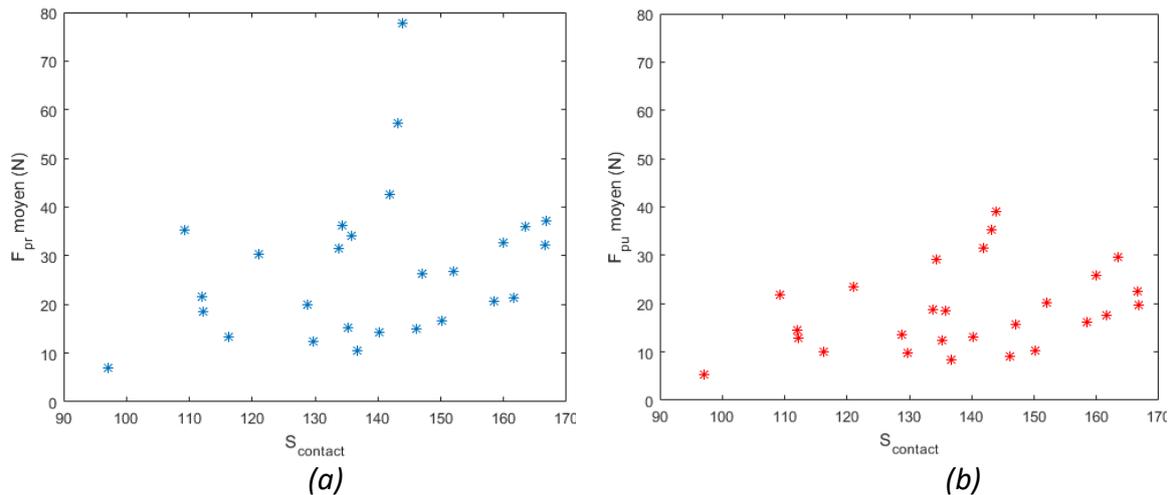


Figure 35 : Efforts de préhension (a) et de poussée (b) moyens appliqués en fonction de la surface de contact.

Si ces données n'ont pas d'influences directe sur les efforts appliqués par le volant, le genre (Homme/Femme) a un effet aussi bien sur la poussée que sur la préhension. Comme on peut le voir sur la Figure 36, représentant l'effort moyen de poussée, les hommes appliquent en moyenne un effort significativement plus important que les femmes. On retrouve le même résultat pour l'effort de préhension ( $p \sim 0.03$ ), conclusion en accord avec l'étude proposée par *Eksioglu et al.* [20]. Ainsi, bien qu'il n'y ait pas de relation directe entre la surface de contact et l'effort appliqué, la surface des mains des hommes est significativement plus importante que celle des femmes. La taille des hommes est également supérieure à celle des femmes dans le panel présenté. Il est donc possible que la morphologie du conducteur ait un effet sur l'effort appliqué. Enfin, la main d'écriture ne semble pas influencer l'amplitude des efforts appliqués ( $p > 0.1$ ). Dans cette expérience, le panel était majoritairement composé de droitiers (24 droitiers pour 3 gauchers) le manque de participants gauchers empêche donc de conclure avec certitude. Cependant, cette proportion de gauchers est représentative de celle présente dans la population française (entre 10% et 15%).

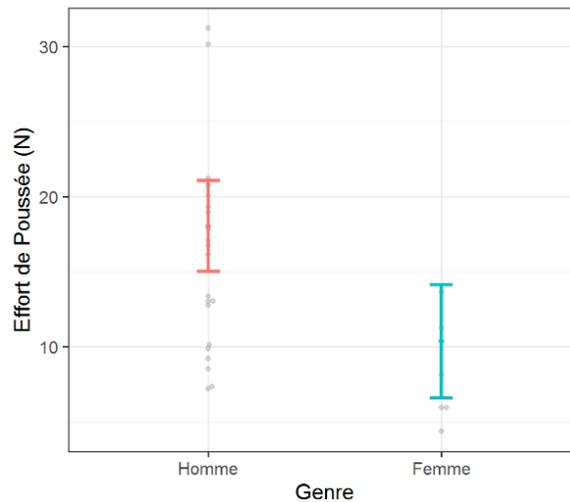


Figure 36 : comparaison entre l'effort de poussée moyen appliqué par les hommes et par les femmes ( $p \sim 0.01$ ).

Dans la suite de l'analyse, le panel sera considéré dans son ensemble sous la forme d'un unique groupe.

#### 1.5.4 Nature du contact en fonction de la situation de conduite

Comme on peut le voir Figure 37 (a), en moyenne l'effort de préhension appliqué est significativement plus élevé que l'effort de poussée. Lors d'une tâche de conduite, le conducteur cherche avant tout à garantir une adhérence entre sa main et le volant pour que celui-ci ne glisse pas de ses doigts, on peut donc imaginer que l'effort de préhension permet de mieux remplir cette tâche et expliquer les différences entre les deux efforts. Dans l'étude proposée par *Eksioglu et al.* [20], l'effort de préhension moyen appliqué est de l'ordre de 58N contre 32N dans le cas présent. Les plus grosses différences entre les deux expériences sont : la durée d'expérimentation (mesure sur une période de 30 minutes pour [20] contre une mesure de l'ordre d'une minute ici) et la zone de roulage. Il ne semble pas que la durée de l'expérience puisse entraîner ces différences. En effet, on imagine plutôt qu'une augmentation du temps d'expérience aurait tendance à diminuer l'effort appliqué, du fait de la fatigue engendrée. En revanche, la zone de roulage pourrait avoir un impact car l'expérience décrite dans [20] se déroule sur un circuit, présentant donc des segments en virage. La tâche de conduite nécessite donc certainement une préhension plus importante sur le volant que lors de notre expérience, où la conduite était effectuée en ligne droite. Enfin, bien que l'effort

de préhension soit plus élevé que l'effort de poussée, ces deux paramètres sont très corrélés ( $R^2$  Pearson  $\sim 0.92$ ). Comme on peut le voir sur la Figure 37 (b), lorsque l'effort de poussée appliqué est grand, l'effort de préhension appliqué est également plus important.

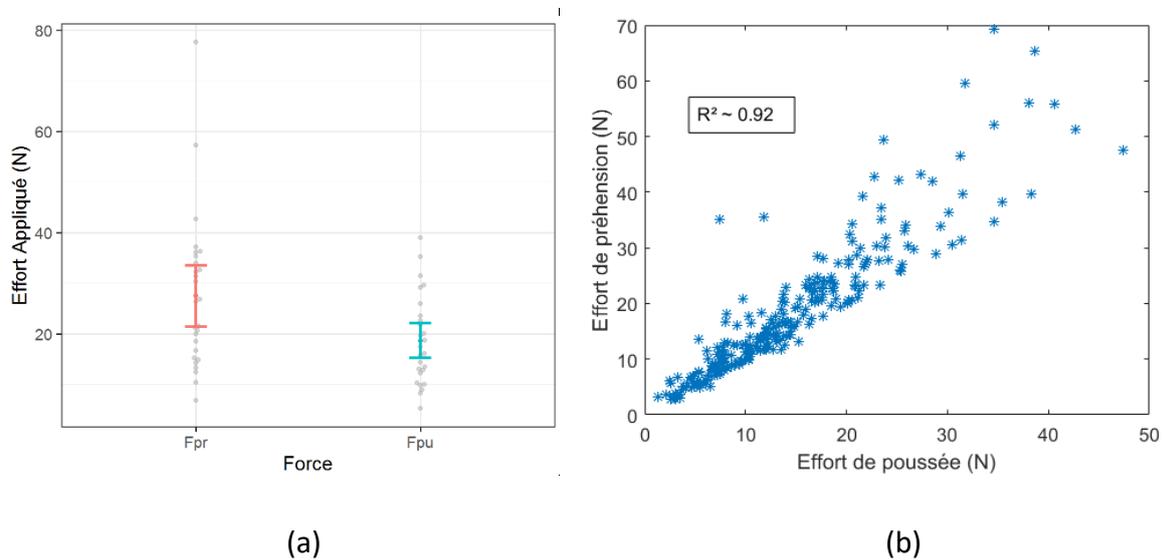


Figure 37 : (a) moyennes marginales et écart-type moyen des efforts de poussée et de préhension ( $p < 0.001$ ). (b) comparaison entre les efforts pour tous les participants, toutes les situations.

La Figure 38 présente les moyennes marginales des efforts appliqués dans chacune des situations de conduite. Comme on peut le voir, seules les situations « windy condition » se détachent du reste, que ce soit pour l'effort de poussée ou de préhension. En effet, la comparaison des moyennes marginales montre que seules ces situations sont statistiquement différentes des autres, à la fois pour la poussée et la préhension. Deux catégories de situations de conduites se détachent donc : les situations de conduites « normales » et les situations « windy conditions ». Dans la première catégorie, les niveaux d'excitations vibratoires sont différents du fait des différents états du véhicule. Cependant, les efforts appliqués sont équivalents. Ce résultat rejoint l'hypothèse formulée par Seo *et al.* [70] selon laquelle la vitesse et l'état de la route (modifiant la situation vibratoire) aurait peu d'effet sur l'effort de préhension appliqué. Enfin, comme on peut le remarquer sur la Figure 38, la différence d'effort appliqué entre une situation « normale » et « windy » est plus élevée pour l'effort de préhension que pour l'effort de poussée. Ici encore, on peut certainement expliquer ce résultat par la recherche d'adhérence du conducteur entre le volant et sa main. Dans une

situation de conduite délicate, le conducteur pourrait chercher à avoir un maintien plus ferme du volant, se traduisant principalement par une préhension plus forte. Cependant, ces résultats doivent être pris avec précaution du fait du manque de validité écologique de la situation « windy condition ».

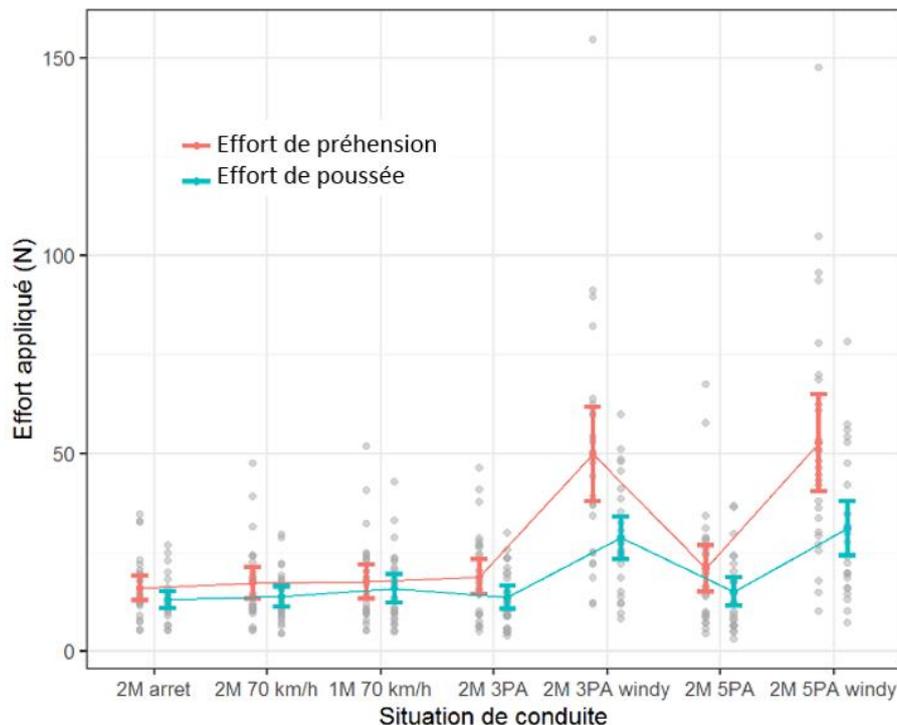


Figure 38 : moyennes marginales et écart-type moyen des efforts de poussée et de préhension appliqués pour chaque situation de conduite.

## 1.6 Analyse des excitations vibratoires (Situation 2)

### 1.6.1 Pré traitement

Au cours du de la Situation 2, les participants ont été soumis à des excitations vibratoires. L'objectif de cette analyse est d'évaluer l'influence des mains et des efforts de poussée et de préhension sur la réponse vibratoire du volant. Dans un premier temps, afin de simplifier l'étude, les niveaux vibratoires ont été évalués à l'interface main/volant. Pour cela, une approximation de corps solide du volant entre les points de mesure des accéléromètres 1 et 3 et 2 et 3 est introduite, schématisée sur la Figure 39. Cette approximation semble raisonnable autour du premier mode de colonne de direction (autour de 40 Hz) fréquence bien inférieure au premier mode de structure du volant (autour de 70 Hz). Comme on peut le

voir sur la Figure 39, le niveau vibratoire mesuré à l'interface main-volant et le niveau calculé (comme la moyenne des accélérations au point 2 et 3) sont très proches. Cette approximation sera alors considérée dans la suite de l'analyse et les niveaux vibratoires seront présentés à l'interface Main Gauche (point **G**) et Main Droite (point **D**).



$$\begin{cases} a_G = \frac{a_1 + a_3}{2} \\ a_D = \frac{a_2 + a_3}{2} \end{cases}$$

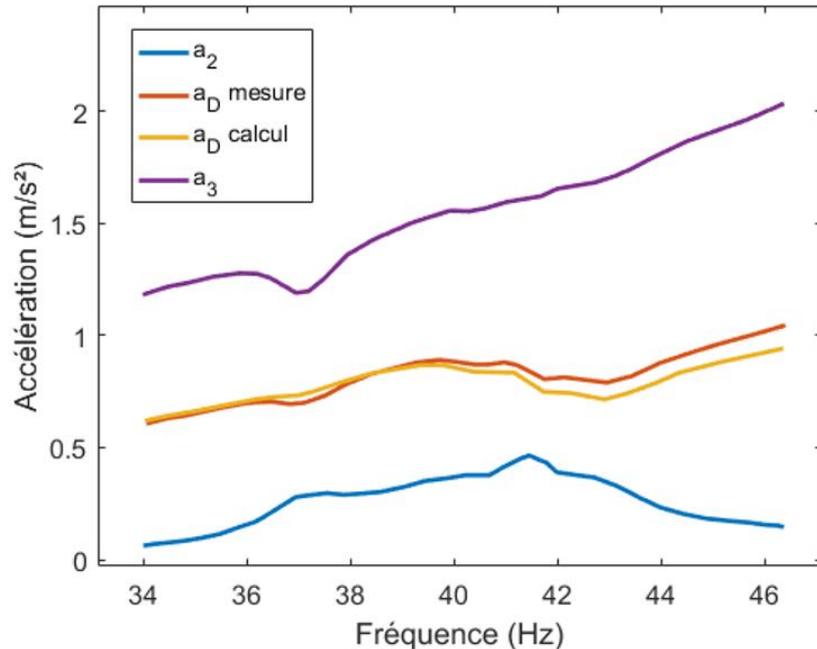


Figure 39 : vérification de l'approximation de corps rigide pour le calcul de l'accélération aux points d'interface Mains/Volant.

Il est d'usage, lors d'une mesure en véhicule, d'extraire l'excitation générée par les différents harmoniques moteur (source principale d'excitation dans le cadre de cette étude). Suite à l'analyse de la contribution relative de chacun d'eux, l'harmonique principal ( $H_2$ ) génère un niveau d'excitation  $20 \text{ dB}_{\text{vib}}$  supérieur aux autres harmoniques. Dans la suite de l'analyse, seules les contributions vibratoires générées aux fréquences de l'harmonique principal seront considérées.

### 1.6.2 Influence de la situation de conduite

Dans cette expérience, quatre situations ont été testées d'un point de vue vibratoire: volant libre, volant tenu par la main gauche, par la main droite et à deux mains. Comme on peut le voir sur la Figure 40, l'évolution du niveau vibratoire est marquée par les changements de situations. Il semble donc que la présence des mains ait un effet sur la réponse vibratoire

du volant. Il semble également que cet effet soit plus marqué lorsque les deux mains sont en contact avec celui-ci.

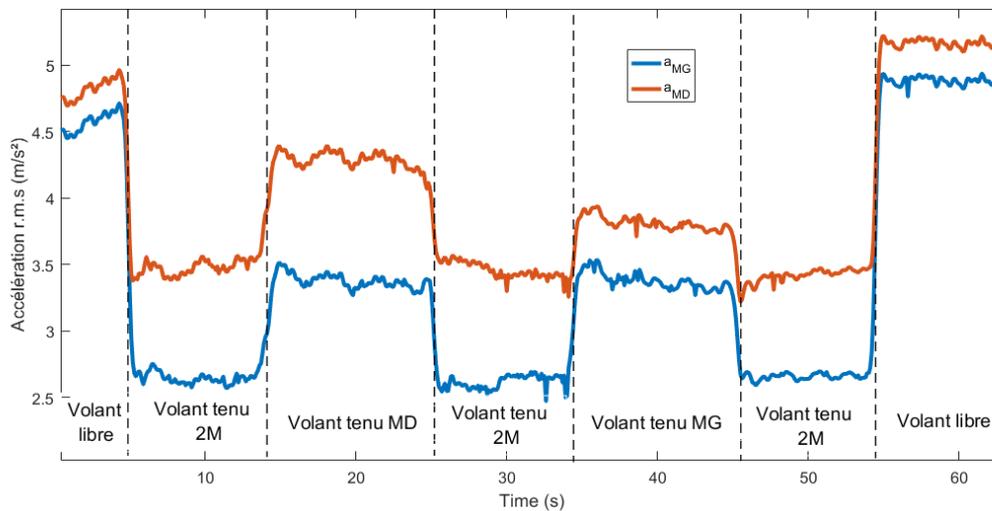


Figure 40 : évolution temporelle de l'accélération calculé au point G et D pour le participant 22, direction z.

Afin de caractériser l'influence des mains et des efforts appliqués, il est tout d'abord nécessaire de caractériser l'excitation volant libre car son niveau varie en fonction des participants. Comme on peut le voir sur la Figure 41, la variabilité du niveau de vibration est de l'ordre de  $3 \text{ dB}_{\text{vib}}$  entre les participants, que la mesure soit effectuée au point **G** ou au point **D**. Cette variabilité peut s'expliquer par les différents réglages de positions volant choisis par les participants lors de leur installation en véhicule. Cependant, ces réglages affectent uniquement l'amplitude d'excitation et n'a pas d'effet sur la fréquence, contrainte par le moteur à  $f_{H2} = 40 \text{ Hz}$ . On peut également remarquer sur la Figure 41 que l'excitation est majoritaire dans la direction **z** par rapport aux deux autres directions (en moyenne de  $5 \text{ dB}_{\text{vib}}$ ) du fait de la forte sollicitation du mode de colonne dans cette direction.

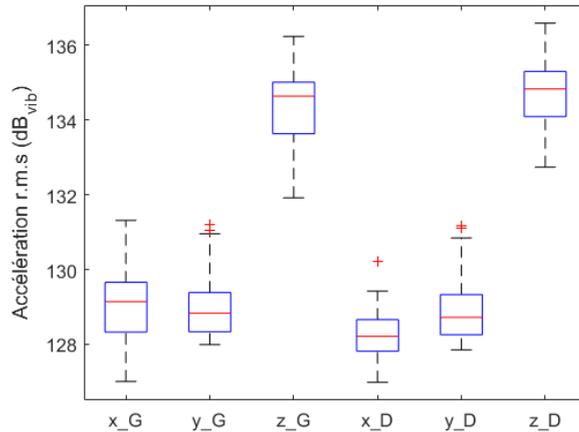


Figure 41 : variabilité du niveau d'accélération à 40 Hz pour la situation volant libre, sur l'ensemble du panel.

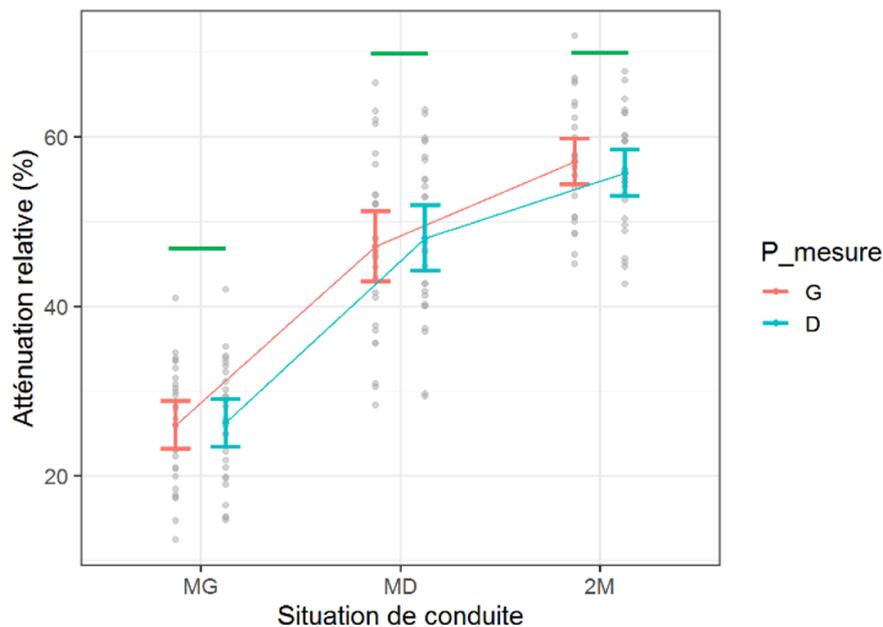
Afin de caractériser l'atténuation liée à la présence des mains sur le volant et compte tenu des différences d'excitation présentées Figure 41, il convient d'effectuer une comparaison relative entre l'excitation volant libre et volant tenu. De plus, les résultats obtenus par *Aldien et al.* [24] montrent que le système mains-bras peut être considéré comme linéaire en niveau pour des fréquences supérieures à 30 Hz. Une analyse des niveaux relatifs est donc possible. Dans la suite de l'étude, l'atténuation sera exprimée comme l'écart relatif entre l'accélération mesurée dans la situation volant libre et celle volant tenu :

$$\Delta_G = \frac{a_{G \text{ libre}} - a_{G \text{ tenu}}}{a_{G \text{ libre}}}$$

$$\Delta_D = \frac{a_{D \text{ libre}} - a_{D \text{ tenu}}}{a_{D \text{ libre}}}$$

La Figure 42 présente l'atténuation moyenne (calculée à partir des atténuations dans les trois directions de l'espace) pour chaque situation de conduite. Comme on peut le voir, l'atténuation est équivalente les point **G** et **D**. On peut également remarquer que la présence des mains a un effet important sur l'atténuation des vibrations. Celle-ci est plus importante lorsque le volant est tenu à deux mains, avec environ 58% d'atténuation. Lorsque le volant est tenu à une main, on peut voir que l'atténuation est différente en fonction de la main en contact avec le volant. A première vue, on aurait pu penser que les situations où le volant est tenu à une main allaient induire un niveau équivalent d'atténuation. En effet, même s'il existe

de petites différences physiologiques entre les mains, leur réponse mécanique est équivalente d'après la littérature. Il est donc naturel de penser que leur effet sur le volant aurait pu être équivalent, d'autant plus que les efforts appliqués par chaque main sont similaires. L'une des pistes d'explication pourrait être que la nappe, présente entre les mains et le volant, pourrait avoir une influence sur la réponse vibratoire du système couplé ou le couplage entre la main et le volant.



*Figure 42 : moyennes marginales et erreurs quadratiques des atténuations relatives en fonction de la situation de conduite et du point de mesure. La ligne verte représente les différences non significatives.*

Enfin, comme on peut le voir sur la Figure 43, l'effet de la direction d'excitation est important. L'atténuation est plus importante dans les directions **x** et **y** par rapport à la direction **z**. Ce résultat semble montrer le besoin de définir un modèle mécanique main-volant différent en fonction de la direction d'excitation.

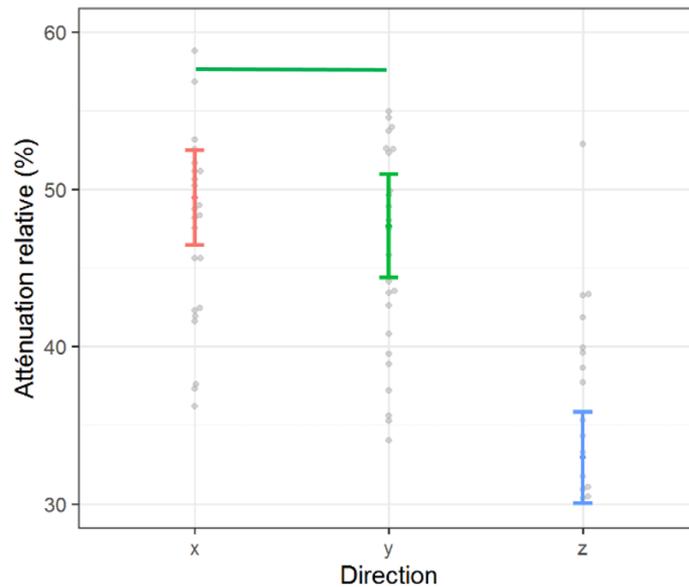


Figure 43 : moyennes marginales et erreurs quadratiques des atténuations relatives en fonction de la direction d'excitation. La ligne verte représente les différences non significatives.

### 1.6.3 Influence des efforts de poussée et de préhension

Comme on a pu le voir précédemment, il existe une variabilité importante de l'atténuation en fonction des participants. Une étude des corrélations entre les efforts statiques et l'atténuation relative a été réalisée. Afin de simplifier l'étude, seules les situations à une main ont été comparées aux efforts appliqués. L'étude montre qu'il n'existe pas de corrélation directe entre les efforts appliqués et l'atténuation. En effet, la corrélation la plus importante est atteinte entre l'atténuation relative dans la direction z et l'effort de poussée, avec un coefficient de détermination de Pearson de 0.55. Comme on peut le voir sur la Figure 44, présentant l'effort de poussée en fonction de l'atténuation, il ne semble pas que l'effort statique ait une influence directe sur l'atténuation relative. En revanche, il est possible que l'effort appliqué ait un effet sur le couplage entre la main et le volant. Dans le Chapitre 1, partie 2.3.2, la littérature a montré que ces efforts pouvaient avoir une influence sur la réponse mécanique de la main. Une étude plus détaillée des impédances mécaniques de la main et du couplage avec le volant, permettrait peut-être d'expliquer les différences entre les participants.

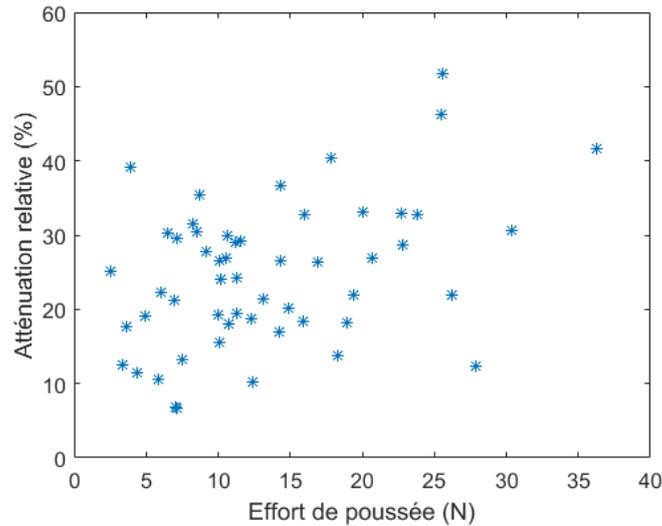


Figure 44 : comparaison entre effort de poussée et atténuation relative pour l'ensemble des participants.

## 1.7 Conclusion

D'un point de vue expérimental et méthodologique, cette expérience a permis la construction d'un système de mesure des efforts de poussée et de préhension en véhicule directement adaptable sur le volant. La procédure proposée par la norme ISO 15 230 semble adaptée à l'utilisation d'une matrice de capteurs sur un volant automobile. Ce système permet ainsi la construction d'une base de données des efforts de poussée et de préhension en situation de conduite automobile, dont le contenu était inexistant au sein du Groupe Stellantis.

A partir de ces mesures, l'étude a montré qu'en moyenne la pression appliquée par les hommes était sensiblement plus importante que celle appliquée par les femmes. En revanche, ni la taille des participants, ni la surface apparente de leurs mains n'affecte directement l'effort appliqué sur le volant. L'analyse a également montré que l'effort de préhension appliqué était en moyenne plus important (32 N) que l'effort de poussée (24 N). Il est possible que les conducteurs cherchent avant tout une adhérence avec le volant afin de garantir le maintien du véhicule. Cet effet s'accroît lors du passage d'une situation de conduite « normale » à une situation de conduite par mauvaises conditions météorologiques. La recherche d'un meilleur contrôle du véhicule pourrait aussi expliquer ce résultat, s'exprimant par une préhension plus importante du volant. Cependant, dans le cadre de mesure sur banc

d'essai, les nécessités de maintien du véhicule sont faibles et les conditions d'expériences par mauvaises conditions météo n'étaient pas reproduites. Ces résultats doivent donc être pris avec précaution. Enfin, l'expérience montre que les efforts statiques appliqués ne dépendent pas de l'excitation vibratoire du volant.

Les mesures vibratoires réalisées durant l'expérience ont quant à elles montré que l'effet de la main sur la réponse vibratoire du volant est important. Leur présence apporte une atténuation importante de l'excitation vibratoire, d'autant plus marquée lors de la présence des deux mains sur le volant. De plus, l'étude a montré qu'il existe de grandes différences entre les participants, avec des écarts d'atténuations de plus de 20% pour une même situation de conduite. Ces différences n'ont pu être expliquées ni par les différences anthropométriques ni par les différences d'efforts appliqués sur le volant. Une des pistes de réponse pourrait être les différences interindividuelles existantes entre les impédances mécaniques du bras, mises en évidence dans la partie 2.3.2 du Chapitre 1. Ces résultats illustrent l'une des problématiques abordée dans l'introduction. En effet, la caractérisation du niveau vibratoire en automobile, par une mesure volant libre, n'est pas représentative du niveau vibratoire réellement perçu par le conducteur. Cependant, une mesure volant tenu ne peut pas être envisagée du fait des différences importantes qu'il existe entre les participants. Afin de construire une méthode de caractérisation vibratoire du volant en accord avec l'excitation réellement perçue, une étude de l'impédance mécanique de la main et de son couplage est nécessaire.

## 2. Couplage dynamique main(s)/volant (Exp.2)

### 2.1 Prérequis : mise en équation du couplage Main(s)-volant

L'objectif de cette partie est de poser les hypothèses du couplage mécanique de la main et du volant afin d'aboutir à une expression du niveau vibratoire à l'interface main-volant. L'utilisation d'une méthode de couplage des mobilités mécaniques a été réalisée car elle permet d'évaluer la réponse vibratoire d'un système couplé à partir du comportement mécanique des systèmes non couplés.

#### 2.1.1 Cas du volant tenu à une main

Soient deux systèmes indépendants ;  $\{M\} = \{Main\}$  et  $\{V\} = \{Volant\}$ , couplés ponctuellement au point **C**, schématisés sur la Figure 45. Comme cela a été présenté dans le chapitre 1, partie 2.3.2, on définit la mobilité  $Y(C, A, \omega)$  comme le rapport entre l'effort dynamique  $F(A, \omega)$  appliqué au point **A** et la vitesse  $V(C, \omega)$  évaluée au point **C** tel que :

$$Y(C, A, \omega) = \frac{V(C, \omega)}{F(A, \omega)}$$

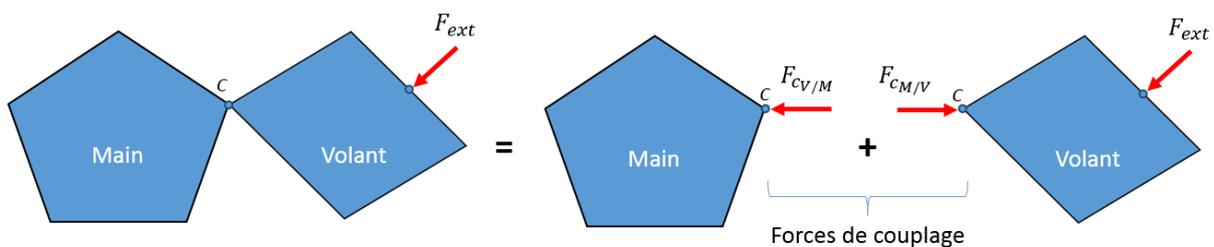


Figure 45 : schéma de représentation du couplage main-volant.

Au point C, considérons deux forces, appelées forces de couplages :

- $F_{CV/M}(C, \omega)$  : comme l'influence du système  $\{V\}$  sur la réponse vibratoire du système  $\{M\}$
- $F_{CM/V}(C, \omega)$  : comme l'influence du système  $\{M\}$  sur la réponse vibratoire du système  $\{V\}$

Dans la suite de l'analyse, les hypothèses suivantes seront considérées :

- {V} est soumis à l'excitation  $F_{ext}$  induite par le véhicule
- {M} est soumis uniquement à l'excitation du volant
- Il y a une relation de continuité des vitesses à l'interface:  $V_M(C, \omega) = V_V(C, \omega)$
- On peut appliquer le principe des actions réciproques à l'interface :

$$F_{C_V/M}(C, \omega) = -F_{C_M/V}(C, \omega)$$

De plus, on suppose que la vitesse à l'interface peut être calculée comme la contribution du système non couplé  $\tilde{V}(C, \omega)$  et de la vitesse induite par le couplage. Il en résulte :

$$V_M(C, \omega) = \tilde{V}_M(C, \omega) + Y_M(C, C, \omega) F_{C_V/M}(C, \omega) \quad (1)$$

$$V_V(C, \omega) = \tilde{V}_V(C, \omega) + Y_V(C, C, \omega) F_{C_M/V}(C, \omega) \quad (2)$$

Equations dans lesquelles  $Y_M(C, C, \omega)$  et  $Y_V(C, C, \omega)$  représentent les mobilités de la main seule et du volant seul, mesurées et évaluées au point  $C$ .

Cependant, si {M} n'est soumis qu'aux sollicitations vibratoires du volant et ne vibre pas au repos, alors  $\tilde{V}_M(C, \omega) = 0$  et l'équation (1) s'écrit simplement :

$$V_M(C, \omega) = Y_M(C, C, \omega) F_{C_V/M}(C, \omega)$$

A partir des équations (1) et (2) et des conditions de couplage à l'interface, il en résulte :

$$F_{C_V/M}(C, \omega) = -F_{C_M/V}(C, \omega) = \frac{\tilde{V}_V(C, \omega)}{Y_M(C, C, \omega) + Y_V(C, C, \omega)}$$

On en déduit que :

$$\boxed{V_V(C, \omega) = \tilde{V}_V(C, \omega) \left( 1 - \frac{Y_V(C, C, \omega)}{Y_M(C, C, \omega) + Y_V(C, C, \omega)} \right)} \quad (3)$$

Cette méthode permet de caractériser la vibration du volant  $V_V(C, \omega)$  à l'interface main-volant à partir de la vitesse du volant libre  $\tilde{V}_V(C, \omega)$ , de la mobilité du volant et de celle de la main. Cette équation devrait permettre de prédire le comportement du système couplé tout en assurant la robustesse de la mesure, qui dépendrait uniquement de la mesure volant libre.

## 2.1.2 Cas du volant tenu à deux mains

Soient trois systèmes indépendants ;  $\{MG\} = \{\text{main gauche}\}$ ,  $\{V\} = \{\text{volant}\}$  et  $\{MD\} = \{\text{main droite}\}$ , représentés Figure 46 et couplés deux à deux aux points **G** et **D**.

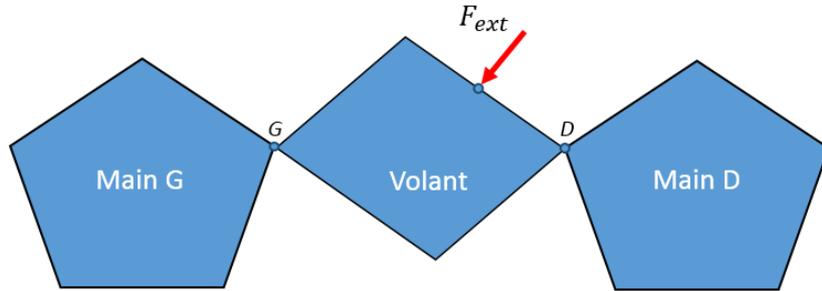


Figure 46 : schéma de représentation du couplage mains-volant.

De la même façon que lors du couplage à une main, on décompose la vitesse du système couplé comme la contribution du système non couplé et des couplages des systèmes  $\{MG\}$  et  $\{MD\}$  avec le volant. On considère également que dans la bande de fréquences étudiée ici (principalement au-dessus de 20 Hz) les deux mains ne sont pas couplées. De la même façon que pour le cas à une main, on fait l'hypothèse que les mains ne sont excitées que par le volant et ne vibrent pas au repos, soit :  $\widetilde{V}_{MG}(G, \omega) = 0$  et  $\widetilde{V}_{MD}(D, \omega) = 0$ .

Par application de ces hypothèses et par la décomposition de la vitesse au point **G**, on peut écrire :

$$V_V(G, \omega) = \widetilde{V}_V(G, \omega) + Y_V(G, G, \omega)F_{C_{MG/V}}(G, \omega) + Y_V(G, D, \omega)F_{C_{MD/V}}(D, \omega)$$

$$V_{MG}(G, \omega) = Y_{MG}(G, G, \omega)F_{C_{V/MG}}(G, \omega)$$

De la même manière on peut écrire au point **D** :

$$V_V(D, \omega) = \widetilde{V}_V(D, \omega) + Y_V(D, D, \omega)F_{C_{MD/V}}(D, \omega) + Y_V(D, G, \omega)F_{C_{MG/V}}(G, \omega)$$

$$V_{MD}(D, \omega) = Y_{MD}(D, D, \omega)F_{C_{V/MD}}(D, \omega)$$

Où  $Y_V(G, D, \omega)$  correspond à la mobilité croisée entre deux points du volant (avec un effort exercé au point **D** et une vitesse vibratoire mesurée au point **G**).  $F_{C_{MG/V}}$  et  $F_{C_{MD/V}}$  correspondent quant à eux aux efforts de couplage appliqués respectivement par la main gauche et la main droite sur le volant.

A partir des hypothèses de continuité de vitesse et d'équilibre des forces aux interfaces, on en déduit que :

$$F_{C_{MG/V}}(G, \omega) = \frac{\widetilde{V}_V(G, \omega)[Y_V(D, D, \omega) + Y_{MD}(D, D, \omega)] - \widetilde{V}_V(D, \omega)Y_V(G, D, \omega)}{Y_V(G, D, \omega)Y_V(D, G, \omega) - [Y_V(G, G, \omega) + Y_{MG}(G, G, \omega)][Y_V(D, D, \omega) + Y_{MD}(D, D, \omega)]}$$

$$F_{C_{MD/V}}(D, \omega) = \frac{-\widetilde{V}_V(G, \omega)Y_V(D, G, \omega) + V_V(D, \omega)[Y_V(G, G, \omega) + Y_{MG}(G, G, \omega)]}{Y_V(G, D, \omega)Y_V(D, G, \omega) - [Y_V(G, G, \omega) + Y_{MG}(G, G, \omega)][Y_V(D, D, \omega) + Y_{MD}(D, D, \omega)]}$$

Il en résulte :

$$V_V(G, \omega) = Y_{MG}(G, G, \omega) \frac{-\widetilde{V}_V(G, \omega)[Y_V(D, D, \omega) + Y_{MD}(D, D, \omega)] + \widetilde{V}_V(D, \omega)Y_V(G, D, \omega)}{Y_V(G, D, \omega)Y_V(D, G, \omega) - [Y_V(G, G, \omega) + Y_{MG}(G, G, \omega)][Y_V(D, D, \omega) + Y_{MD}(D, D, \omega)]} \quad (4)$$

$$V_V(D, \omega) = Y_{MD}(D, D, \omega) \frac{\widetilde{V}_V(G, \omega)Y_V(D, G, \omega) - \widetilde{V}_V(D, \omega)[Y_V(G, G, \omega) + Y_{MG}(G, G, \omega)]}{Y_V(G, D, \omega)Y_V(D, G, \omega) - [Y_V(G, G, \omega) + Y_{MG}(G, G, \omega)][Y_V(D, D, \omega) + Y_{MD}(D, D, \omega)]} \quad (5)$$

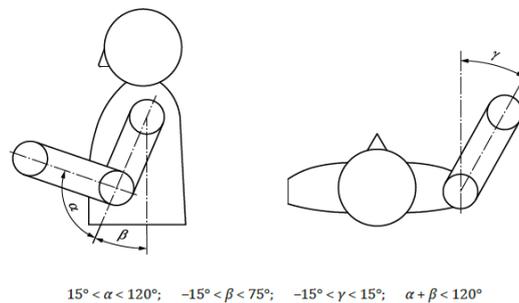
Ainsi, à partir de la connaissance du comportement mécanique du volant, de la main et du niveau vibratoire du volant libre, les relations (4) et (5) permettent de remonter à une estimation de l'excitation aux interfaces mains-volant.

## 2.2 Réponse mécanique du système main-bras

La mesure de l'impédance mécanique du système main-bras a été largement traitée dans la littérature, cf. partie 2.3.2 du Chapitre 1, mettant notamment en évidence une forte variabilité interindividuelle et une dépendance importante de l'impédance mécanique à la direction d'excitation. A partir de ces études, la norme ISO 10068 [33] propose de décrire l'impédance mécanique sous la forme d'une courbe d'impédance moyenne et d'une enveloppe composée d'une impédance minimum et maximum. L'enveloppe est construite fréquence par fréquence à partir des données de la littérature. Ces trois courbes permettent ainsi de tenir compte de la variabilité interindividuelle et des différences induites par les conditions expérimentales, également présentées dans la partie 2.3.2 du Chapitre 1.

Ces courbes décrivent le comportement vibratoire du bras d'un panel composé uniquement d'hommes pour les conditions suivantes :

- Une poignée circulaire d'un diamètre compris entre 19 et 45 mm
- Une gamme de fréquence comprise entre 10 Hz et 500 Hz
- Des efforts de poussée inférieure à 50 N
- Des efforts de préhension compris entre 25 et 50 N
- Une position du bras respectant les conditions décrites sur la Figure 47



*Figure 47 : positions du bras préconisées pour l'utilisation de la norme ISO 10 068.*

Dans cette étude, l'objectif est de prédire le comportement vibratoire du volant pour un large panel de conducteurs. L'utilisation de la norme semble donc appropriée pour décrire un maximum de situations. De plus, les plages d'utilisation de ces courbes sont adaptées à la conduite automobile. En effet, la zone de préhension de la jante d'un volant automobile mesure entre 30 et 40 mm de diamètre. De plus, la position des bras d'un conducteur moyen, présentée Chapitre 1, partie 1.5, est adaptée à l'utilisation de la norme. Ainsi, les courbes d'impédances mécaniques présentées Figure 48 seront considérées dans la suite de l'expérience pour décrire le comportement vibratoire de la main.

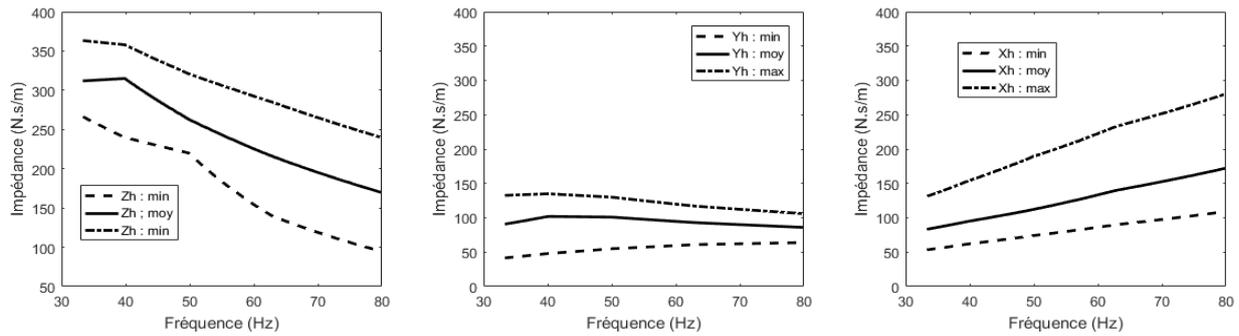


Figure 48 : enveloppe et courbe moyenne de l'impédance dans chaque direction de la main, selon ISO 10 068.

## 2.3 Expérience en véhicule

Dans cette expérience, l'objectif est d'évaluer l'influence des mains sur la réponse vibratoire du volant lors d'une sollicitation du groupe motopropulseur pour différentes situations de conduite. Par la suite, la méthode d'estimation des mobilités sera appliquée et évaluée dans sa capacité à prédire le comportement mécanique des situations testées.

## 2.4 Montage expérimental

### 2.4.1 Système

L'expérience est réalisée dans une Peugeot 308 essence quatre cylindres, montée sur un banc à rouleaux en salle semi-anéchoïque, comme lors de l'expérience précédente. Afin d'évaluer les niveaux vibratoires auxquels sont soumis les participants, 3 accéléromètres triaxiaux sont installés sur le volant (capteurs ICP® de sensibilité 10 mV/g) comme présenté sur la Figure 49. Enfin, le régime et couple moteur sont enregistrés au cours de l'expérience et permettent la synchronisation des essais. L'ensemble est enregistré par un système d'acquisition LMS SCADAS® multivoies.



Figure 49 : montage expérimental.

Afin de simplifier la compréhension de l'étude et la mise en place du modèle d'impédance, on introduit un repère orthonormé local  $(\mathbf{x}, \mathbf{n}, \mathbf{t})$  afin de décrire l'excitation vibratoire aux points de contact avec la main. La direction  $\mathbf{t}$  est tangente au volant, la direction  $\mathbf{n}$  est normale et la direction  $\mathbf{x}$  permet de former un repère orthogonal direct. Ces trois directions sont représentées Figure 50. Le repère  $(\mathbf{x}, \mathbf{n}, \mathbf{t})$  est similaire au repère  $(\mathbf{Z}_h, \mathbf{X}_h, \mathbf{Y}_h)$  décrit dans la norme ISO 10068 [33]. On pourra tout de même noter que les directions  $\mathbf{x}$  et  $\mathbf{Z}_h$  peuvent être sensiblement différentes du fait de la position des bras et du réglage de la colonne de direction. Cependant, l'enveloppe proposée par la norme inclut les variations liées à la position du bras, dont l'effet a été présenté sur la Figure 13. Il semble donc qu'on puisse associer les impédances mesurées dans les directions  $(\mathbf{Z}_h, \mathbf{X}_h, \mathbf{Y}_h)$  à celles du repère  $(\mathbf{x}, \mathbf{n}, \mathbf{t})$ .



Figure 50 : Repère volant.

## 2.4.2 Mobilité du volant aux interfaces main-volant

Afin de caractériser le comportement dynamique du volant, les mobilités de celui-ci ont été mesurées aux points d'interfaces **G** et **D** dans les trois directions de l'espace. La Figure 51, présente ces différents transferts. A titre de comparaison, les mobilités moyennes de la main ont été ajoutées. Comme on peut le voir, les dynamiques mesurées aux points **G** et **D** sont semblables dans les directions **n** et **t**, où l'on peut identifier les premiers modes propres de la colonne de direction autour de 37 Hz et de 43 Hz. Ces modes, présentés dans la partie 2.2 du Chapitre 1, correspondent au mode vertical (**z** véhicule) et horizontal (**y** véhicule) de la colonne de direction couplée à la traverse de planche de bord. On les retrouve ici sur les directions **n** et **t**, combinaisons linéaires des directions **y** et **z** véhicule. Dans la direction **x**, on peut voir qu'il existe une dissymétrie gauche/droite plus marquée. En effet, le second mode propre de la colonne de direction excite la direction **x** au point **D** alors qu'il n'excite pas cette direction au point **G**. De plus, le premier mode de jante volant, marqué par l'augmentation de la mobilité en haute fréquence, dont le maximum n'est pas représenté ici (autour de 86 Hz) est plus important au point **D** par rapport au point **G**. Bien que la géométrie du volant et de la colonne de direction soient symétriques, leur positionnement sur la traverse de planche de bord ne l'est pas. Comme on peut le voir sur la Figure 6, la fixation de la traverse de planche de bord est complexe et ne présente pas de symétrie gauche/droite par rapport à la fixation du volant. Ce constat peut expliquer les différences entre les mobilités mesurées aux points **G** et **D**.

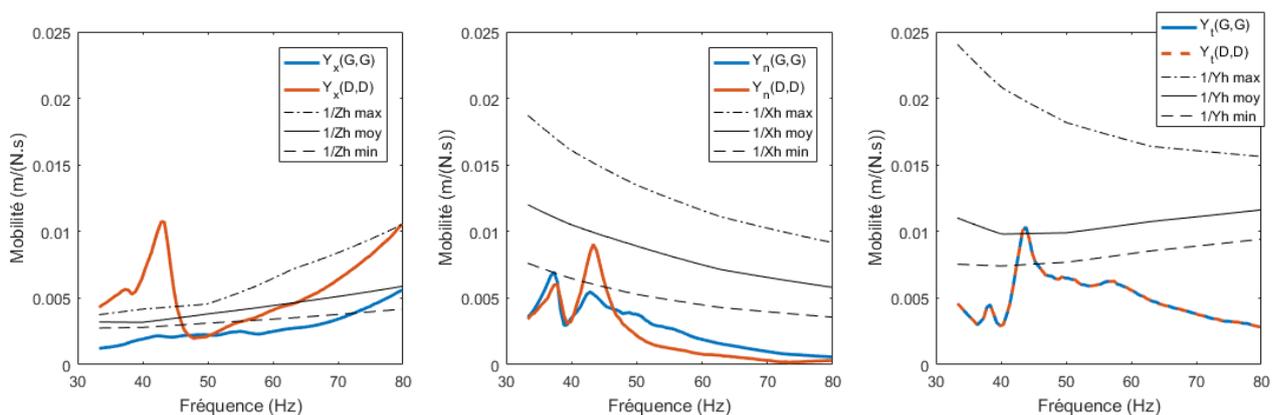


Figure 51 : mobilités mesurées aux points d'interfaces dans les trois directions de l'espace.

## 2.5 Participants

Huit conducteurs ont participé cette expérience. Une femme et sept hommes, âgés entre 26 et 48 ans (moyenne d'âge 38 ans) et mesurant entre 1.56 m et 1.92m (moyenne 1.75 m). Les participants déclarent ne présenter aucune pathologie liée aux vibrations et être en bonne santé. De plus, les longueurs et largeurs de leurs mains sont en accord avec l'enquête CEASAR (Civilian American and European Surface Anthropometry Resource), regroupant les données anthropométriques de plus de 4 000 personnes d'une population européenne et nord-américaine.

## 2.6 Protocole expérimental

Lors de l'expérience, les participants sont invités à s'installer à la place du conducteur et à régler la position du siège comme s'ils s'apprêtaient à conduire. Afin de limiter l'influence de la position du volant sur la réponse vibratoire de celui-ci, le réglage de la colonne de direction est fixé en position tiré, haut. La position des avant-bras des participants n'est pas mesurée mais elle respecte les préconisations présentée sur la Figure 47. Les sujets reçoivent des instructions orales en rapport avec le contexte de l'étude et la procédure de test avant le début de l'expérience. Une phase de familiarisation avec la conduite sur un banc à rouleaux est également mise en place.

L'objectif de l'expérience est d'évaluer le comportement dynamique du système Main(s)-volant couplé. Pour cela, quatre situations volant ont été identifiées : libre, tenu main gauche (*MG*), tenu main droite (*MD*) et tenu à deux mains (*2M*). Pour chacune de ces phases, il est demandé aux participants de poser leurs mains en position 10 h 10 sur le volant et de maintenir un effort constant durant la totalité de la mesure. Afin de limiter la dispersion sur l'effort appliqué, une série de dix préhensions d'une poignée calibrée à 15 N, présentée sur la Figure 52, est réalisée en amont de l'expérience.



*Figure 52 : poignée de référence.*

Pour chacune des situations de couplage, les participants réalisent une montée en régime en pleine accélération (PA, décrite partie 4 du Chapitre 1) en 3<sup>ème</sup> et 5<sup>ème</sup> rapport, entre 1000 et 2500 tr/min. Lors de chaque montée en régime, les niveaux vibratoires, le couple et le régime moteur sont enregistrés. De la même manière que lors de la précédente expérience, l'excitation vibratoire du volant est principalement due à l'harmonique principal moteur. Une montée en régime entre 1000 et 2500 tr/min se traduit donc par une excitation vibratoire majoritairement entre 30 Hz et 80 Hz (dans le cas d'un moteur 4 cylindres). Comme on peut le voir sur la Figure 53, présentant la mesure de l'accélération sur le volant lors d'une pleine accélération, l'harmonique principal fournit effectivement la majorité de l'excitation. Les excitations parasites, représentées par les lignes verticales sont quant à elles générées par le banc à rouleaux et non contrôlables. Dans une conduite sur route ouverte, ces excitations n'existeraient pas, elles seront donc négligées. Dans la suite de l'étude, seule l'excitation moteur sera considérée et l'évolution du niveau d'accélération sera présentée en fonction de la fréquence d'excitation de l'harmonique principal moteur,  $f_{H2}$ .

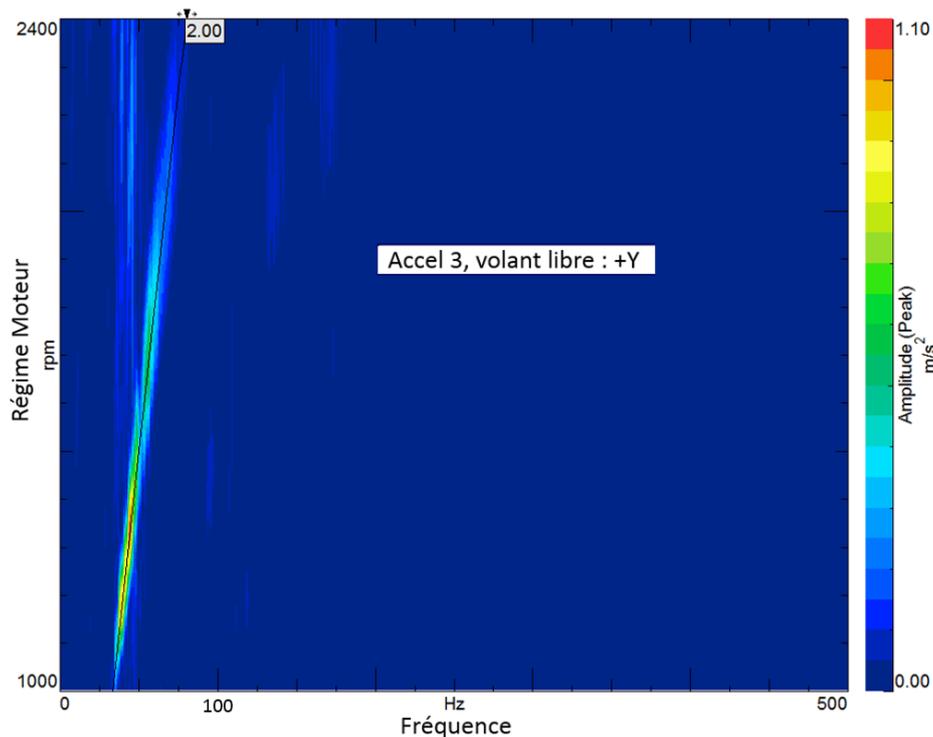


Figure 53 : représentation temps-fréquence de l'accélération mesurée dans la situation volant libre dans la direction  $Y$  (analogue à la direction  $t$ ) entre  $0 \text{ m/s}^2$  et  $1.1 \text{ m/s}^2$  ( $\sim 121 \text{ dB}$ ).

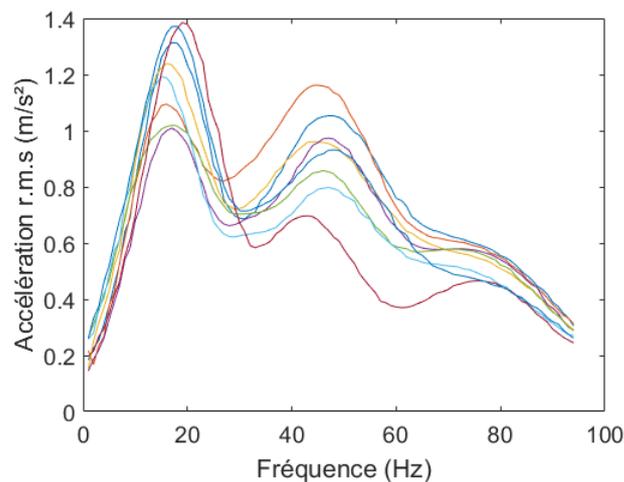
## 2.7 Pré-analyse

### 2.7.1 Approximation de corps rigide

Dans un premier temps, afin de simplifier l'étude, les niveaux vibratoires ont été évalués à l'interface main/volant. Pour cela, une approximation de corps solide du volant est utilisée. L'accélération au point **G** est calculée comme la moyenne des mesures des accéléromètres 1 et 2, celle du point **D** comme la moyenne des mesures des accéléromètres 2 et 3. Cette approximation a été proposée lors de la première expérience et semble raisonnable loin du premier mode propre du volant. Dans cette expérience, le premier mode de structure de la jante du volant se trouve à 86 Hz. Cependant, la Figure 51 montre bien que cette simplification est excessive à partir de 60 Hz ou 70 Hz en fonction du point de mesure. A des régimes moteur élevés, il est donc possible que cette approximation soit une source d'erreur dans l'estimation du niveau vibratoire.

## 2.7.2 Variabilité de la mesure

L'expérience s'est déroulée sur un banc à rouleau afin d'assurer une certaine robustesse de l'excitation vibratoire. Lors d'essais successifs, la procédure est répétable, c'est-à-dire que pour un même participant les mesures volant libre sont répétables. En revanche, comme on peut le voir Figure 54, les mesures des vibrations du volant libre varient entre les essais réalisés par des participants différents. Bien que ceux-ci aient réalisé une accélération en pleine charge, c'est-à-dire avec un enfoncement pédale maximum, des écarts existent sur les amplitudes du couple moteur entre deux participants. Ces écarts sont suffisamment importants pour expliquer les différences entre les niveaux d'excitation mesurés et pourraient provenir de différences de température du moteur entre les participants ou du couple résistant exercé par le banc.



*Figure 54 : mesure volant libre, au point D, lors d'une 3<sup>ème</sup> PA, pour la totalité des participants.*

Afin de tenir compte de cette variabilité dans l'analyse, l'excitation à une fréquence donnée sera présentée par la médiane et les intervalles interquartiles à 25% et 75% des mesures individuelles.

## 2.8 Résultats

### 2.8.1 Calcul de l'atténuation relative

L'objectif de cette expérience est de quantifier l'influence des mains sur la réponse vibratoire du volant afin d'estimer l'excitation perçue par les conducteurs. De la même façon que dans l'expérience précédente, la notion d'atténuation relative est introduite. Elle est calculée comme la différence relative entre l'excitation volant libre et l'excitation volant tenu, pour chaque participant. Enfin, la médiane et les intervalles interquartiles sont calculés à partir des atténuations relatives individuelles.

### 2.8.2 Influence de l'excitation vibratoire

Lors de l'expérience, deux vitesses ont été testées, la 3<sup>ème</sup> et la 5<sup>ème</sup>. Comme on peut le voir sur la Figure 55, ces deux vitesses génèrent une excitation vibratoire différente, avec une excitation plus importante en 5<sup>ème</sup> vitesse. Lors de l'utilisation de ce rapport, on peut également remarquer une émergence d'excitation autour de 55 Hz, non présente en 3<sup>ème</sup>. Ce pic est lié à la réponse du ressort de suspension de train avant, fortement excité par le couple acyclique moteur (bien supérieur sur le 5<sup>ème</sup> rapport). Si l'on compare à présent l'excitation volant libre et volant tenu entre la 3<sup>ème</sup> et la 5<sup>ème</sup> vitesse, on peut voir sur la Figure 56 que l'atténuation relative est équivalente entre ces deux situations. Ce résultat est vrai pour l'ensemble des situations et dans chaque direction d'excitation. Il montre donc une certaine robustesse du couplage main-volant et de l'approche choisie. En effet, bien qu'il existe de la variabilité dans l'excitation vibratoire entre les participants, ce constat montre que l'atténuation relative semble peu affectée par les variations de niveau. Il traduit également une certaine linéarité du système main-bras, largement proposée dans la littérature pour des variations équivalentes de niveau [24], [25]. Dans la suite de l'analyse, seuls les résultats pour la 3<sup>ème</sup> vitesse seront présentés du fait de l'équivalence des résultats entre les deux situations.

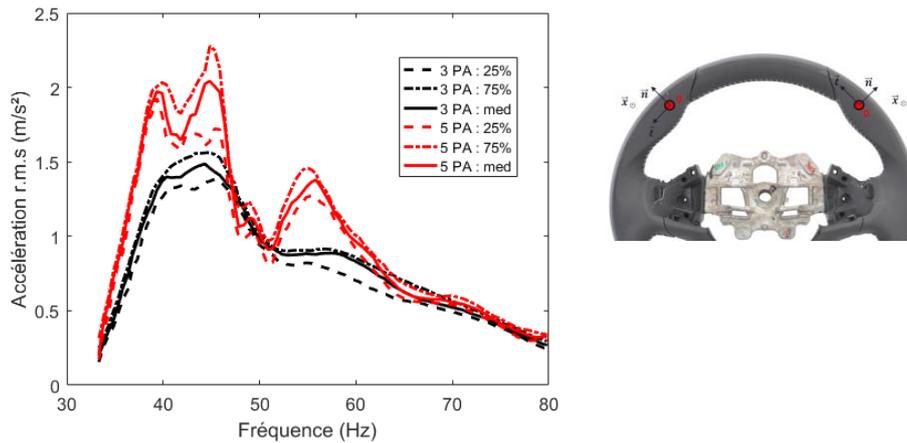


Figure 55 : comparaison entre la 3<sup>ème</sup> et la 5<sup>ème</sup> vitesse, volant libre, dans la direction  $n$ , au point  $D$ .

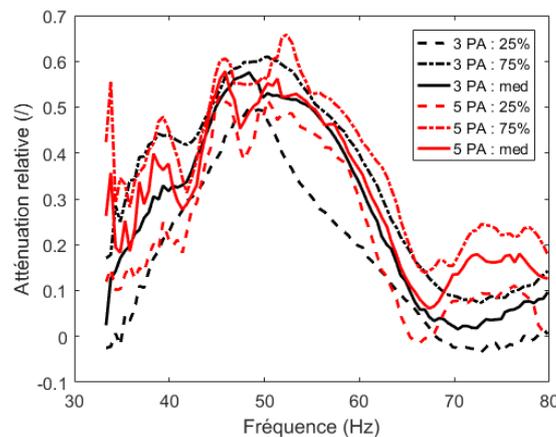


Figure 56 : atténuation relative mesurée au point  $D$ , dans la direction  $n$ , pour la situation MD.

### 2.8.3 Influence de la situation de conduite sur la réponse vibratoire

Quatre situations vibratoires ont été testées : volant libre, volant tenu en main gauche ( $MG$ ), volant tenu en main droite ( $MD$ ) et volant tenu à deux mains ( $2M$ ). Comme on peut le voir sur la Figure 57, la présence des mains sur le volant atténue le niveau d'excitation vibratoire dans la direction  $x$ . On peut remarquer que l'atténuation est plus importante dans la situation  $2M$  par rapport à la situation  $1M$ . En effet, en moyenne l'atténuation dans la direction  $x$  est de l'ordre de 30% dans la situation  $1M$  contre 48% dans la situation  $2M$ . Ces résultats sont vrais dans l'ensemble des directions d'excitation, comme on peut le voir en Annexe 2. De manière générale, l'atténuation est importante sur une grande partie de la plage de fréquence, atteignant près de 80% d'atténuation à des fréquences particulières due à la présence des deux mains sur le volant.

Dans les directions **n** et **t**, les atténuations dues à la main gauche ou la main droite sont similaires. Dans la direction **x**, il existe une dissymétrie de l'atténuation pour des fréquences supérieures à 60 Hz. Comme on peut voir sur la Figure 57, au-dessus de 60 Hz il n'y a pas ou peu d'atténuation au point **D** alors qu'il existe une atténuation au point **G**. Il est curieux que l'effet de la main droite et de la main gauche soient si différents. En effet, bien que des différences anthropologiques existent entre les mains, il est difficile de croire qu'elles puissent induire de telles différences de comportement. En revanche, l'une des pistes d'explication pourrait être les différences existantes entre les mobilités du volant au point **G** et au point **D**. Comme on peut le voir sur la Figure 51, la mobilité mesurée dans la direction **x** est plus importante au point **D** qu'au point **G**. Comme on a pu le voir précédemment, l'augmentation de la mobilité dans cette zone fréquentielle est due au premier mode propre de la jante du volant. Aux vues des mobilités mesurées, ces déflexions sont plus importantes au point **D** qu'au point **G**. Ainsi, l'accélération estimée à au point **D** par l'approximation de corps rigide pourrait être erronée au-dessus de 60 Hz et expliquer les différences entre le point **G** et **D**. Afin d'écarter cette source d'erreur potentielle, il semblera donc nécessaire dans de prochaines expériences de réaliser les mesures vibratoires directement à l'interface main(s)-volant. On peut cependant noter que dans une logique d'amélioration du confort en véhicule, l'objectif principal est d'estimer les forts niveaux vibratoires, souvent induits par les premiers modes propres de la colonne de direction ( $f < 50$  Hz). Ainsi, une évaluation des faibles niveaux d'excitations et des fréquences élevées, ne semblent pas être la priorité au premier ordre.

Dans l'expérience 1, les atténuations ont été estimées pour une excitation stationnaire à 40 Hz. Dans cette expérience, l'atténuation a également été évaluée à 40 Hz lors des montées en régime. Cependant, il n'est pas possible de comparer directement les résultats trouvés. En effet, bien que les véhicules testés soient similaires (deux 308) la réponse vibratoire de leur système de direction est sensiblement différente mais rentre dans la fourchette de dispersion de production de ces systèmes. On peut tout de même noter que l'atténuation globale autour de 40 Hz ( $\Delta f \sim 1$  Hz) est similaire pour la situation *MG* (avec 31% d'atténuation contre 29% lors de l'expérience 1) et pour la situation *2M* (avec 53% contre 58% dans l'expérience 1). Pour la situation *MD*, la comparaison a peu de sens car dans la première expérience, l'atténuation semble avoir été perturbée par la présence de la nappe Xsensor®. Cette hypothèse a été évoquée car les niveaux d'atténuation dans la situation *MD* étaient plus

proches de la situation 2M que de la situation MG. Cette hypothèse semble se valider ici. En effet, dans cette nouvelle expérience, sans nappe de capteurs, l'atténuation entre les situations MG et MD est similaire autour de 40 Hz, 31% et 38%, et nettement inférieure à l'atténuation dans la situation 2M.

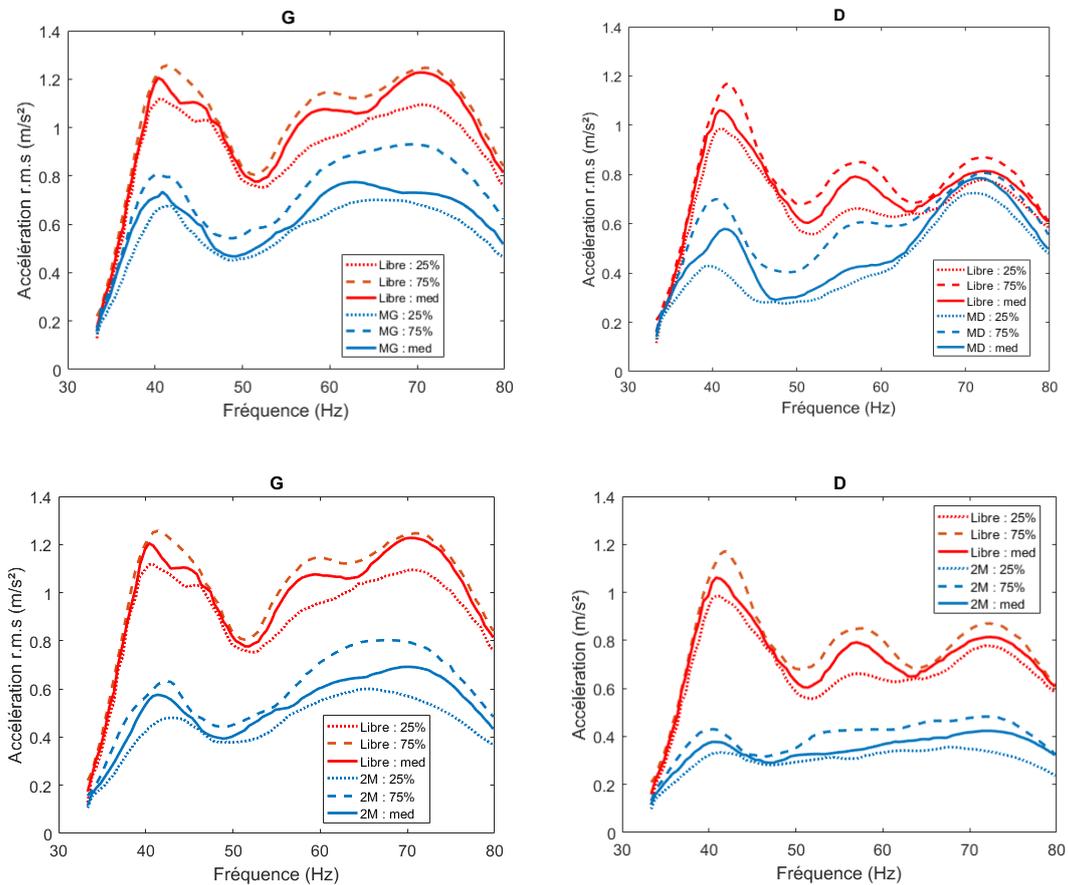


Figure 57 : atténuation en fonction de la situation de couplage dans la direction  $x$ , 3<sup>ème</sup> PA.

## 2.8.4 Influence de la direction d'excitation

La Figure 58 présente l'atténuation relative dans la situation « volant tenu à deux mains », pour chaque direction d'excitation. Comme on peut le voir, l'atténuation est similaire, avec une croissance jusqu'à un maximum compris entre 38 Hz et 55 Hz puis une décroissance de l'atténuation avec l'augmentation de la fréquence. Dans cet exemple, on peut voir que l'atténuation est nettement moins marquée au-dessus de 60 Hz dans la direction  $n$ , mais cet effet n'est pas vrai pour l'ensemble des situations de couplage. Il ne semble donc pas exister d'effet de la direction d'excitation sur l'atténuation. Cependant, le comportement

vibratoire du volant est différent dans les trois directions de l'espace, il est donc nécessaire de construire des modèles de couplage direction par direction.

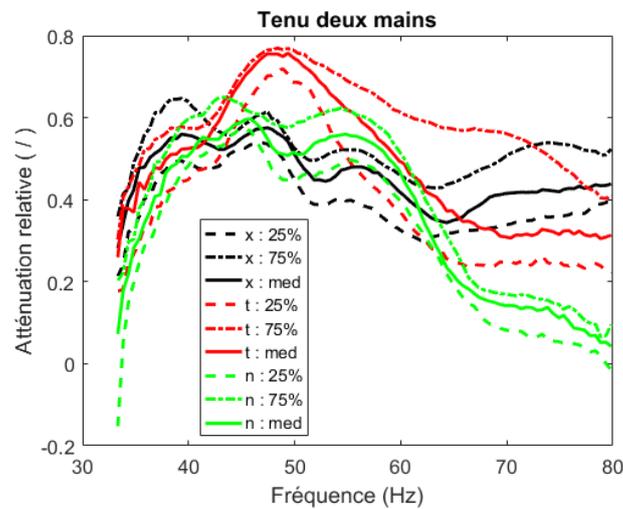


Figure 58 : comparaison entre les atténuations relatives pour chaque direction de l'espace.

## 2.8.5 Synthèse

Cette expérience a montré qu'il existait une certaine variabilité de l'excitation du moteur de l'ordre de 3 dB pour les vibrations du volant libre. Ces différences pourraient être expliquées par des variations de température du moteur, dont l'effet pourra être écarté lors de prochaines mesures. De plus, la réalisation de l'expérience en 3<sup>ème</sup> et en 5<sup>ème</sup> rapport a montré que le comportement du système main-volant était peu influencé par le niveau vibratoire entre 30 Hz et 80 Hz, pour des variations jusqu'à 6 dB. Ce résultat apporte de la robustesse à l'expérience et semble écarter les problématiques liées aux variations d'excitation volant libre. Cette expérience a également permis de confirmer que la présence de la main modifie le comportement vibratoire du volant. Celle-ci se traduit par une atténuation importante de l'excitation vibratoire, atteignant jusqu'à 80% à certaines fréquences d'excitation. Cet effet est vrai pour l'ensemble du spectre testé, avec une atténuation moyenne de l'ordre de 30% dans la situation 1M et de l'ordre de 45% pour la situation 2M. Ces différents résultats montrent que la mesure volant libre n'est pas représentative du niveau perçu par les conducteurs. Ainsi, il semble nécessaire d'utiliser un modèle prédictif afin d'obtenir une approximation plus précise de l'excitation perçue.

## 2.9 Prédiction à partir du modèle de la norme

### 2.9.1 Mise en place du modèle prédictif

A partir de la mobilité du volant et des courbes d'impédance proposées par la norme ISO 10068 [33], trois modèles de couplage ont été générés :

- « Mdl min » : correspondant au modèle de couplage du volant avec la courbe minimum d'impédance du système main-bras décrit par la norme
- « Mdl moy » : correspondant au couplage du volant avec la courbe moyenne d'impédance du système main-bras décrit par la norme
- « Mdl max » : correspondant au couplage du volant avec la courbe maximum d'impédance du système main-bras décrit par la norme

Afin de simplifier le problème, les mobilités entre les directions croisées du volant ont été négligées. La matrice de mobilité du volant est donc considérée diagonale et le problème peut être traité direction par direction. Dans le but de vérifier la robustesse de la modélisation, un cas théorique a été construit à partir d'un modèle éléments finis d'un système de direction de 308 couplé ponctuellement au modèle moyen de main proposé par la norme. Pour une excitation volant libre, le calcul de la réponse vibratoire du système couplé a été réalisé à partir du modèle éléments finis et de l'équation (3). Ces deux approches donnent des résultats très similaires. La méthode de couplage développée ici permet donc de prédire le couplage du modèle de main avec la simulation numérique du volant. Ceci tend à valider l'approche théorique ainsi que la procédure de calcul.

Note : l'analyse des mesures expérimentales a montré qu'il existait une variabilité de l'excitation volant libre. Afin d'en tenir compte, les prédictions ont été calculées pour chaque courbe de vitesse volant libre, puis la médiane et les intervalles interquartiles ont été déterminés à partir de ces estimations.

## 2.9.2 Influence du modèle

La Figure 59 présente l'accélération volant libre, la mesure de l'excitation volant tenu dans la situation *MG* et les prédictions des trois modèles. On peut voir dans cet exemple que les trois modèles donnent des résultats différents, avec des écarts de l'ordre de 1.5 dB entre « Mdl moy » et les autres modèles. Ceci conduit donc à une variation de l'ordre de 3 dB en moyenne entre le modèle minimum et maximum et jusqu'à 4.5 dB autour de 44 Hz. Ces différences de niveaux d'excitation sont analogues à celles mesurées lors de l'expérience, avec une variabilité de l'ordre de 2.2 dB entre les courbes interquartiles et un maximum de 3.7 dB. Sur la Figure 59, on peut voir que le modèle « Mdl moy » donne la meilleure approximation de l'excitation aux fréquences pour lesquelles la vibration du volant libre est maximale (entre 40 Hz et 50 Hz). Ce résultat est vrai pour l'ensemble des directions d'excitation et pour les trois situations testées. Dans la suite de l'analyse, seuls les résultats de ce modèle seront présentés, tout en gardant à l'esprit qu'ils sont encadrés par les deux autres modèles avec une différence de plus ou moins 1 dB.

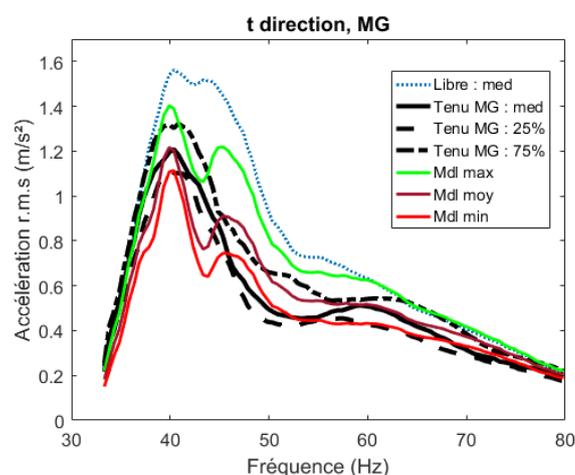


Figure 59 : comparaison entre la mesure volant libre, la mesure volant tenu main gauche et l'estimation des modèles prédictifs.

## 2.9.3 Cas du couplage à une main

Sur la Figure 60, sont présentés les résultats pour la situation *MD* dans les trois directions de l'espace. Les résultats de la situation *MG* sont représentés en Annexe 3. Tout d'abord, on peut constater que la modélisation proposée par la norme apporte une atténuation de l'excitation sur l'ensemble du spectre. Le niveau de vibration estimé donne

donc une idée plus réaliste de l'excitation réellement perçue que la mesure volant libre. Dans la direction **t**, la courbe médiane de l'estimation est comprise dans l'intervalle interquartile des mesures, offrant ainsi une approximation très satisfaisante pour les deux situations de conduite. Dans la direction **n**, l'estimation est quant à elle plus en écart avec les courbes mesurées. En effet, l'atténuation prédite par le modèle sous-estime de façon générale l'atténuation réelle. De plus, le modèle de couplage génère une émergence d'excitation autour de 48 Hz, non présente sur la mesure médiane ni sur les mesures individuelles. Dans le modèle de couplage, ce phénomène ne semble pas être généré par la mobilité de la main, dont on peut voir sur la Figure 48 que la dépendance en fréquence est faible. Il semble plus probable que ce mode soit induit par la mobilité du volant dont la dépendance fréquentielle est marquée. L'une des possibilités est que cette émergence soit générée sur la courbe du fait d'un phénomène d'anti résonance autour de 43 Hz. En effet, comme on peut le voir sur la Figure 60, une atténuation importante apparaît autour de 43 Hz, fréquence de résonance du système de direction, laissant apparaître ensuite un pic à 48 Hz. Il est donc probable que le problème provienne de cette erreur d'estimation plutôt que d'un phénomène non expliqué à 48 Hz. De plus, on peut remarquer que la même inflexion se produit autour de 38 Hz, autre fréquence propre du système de direction. D'après l'équation (3), lorsque la mobilité du volant augmente, l'atténuation relative tend également à augmenter et explique les phénomènes à 38 Hz et 43 Hz sur la courbe rouge de la Figure 60. D'une façon plus générale, l'estimation réalisée par le modèle dans la direction **n** est peu satisfaisante pour l'ensemble des situations de conduite. Bien qu'apportant une atténuation de l'excitation par rapport à la mesure volant libre, la modélisation ne suffit pas à traduire le niveau d'excitation réellement perçu par les conducteurs.

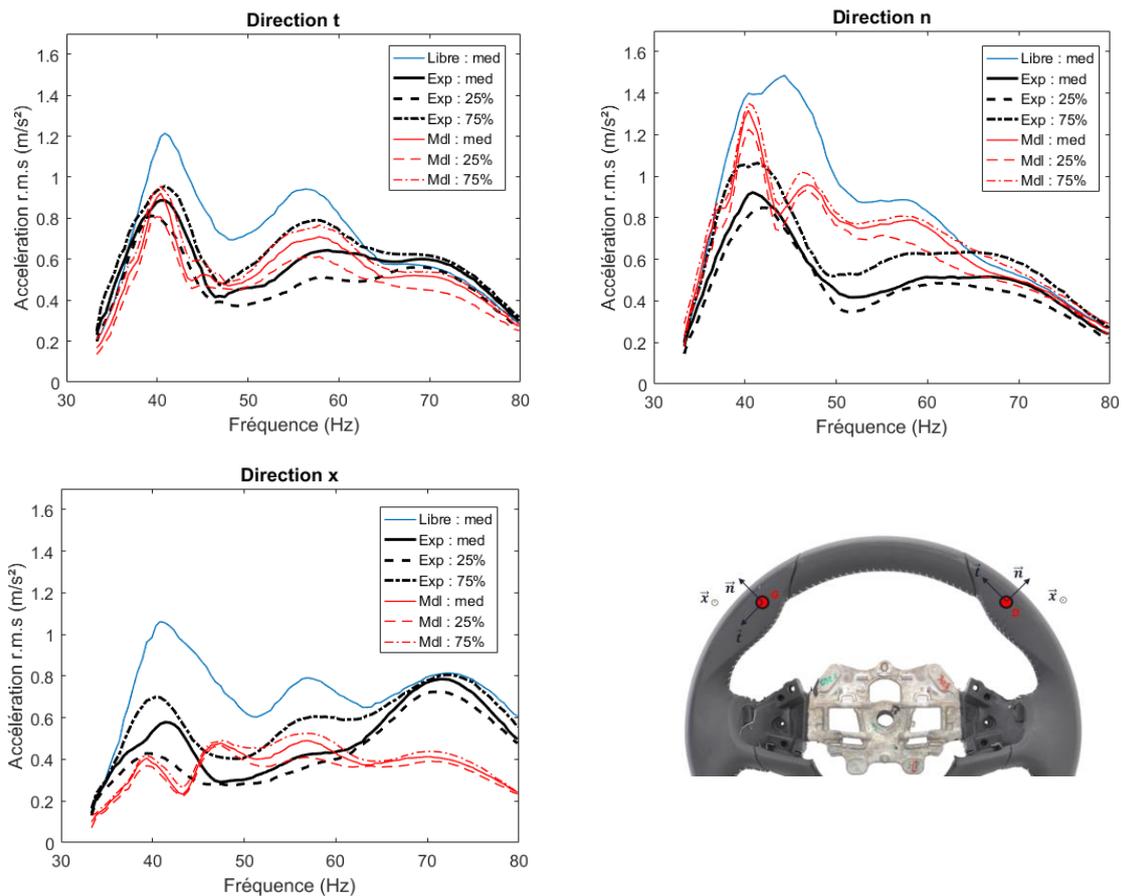


Figure 60 : excitation volant libre, médiane et interquartiles mesurés et prédit pour la situation volant tenu en main droite.

Dans la direction  $x$ , l'estimation est satisfaisante en dessous de 65 Hz pour la situation *MD* bien que l'approximation sous-estime un peu le niveau d'excitation aux fréquences proche de celles du premier mode de colonne de direction. Autour de cette fréquence, « Mdl max » dont l'estimation est supérieure d'environ 1 dB donne un résultat plus précis, mais tend à surestimer l'excitation à plus hautes fréquences. On peut voir sur la Figure 60, qu'au-dessus de 65 Hz, la qualité de l'estimation décroît rapidement. Comme cela a été proposé précédemment, l'approximation de corps rigide n'est pas valable pour prédire le niveau d'excitation à l'interface. La comparaison entre l'estimation et la mesure n'est donc pas possible. En revanche, on peut voir en Annexe 3, que l'estimation réalisée dans la direction  $x$  pour la situation *MG* est en accord avec la mesure au-dessus de 65 Hz. On peut donc imaginer qu'un résultat équivalent existe au point **D**.

Pour synthétiser, la comparaison du modèle et de la mesure au point **G** montre le bon fonctionnement du modèle prédictif dans la direction **x**. Elle montre également la cohérence du modèle de main pour estimer l'accélération au point **D** en dessous de 65 Hz. Ainsi, si l'on s'affranchit de l'approximation de corps solide, par exemple en réalisant une mesure volant libre au point **D** directement au point d'interface, l'estimation donnée par le modèle devrait être proche du niveau réellement présenté au conducteur sur l'ensemble du spectre. Les résultats proposés ici sont très satisfaisants pour les directions **t** et **x**. En revanche, il réside un problème dans l'estimation du niveau dans la direction **n**. Afin de tenter d'améliorer son estimation, un modèle plus complexe a été construit. Il intègre l'ensemble des transferts croisés du volant, négligés jusqu'ici. La matrice des mobilités du volant s'écrit alors de la façon suivante :

$$Y_v = \begin{bmatrix} Y_{xx} & Y_{xy} & Y_{xz} \\ Y_{yx} & Y_{yy} & Y_{yz} \\ Y_{zx} & Y_{zy} & Y_{zz} \end{bmatrix}$$

Où  $Y_{ij}$  correspond à la mobilité dont l'effort est appliqué dans la direction  $j$  et la vitesse est évaluée dans la direction  $i$ .

La résolution du système d'équations a été conduite sous une forme matricielle afin de tenir compte de ces effets croisés. A partir des hypothèses mises en place en première partie, l'évaluation de la vitesse à l'interface main-volant  $\bar{V}$ , s'écrit finalement sous la forme :

$$\bar{V} = \tilde{V}_v + \tilde{V}_v \cdot Y_v (Y_v + Y_m)^{-1} \cdot \tilde{V}_v \quad (6)$$

Où  $Y_v$  est une matrice (3,3) contenant l'ensemble des mobilités du volant,  $Y_m$  est une matrice diagonale contenant les mobilités proposées par la norme et  $\tilde{V}_v$  le vecteur des vitesses à l'interface main-volant, dans la situation volant libre.

Sur la Figure 61 sont présentés les résultats calculés à partir de l'équation (6) pour la situation *MD*. Dans la direction **n**, cette nouvelle modélisation apporte une atténuation plus importante que la précédente autour de 40 Hz, se traduisant par une approximation du niveau plus satisfaisante. En revanche, entre 45 Hz et 50 Hz, l'atténuation est très importante et donne une estimation erronée du niveau d'excitation. Cette erreur d'approximation n'est pas liée au mauvais conditionnement du problème matriciel. Il semble que ces erreurs soient dues

à des oppositions de phase des transferts mesurés du volant, mais il est difficile d'expliquer la cause de ces différences. De plus, le cas idéal construit par éléments finis montre le fonctionnement théorique de la méthode et écarte une possible erreur dans le calcul de l'estimation. Cette nouvelle modélisation n'apporte donc pas d'amélioration notable par rapport à une modélisation sans transferts croisés. De plus, comme on peut le voir sur la Figure 61, cette modélisation tend à dégrader la qualité de l'approximation dans les autres directions. Dans la direction  $\mathbf{t}$ , l'approximation autour de 40 Hz est nettement moins satisfaisante que celle du modèle simple. Autour de cette fréquence, le conditionnement de la matrice augmente de façon significative et pourrait expliquer l'erreur générée. Le modèle simple sera donc conservé dans la suite de l'analyse.

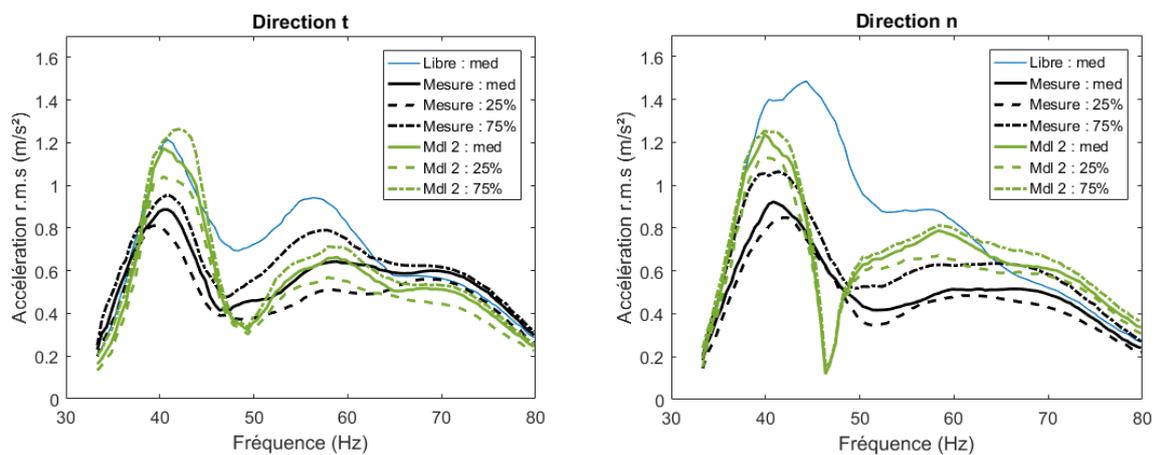


Figure 61 : excitation volant libre, médiane et interquartiles mesurés et prédit pour la situation volant tenu en main droite.

## 2.9.4 Cas du couplage à deux mains

A partir des équations (4) et (5) ainsi que des mobilités du volant et de la main, l'estimation de la vitesse à l'interface a été calculée aux points **G** et **D**. De la même façon que pour le cas précédent, la mobilité moyenne de la norme donne l'estimation la plus satisfaisante dans les trois directions de l'espace. Afin de simplifier la lecture, seule cette modélisation sera représentée et appelée « Mdl ». Dans cette approche, les mains sont considérées comme deux systèmes indépendants, dont la réponse mécanique est identique (représentée par la mobilité de la norme). Les résultats de la modélisation sont présentés sur la Figure 62 pour le point **D** et les résultats au point **G** sont représentés en Annexe 3.

Le même constat que dans le cas du couplage à une main peut être fait. On peut voir que l'estimation est très satisfaisante pour les directions  $t$  et  $x$ . Dans la direction  $x$ , on retrouve le phénomène d'anti résonance évoqué plus tôt autour de 43 Hz, dont l'effet tend à générer une émergence autour de 48 Hz. On peut également remarquer que cet effet apparaît dans la direction  $n$ , direction dans laquelle l'estimation du modèle est moins précise. Dans cette direction, les atténuations à 38 Hz et à 43 Hz sont marquées par les modes propres du système de direction. Au point  $G$ , dont les résultats sont présentés en Annexe 3, l'estimation est satisfaisante dans les direction  $t$  et  $x$ .

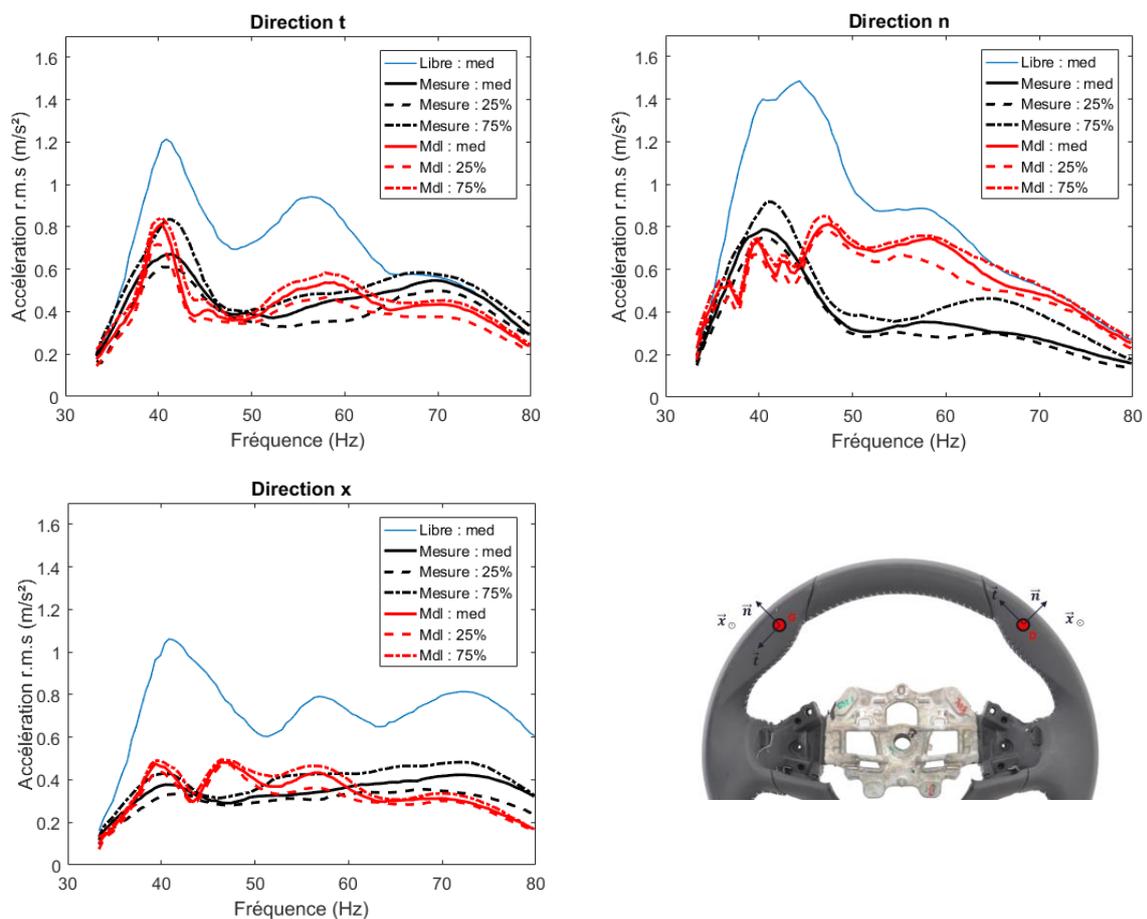


Figure 62 : estimation de l'accélération au point D pour la situation volant tenu à deux mains.

## 2.10 Conclusion

Cette expérience montre l'intérêt de modéliser le comportement mécanique du système main(s)-volant afin d'obtenir une meilleure estimation du niveau réellement présenté aux conducteurs. La modélisation proposée ici, basée sur le couplage des mobilités, donne des résultats encourageants. Comme on a pu le voir, la prédiction du modèle est satisfaisante pour la direction **t**. Elle apporte une idée plus précise des niveaux vibratoires présentés aux participants. Dans les directions **x** et **n**, certaines émergences sont mal estimées et l'utilisation de la modélisation pourrait être une source d'erreur lors de l'évaluation de l'inconfort. En effet, si l'évaluation de l'inconfort se base sur les estimations du modèle, il se peut que l'on juge une émergence comme trop importante alors qu'elle serait non présente à la mesure. Cependant, les erreurs d'estimations du modèle correspondent aux erreurs moyennes de mesure en véhicule lors d'essais sur piste. En conséquence, l'utilisation du modèle dans ce cadre pourrait donner des résultats acceptables. Cette expérience permet ainsi de proposer des préconisations de mesure afin d'accroître la robustesse de celle-ci et la caractérisation du niveau de vibrations à l'interface main(s)-volant

## 2.11 Préconisations de mesure

Afin d'assurer la robustesse de la mesure, les essais doivent être réalisés volant libre en positionnant deux accéléromètres aux points **G** et **D** définis précédemment. Afin de limiter les variations de l'excitation volant libre, il est nécessaire d'effectuer les mesures moteur chaud. Habituellement, entre trois et cinq mesures sont réalisées lors de la caractérisation d'un véhicule sur piste. La même procédure sera donc appliquée. Afin d'estimer la réponse vibratoire du volant une fois tenu à une ou deux mains, la mesure des mobilités du volant est nécessaire. Pour se faire, les réglages de colonne de direction doivent être identiques entre la mesure en piste et la caractérisation des mobilités. Une fois ces mesures réalisées, les équations (3) (4) et (5) peuvent être utilisées afin d'évaluer l'excitation à l'interface main(s)-volant, en fonction de la situation choisie (*1M* ou *2M*). Comme cela a été évoqué tout au long de cette partie, ces modélisations du niveau d'excitation présentent des erreurs. Cependant, elles apportent des informations sur les niveaux d'excitations auxquels peuvent être soumis les conducteurs.

## Conclusion du chapitre 2

Ce chapitre a présenté les travaux effectués sur la caractérisation du couplage mécanique des mains et du volant. D'un point de vue expérimental, la première expérience a permis le développement d'un système de mesure des efforts de poussée et de préhension directement à l'interface main-volant. Cette mesure n'avait jamais été réalisée au sein du Groupe Stellantis et l'influence de la situation de conduite à une ou deux mains n'avait jamais été mesurée à notre connaissance dans la littérature. Les mesures réalisées, constituent ainsi la première base de données de ces efforts. L'expérience a également montré que les mains avaient une influence non-négligeable sur la réponse vibratoire du volant, soulevant également la question des différences entre une conduite à une ou à deux mains. Enfin, bien que l'expérience a montré qu'il ne semble pas y avoir de relation directe entre l'effort appliqué sur le volant et l'atténuation induite, elle a mis en évidence de grandes différences entre les atténuations appliquées par les participants. Il sera donc nécessaire de contrôler un maximum de paramètres lors d'expériences d'évaluations subjectives afin de s'assurer que les participants sont soumis aux mêmes excitations vibratoire.

La seconde expérience s'inscrit directement dans la logique de la première. En effet, après avoir montré que l'influence de la main n'était pas négligeable sur la réponse vibratoire du volant à 40 Hz, il semblait naturel de creuser cette question. La première partie de l'analyse a permis de montrer que la main apporte une atténuation pour la totalité du spectre, dont l'amplitude varie en fonction de la fréquence. Elle a également montré que l'atténuation était plus importante lors d'une préhension du volant à deux mains par rapport à une seule. Ainsi, lors d'une conduite à une main, celle-ci est soumise à une excitation vibratoire plus importante que si le conducteur avait placé ses deux mains. On peut donc se demander quelles influences ces différences pourront avoir sur l'inconfort perçu par les conducteurs.

# Chapitre 3 : perception des vibrations du volant

## Introduction

Dans ce chapitre, l'objectif est d'évaluer l'inconfort généré par les vibrations du volant et de définir les paramètres les plus influents. Dans la partie précédente, on a pu voir que les niveaux d'excitations étaient différents en fonction de la fréquence et de la direction d'excitation. Afin de cibler les gammes d'amplitude et de fréquence les plus critiques, une campagne de mesure a été réalisée sur sept véhicules des segments B et C. Les véhicules du segment B regroupent des voitures telles que les Peugeot 208 alors que ceux du segment C sont un peu plus volumineux tels que les Peugeot 308 par exemple. Pour chaque véhicule, l'accélération a été mesurée sur la jante du volant lors de montées en régime moteur en 3<sup>ème</sup> et en 5<sup>ème</sup> vitesse. L'ensemble des mesures a été réalisé volant libre et selon le protocole du Groupe Stellantis. Sur une plage de régimes moteur entre 1000 tr/min et 3000 tr/min, l'analyse montre que les maximums d'amplitude sont atteints dans des bandes de fréquences proches des premiers modes propre de la colonne de direction. Ainsi, les excitations les plus critiques sont atteintes entre 30 Hz et 50 Hz et l'on retrouve des intervalles similaires à ceux proposés dans la partie 2.2 du Chapitre 1. Dans le Chapitre 3, le choix a été fait de traiter les excitations liées à la colonne de direction, dont les niveaux sont critiquables. A partir de cette campagne de mesure on définit une plage de fréquence et de niveau d'excitation représentatives des plus faibles et plus fortes excitations relevées en véhicule. Dans la direction **Zh**, les niveaux d'excitation oscillent entre 110 dB et 125 dB dans une gamme de fréquences entre 30 Hz et 50 Hz. Dans la direction **Xh**, la plage de niveaux est comprise entre 115 dB et 135 dB pour la même gamme de fréquence. Dans la direction **Yh**, les niveaux d'excitations sont très faible. Comme on a pu le voir dans le Chapitre 1, les nouveaux systèmes de direction semblent limiter les excitations liées au balourd de roue. De plus, la perception des vibrations dans cette direction a été traitée dans un contexte automobile, notamment au

travers des travaux de *Giacomin et al.* [63]. Ainsi, seules les excitations dans les directions **Xh** et **Zh** ont fait l'objet de l'étude de ce troisième chapitre.

Comme on a pu le voir dans le Chapitre 2, la conduite à une main ou à deux mains modifie la réponse vibratoire du volant. Si certaines études, présentées dans la partie 3 du Chapitre 1, se sont intéressées à la perception des vibrations transmises à travers une main ou à travers deux mains, aucune n'a comparé ces deux situations. Il serait intéressant d'évaluer ces deux positions de conduites simultanément dans le but de conclure sur l'effet global de la situation de conduite.

Afin de répondre à ces différentes problématiques, deux expériences subjectives ont été menées dans des conditions de laboratoire. Une approche expérimentale s'éloignant sensiblement d'une conduite en véhicule a été choisie afin de s'affranchir un maximum de l'effet des mains sur le volant. Pour ces deux expériences, des synthèses de vibrations de volant ont donc été reproduites sur des bancs vibratoires du Laboratoire Vibration Acoustique. La première expérience a été réalisée à partir d'une poignée vibrante afin d'évaluer l'influence de la direction et de la fréquence d'excitation. La deuxième expérience a quant à elle été menée sur un volant monté sur un pot vibrant. Dans cette expérience, l'objectif principal a été de caractériser les différences de sensation induites par la conduite à une ou à deux mains.

# 1. Exp.3 : influence des vibrations transmises au travers d'une poignée instrumentée

## 1.1 Littérature existante pour répondre à la problématique

L'objectif de cette expérience est de quantifier l'évolution de la perception des vibrations lorsque les mains sont soumises aux excitations décrites dans l'introduction, à savoir:

- Des vibrations dans la direction **Zh** comprises entre 30 Hz et 50 Hz pour des niveaux de l'ordre de 110 dB à 125 dB.
- Des vibrations dans la direction **Xh** comprises entre 30 Hz et 50 Hz pour des niveaux de l'ordre de 115 dB à 135 dB

Afin de décrire la dépendance en fréquence de la sensation, la norme ISO 5349 [53] propose une pondération fréquentielle. Cependant, comme on a pu le voir dans la partie 3.2 du Chapitre 1, cette pondération n'est pas suffisante pour décrire correctement la sensation, proposant une unique pondération pour décrire la sensation. L'article de *Morioka et al.* [50] a alors proposé des courbes d'iso-sensation afin de compléter la norme et de décrire la dépendance de la sensation à la direction et au niveau d'excitation. Cette étude apporte quelques éléments d'informations par rapport à la problématique traitée ici. Cependant, elle n'est pas tout à fait adaptée car la dynamique des niveaux d'excitations est très importante, majoritairement entre 110 dB et 150 dB, par rapport à celle évaluée ici. Il est donc possible que les modèles construits par *Morioka et al.* ne décrivent pas correctement la perception des excitations mesurées en véhicule. L'expérience proposée dans ce chapitre a pour but d'évaluer la perception des vibrations par le calcul des exposants de Stevens. Plusieurs paramètres d'influence sont analysés : la fréquence, le niveau et la direction d'excitation.

On notera que l'objectif à terme est de quantifier l'inconfort produit par ces vibrations. On ne cherchera donc pas à évaluer la sensation produite à des niveaux proches de la détection. Les niveaux mis en jeu sont donc nettement supérieurs à  $0.1 \text{ m/s}^2$  (soit 100 dB).

## 1.2 Stimuli

Les signaux de l'étude sont des signaux mono fréquentiels de 3 secondes dont les valeurs d'amplitudes et de fréquences sont répertoriées dans le Tableau 3. Les pas de discrétisation en fréquence et en niveau ont été choisis afin de trouver un compromis entre durée d'expérience et qualité d'estimation de ces deux paramètres. Un total de 40 signaux pour chaque direction d'excitation (5 fréquences, 8 niveaux) a finalement été généré.

Fréquences d'excitation (Hz)	Niveaux vibratoire (dB)	
30	110	114
35	112.5	117
40	115	120
45	117.5	123
50	120	126
	122.5	129
	125	132
	127.5	135

Tableau 3 : caractéristiques des stimuli d'excitations dans les directions Px et Pz schématisées sur la Figure 64.

## 1.3 Montage expérimental

L'expérience est réalisée sur un banc vibratoire, présenté sur la Figure 63. Une poignée instrumentée (diamètre 25 mm) dont les premiers modes de déformations sont supérieurs à 200 Hz, est montée sur un pot vibrant guidé (LDS® V650). Le niveau de d'excitation est contrôlé par deux accéléromètres triaxiaux (capteurs PCB® ICP de sensibilité 10mV/g) fixés sur la poignée. L'excitation et la restitution sont gérées sur Matlab® grâce à l'utilisation d'un convertisseur A/N (ROGA® plug.n.DAQ) à une fréquence d'échantillonnage  $f_s = 1024$  Hz et une résolution de 24 bits. Le niveau d'accélération dans les directions orthogonales à **Zh** est inférieur d'au moins 20 dB sur la bande de fréquence comprise entre 30 et 50 Hz et le niveau vibratoire des harmoniques non souhaités est inférieur au seuil de détection moyen présenté sur la Figure 22. Pour chaque stimulus, les signaux mesurés par les deux accéléromètres de contrôle sont filtrés par un filtre passe-bande (FIR, 800 points, bande passante : 25-100 Hz, atténuation 60 dB/octave) afin de limiter les perturbations d'un éventuel mouvement de la main. Enfin, la valeur efficace du signal est enregistrée.

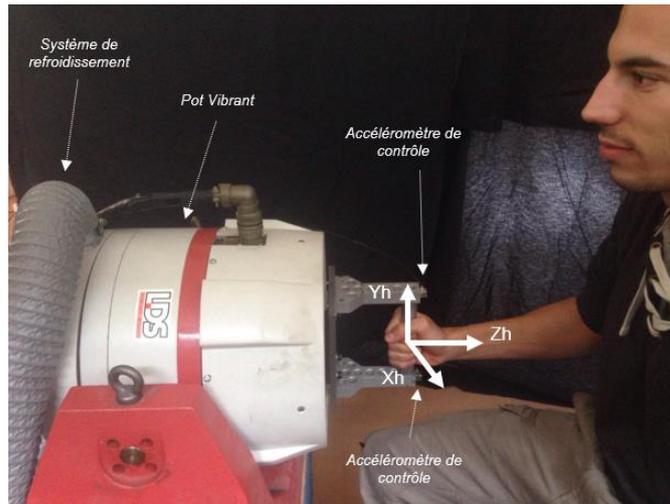


Figure 63 : montage expérimental.

Afin d'évaluer la perception pour chaque translation, l'expérience se déroule en deux parties ; une présentation des vibrations dans l'axe du bras (**Zh**) et une présentation dans la direction normale à la paume de la main (**Xh**). Les participants se placent dans les positions *Px* et *Pz*, schématisées sur la Figure 64, afin de permettre l'excitation dans les deux directions. L'expérience est réalisée pour une seule main, correspondante à la main d'écriture du participant.

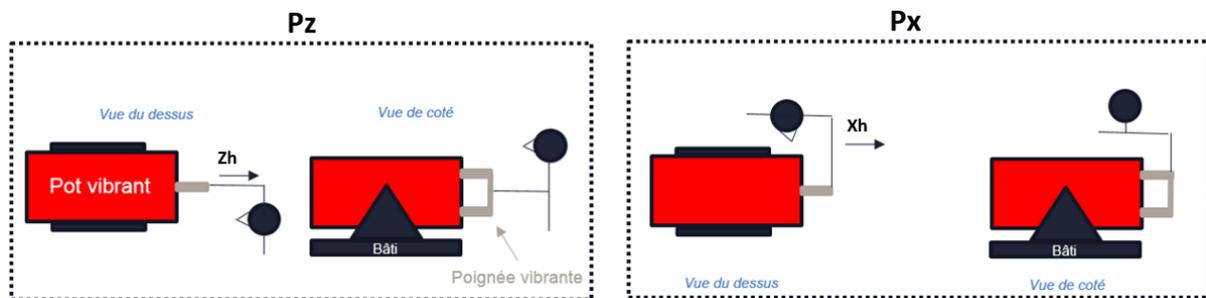


Figure 64 : position des participants dans les positions *Pz* et *Px*.

Comme on a pu le voir au cours du chapitre précédent, la présence de la main sur le volant modifie la réponse vibratoire du volant. Sur la Figure 65, on peut voir que la main influence également la réponse vibratoire de la poignée, avec des variations de niveau pouvant atteindre jusqu'à 1.5 dB dans l'exemple présenté ici. On peut également remarquer que selon les participants l'atténuation apportée est différente. Afin de limiter ces variations, les niveaux vibratoires ont été calibrés pour chaque sous expérience avec un signal sinusoïdal à 40 Hz et 120 dB. Cette calibration est réalisée avec la poignée tenue pour chaque participant.

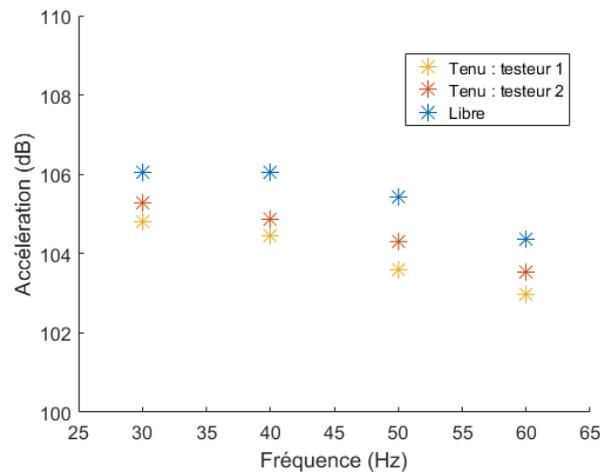


Figure 65 : influence de la main sur la réponse vibratoire de la poignée

## 1.4 Participants

34 participants, 12 femmes et 22 hommes, entre 19 et 54 ans (moyenne 23 ans), d'une taille moyenne 175 cm, ont participé à l'expérience. Les participants déclarent ne présenter aucune pathologie liée aux vibrations et être en bonne santé. Les sujets reçoivent des instructions orales en rapport avec le contexte de l'étude et la procédure de test avant le début de l'expérience. Afin de limiter les différences de force de préhension appliquée par les participants, un entraînement est réalisé à l'aide d'une poignée calibrée à 15 N, présentée Figure 52, par une séquence de 10 préhensions. Après chaque pause, les sujets ont utilisé la poignée pour contrôler leur effort de préhension. Aucun effort de poussée n'est appliqué afin de ne pas contraindre le pot vibrant.

## 1.5 Protocole expérimental

Les participants sont invités à évaluer l'intensité perçue de chaque stimulus selon une méthode d'estimation de grandeur sans référence, comme décrit dans l'article de *Moskowitz* [57]. Les réponses peuvent être tout nombre positif, 0 représentant une absence de sensation. Comme le niveau d'excitation minimum du test est au moins quatre fois supérieur au seuil absolu de détection, aucune réponse 0 n'est attendue. L'ensemble des 40 stimuli est joué trois fois, dans un ordre pseudo-aléatoire différent, de telle sorte que la différence d'amplitude entre deux stimuli successifs soit inférieure à la moitié de l'écart maximum entre les stimuli comme préconisé par *Moskowitz* [57] soit 8.5 dB pour la position *Pz* et 10.5 dB pour

la position  $P_x$ . Cette procédure est réalisée pour les deux positions  $P_x$  et  $P_z$ . L'ordre de présentation de ces deux sous-expériences est alterné entre les participants pour limiter les biais introduits par les effets d'entraînement.

Avant le début de l'expérience, une calibration du pot vibrant et un entraînement sont effectués. L'entraînement est composé de deux parties ; une phase de préhension de la poignée calibrée et une séquence d'évaluation de 10 stimuli. L'ensemble de l'expérience conduit à l'évaluation de 240 stimuli pour chaque sous-expérience et environ quarante minutes d'évaluation. Les consignes données aux participants sont décrites en Annexe 4.

## 1.6 Prétraitement

### 1.6.1 Variabilité du banc

Malgré les différentes précautions mises en place, des écarts existent entre les niveaux d'excitation présentés aux participants. On peut voir sur la Figure 66 (a), présentant les résultats du participant 25, que les niveaux cibles ne sont pas atteints pour un grand nombre de stimuli avec des écarts allant jusqu'à 7 dB. De plus, on peut voir que la reproductibilité des essais n'est pas satisfaisante. En revanche, sur la Figure 66 (b) on peut remarquer que la reproductibilité de l'expérience est très bonne pour le participant 32. Il est difficile d'expliquer les raisons de ces écarts, ils surviennent localement et ne sont pas reliés à une fréquence ou un niveau d'excitation en particulier. Comme on peut le voir sur la Figure 66 (a), il y a des stimuli pour lesquels deux répétitions d'un même stimuli sont proche de la cible alors que la dernière est éloignée, parfois de plus de 5 dB. Entre les présentations de ces trois stimuli, l'état du système d'excitation est similaire. En effet, les essais où le banc fonctionne à vide montrent une bonne robustesse du banc. Seule la position de la main ou l'effort appliqué par le participant a pu évoluer entre ces essais. En revanche, il est difficile d'attribuer de tels écarts à des variations de position ou d'effort appliqué. Aucune explication claire n'a été trouvée pour expliquer ces écarts.

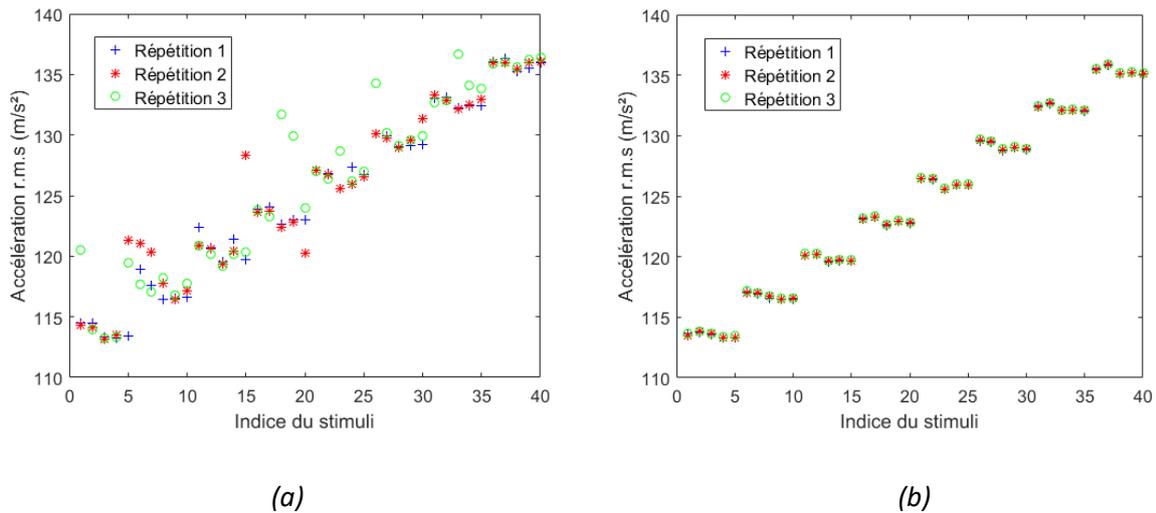


Figure 66 : variabilité de l’excitation entre les répétitions des stimuli dans la position Pz pour le participant 25 sur la figure (a) et pour le participant 32 sur la figure (b).

Dans le protocole expérimental utilisé, les répétitions ont pour vocation de limiter les effets d’ordre de présentation des stimuli et d’augmenter la qualité de l’estimation. Cependant, lorsque les niveaux des répétitions sont trop différents, il n’est plus possible de moyenner les estimations de sensations attribuées. De la même manière, le calcul d’une estimation moyenne du panel devient compliqué si les situations présentées sont trop différentes. Afin de s’affranchir d’un calcul des résultats moyens, l’utilisation de lois de Stevens individualisées n’aurait pas pu être envisagé. En effet, dans cette expérience le nombre de répétitions (3 par stimulus) est trop faible pour conduire une telle approche. Ainsi, afin de conserver une analyse basée sur la moyenne des estimations, le choix a été fait d’écarter celles pour lesquelles les niveaux présentés étaient trop en écart avec la cible.

Dans un premier temps, toutes les estimations présentant un écart supérieur au pas de discrétisation de l’échelle de niveau (2.5 dB dans la direction **Zh** et 3 dB dans la direction **Xh**) ont été supprimées. Pour un participant, si les niveaux des trois répétitions d’un même stimulus sont en défaut par rapport à cette exigence alors le participant est écarté du panel. Compte tenu de cette exigence, quatre participants ont été écartés.

Dans un deuxième temps, nous avons cherché à sévérer ce critère. Afin de ne pas écarter trop de participants, un compromis entre le nombre de participants et l’écart admissible par rapport au niveau cible a été recherché. Pour un écart à la cible acceptable de 0.5 dB, 18 participants présentent chacun moins de 3 dépassements du critère sur l’ensemble

des 240 stimuli. En considérant ce panel, on obtient un écart-type moyen par rapport au niveau cible de l'ordre de 0.3 dB, écart inférieur au seuil de détection d'une variation de niveau vibratoire [34]. Dans la suite de l'analyse, le choix a été fait de conserver ce panel de 18 participants.

## 1.6.2 Standardisation de l'échelle

Lors de l'expérience, chaque participant a pu construire sa propre échelle afin de décrire sa perception de l'intensité vibratoire. Une standardisation par une méthode d'écart-type moyen a été choisie car elle conserve les échelles de ratio et s'adapte donc bien à la construction de loi de Stevens. D'après *Moskowitz* [57] la standardisation suivante peut être utilisée :

$$SV_{i,j} = \sum_{k=1}^l \frac{\log_{10}(X_{ijk})}{l} - \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l \frac{\log_{10}(X_{ijk})}{m.l} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l \frac{\log_{10}(X_{ijk})}{n.m.l} \quad (6)$$

Avec :

$SV_{i,j}$  : estimation standardisée du  $j^{\text{ème}}$  stimulus par le  $i^{\text{ème}}$  participant

$X_{ijk}$  : estimation du  $j^{\text{ème}}$  stimulus pour la  $k^{\text{ème}}$  répétition par le  $i^{\text{ème}}$  participant

$l$  : nombre de répétitions, varie en fonction des valeurs manquantes

$m$  : nombre de stimuli  $m = 80$ , standardisation commune à *Px* et *Pz*

$n$  : nombre de participants,  $n = 18$

Les résultats avant et après standardisation sont présentés pour la position *Pz* sur la Figure 67. On peut voir le large éventail d'échelles choisies par les participants et l'effet du protocole de standardisation.

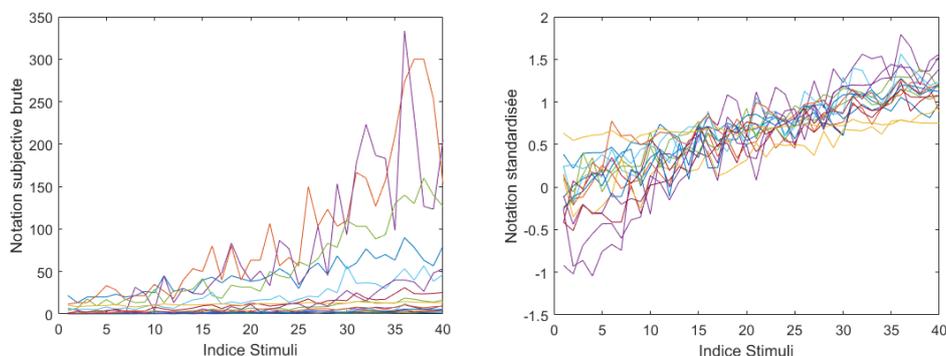


Figure 67 : comparaison entre les estimations brutes et après standardisation pour la position *Pz*.

## 1.7 Résultats

La Figure 68 présente les notations standardisées moyennes ( $SV_{i,j}$ ) en fonction du niveau d'excitation. On peut tout d'abord remarquer que la loi de puissance de Stevens :  $\Psi = k \cdot \varphi^n$  semble décrire correctement la dépendance en niveau de la sensation.

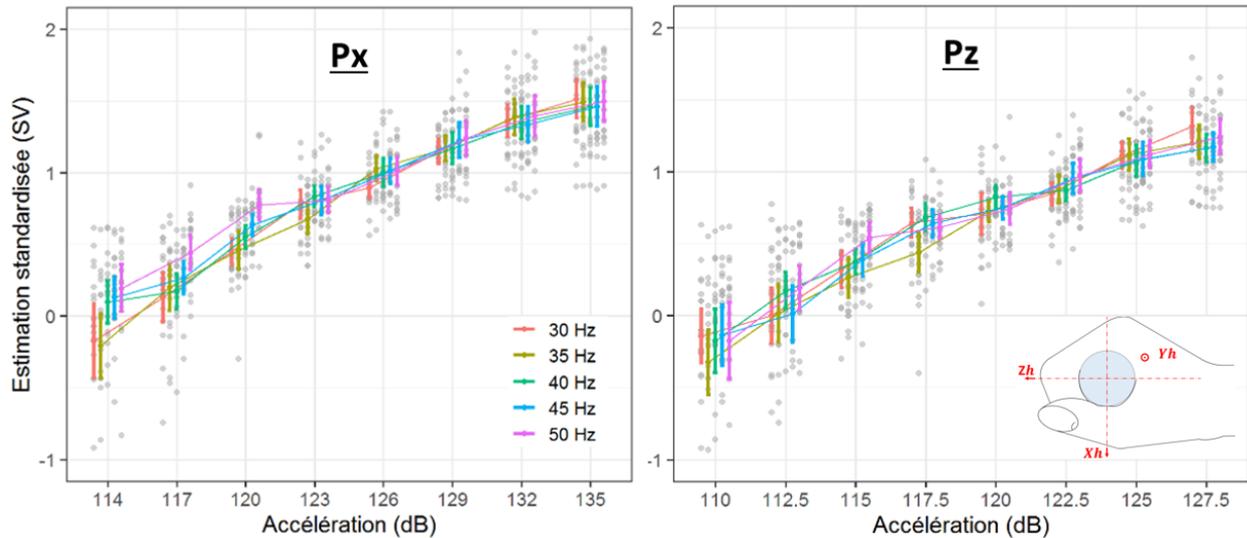


Figure 68 : moyennes des estimations standardisées (SV) et intervalles de confiance à 95% en fonction du niveau et de la fréquence d'excitation.

Afin de décrire ces effets, les coefficients  $n$  et  $k$  de la loi de Stevens ont été calculés à partir des ( $SV_{i,j}$ ) et de  $\varphi$ , représentant l'accélération des vibrations (en  $m/s^2$ ) pour chaque fréquence et chaque direction, présentés dans le Tableau 4. Cette table montre également le coefficient de détermination de la régression linéaire utilisée ( $SV_{i,j} = \log_{10}(k) + n \cdot \log_{10}(\varphi)$ ) et la valeur F à comparer avec la table de Fisher-Snedecor à 6 degrés de liberté. On peut tout d'abord voir que les coefficients de détermination sont tous très élevés, traduisant la qualité de l'estimation réalisée par les lois de Stevens.

a) Direction Xh (Px)

F (Hz)	n	k	R <sup>2</sup>	F (Fisher, df = 6)
30	1.47	2.8	0.99	672
35	1.47	2.8	0.98	332
40	1.26	3.5	0.98	235
45	1.21	3.5	0.98	334
50	1.14	3.9	0.97	215

b) Direction Zh (Pz)

F (Hz)	n	k	R <sup>2</sup>	F (Fisher, df = 6)
30	1.52	5.6	0.99	458
35	1.57	4.9	0.98	391
40	1.37	5.0	0.97	175
45	1.38	4.6	0.97	208
50	1.35	4.6	0.96	143

Tableau 4 : coefficient moyens de Stevens en fonction de la fréquence et de la direction d'excitation

On remarque également que l'exposant de Stevens (**n**) tend à décroître avec l'augmentation de la fréquence. En revanche, l'évolution de **k** en fonction de la fréquence n'est pas la même dans les deux directions. Dans la direction **Zh**, la décroissance à la fois de **k** et de **n** indique une décroissance de la sensation avec l'augmentation de la fréquence, comme décrite dans la norme ISO 5349 [53]. Dans la direction **Xh**, les différences d'évolutions de **n** et de **k** n'indiquent pas clairement l'évolution de la sensation en fonction de la fréquence. Selon le niveau d'excitation, la dépendance en fréquence de la sensation va évoluer. Cependant, certaines variations de **k** et de **n** sont faibles et il est difficile d'évaluer si les différences apparaissant dans le Tableau 4 sont significatives. Une analyse Bootstrap [71] a été réalisée (10 000 tirages aléatoires des 18 participants avec remise) afin d'évaluer la robustesse des paramètres trouvés. La Figure 69 présente les résultats de l'analyse. Des groupes statistiquement différents peuvent alors être construits pour chaque direction d'excitation, basés sur les différences entre les exposants de Stevens.

Direction **Xh** :

$$f \in [30, 35]Hz, n = 1.5, k = 2.8$$

$$f \in [40, 45]Hz, n = 1.3, k = 3.6$$

$$f \in [50]Hz, n = 1.1, k = 3.9$$

Direction **Zh** :

$$f \in [30, 35]Hz, n = 1.5, k = 5.3$$

$$f \in [40, 50]Hz, n = 1.3, k = 4.8$$

Note : les valeurs affichées ci-dessus correspondent à la médiane empirique calculée à partir des tirages de l'analyse Bootstrap.

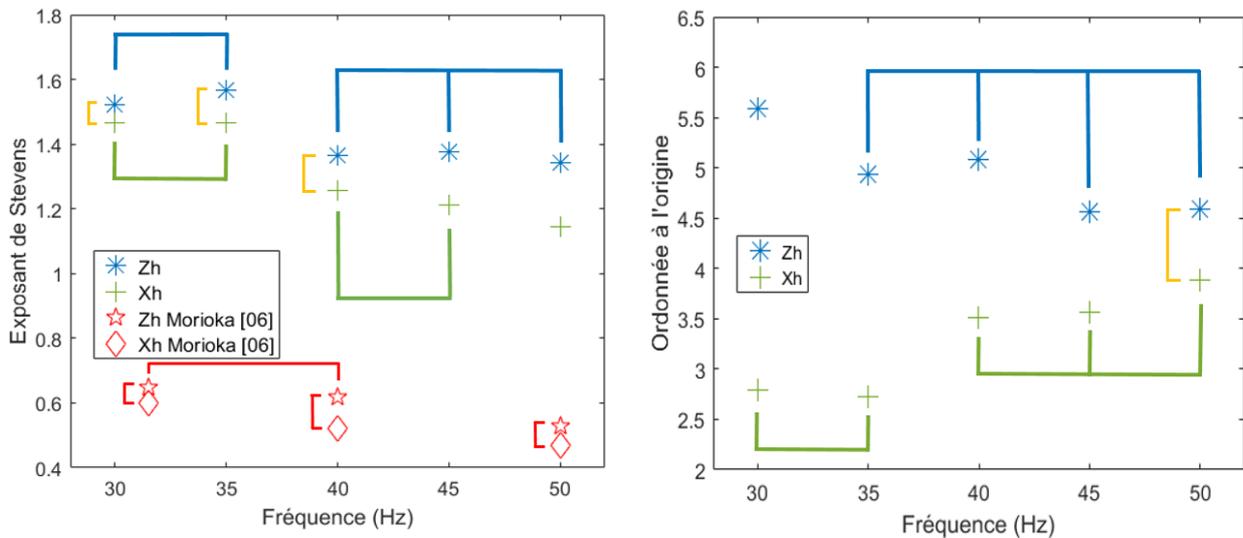


Figure 69 : évolution des paramètres de la loi de Stevens en fonction de la fréquence. Les barres représentent les paramètres qui ne sont pas statistiquement différents. Le critère de significativité est soumis à une correction de Bonferroni.

On peut tout d'abord remarquer que la décroissance de  $n$  avec l'augmentation de la fréquence est significative dans les deux directions d'excitation. Ainsi, pour une même augmentation du niveau de vibration, l'intensité perçue augmente moins à haute fréquence qu'à basse fréquence. Indirectement, il est possible d'expliquer cette décroissance par l'étude de la puissance absorbée par le bras. En effet, les résultats obtenus par Aldien et al. ([24], [25]) montrent qu'il existe une interaction entre le niveau et la fréquence dans l'évaluation de

la puissance absorbée à l'interface main-poignée. Lorsque le niveau est doublé, la puissance absorbée est proportionnellement plus élevée à 30 Hz qu'à 50 Hz. On peut donc imaginer que l'augmentation de la sensation soit également plus importante à 30 Hz qu'à 50 Hz et finalement que  $n_{30\text{Hz}} > n_{50\text{Hz}}$ .

Comme on peut le voir sur la Figure 69, les exposants proposés ici diffèrent de ceux mesurés par *Morioka et al.* [50]. La gamme de niveaux testée par Morioka est importante, entre 0.6 m/s<sup>2</sup> et 40 m/s<sup>2</sup> à 50 Hz, alors que dans notre étude les niveaux sont compris entre 0.3 m/s<sup>2</sup> et 2.4 m/s<sup>2</sup> dans la direction **Zh**. Il semble que cette différence de plage d'excitation ait un impact sur les valeurs des exposants de Stevens. Pour la sonie, cet effet est bien connu et décrit par *Florentine et al.* [72] : une augmentation de la plage d'excitation tend à diminuer la valeur des exposants de Stevens. Cette étude se base notamment sur celles de *Teghtsoonian et al.* ([73], [74], [75]) dont l'analyse propose d'évaluer la variabilité des exposants de Stevens en fonction de la gamme d'excitation à partir de la loi de Stevens réécrite sous la forme suivante :

$$n = \frac{\log R_{\psi}}{\log R_{\varphi}}$$

Où  $R_{\varphi}$  est le rapport entre les amplitudes des stimuli maximum et minimum et  $R_{\psi}$  correspond au rapport des sensations perçues pour ces deux stimuli. L'expérience menée par *Teghtsoonian* [73] conclut que le rapport des sensations  $R_{\psi}$  est constant indépendamment de la plage d'excitation. Ainsi, selon lui il est possible de calculer l'exposant de Stevens  $n$  en fonction de la plage de variation par la relation :

$$n_1 \log R_{\varphi 1} = n_2 \log R_{\varphi 2}$$

En appliquant cette relation à notre cas, par exemple pour calculer l'exposant de Stevens que l'on aurait obtenu pour la plage d'amplitude décrite dans l'étude de Morioka, on obtient :

$$n_{zh 2} \sim n_{zh} \frac{\log (R_{\varphi zh})}{\log (R_{\varphi \text{Morioka}})} \sim 0.5 n_{zh}$$

Un résultat équivalent est obtenu dans la direction **Xh** avec un coefficient multiplicateur de 0.58. En appliquant ces coefficients aux exposants présentés Figure 69, on retrouve les mêmes ordres de grandeur que les exposants proposés par Morioka. Il semble donc que les

différences trouvées entre notre étude et celle de Morioka soient liées aux effets d'échelles. Ce résultat montre l'importance de construire des lois dédiées aux plages d'excitations vibratoires auxquels sont soumis les conducteurs automobiles.

Le paramètre  $k$  donne également une information sur la sensation produite. Comme on peut le voir sur la Figure 69, son évolution est différente entre  $Xh$  et  $Zh$ . Dans la direction  $Zh$ , le paramètre décroît avec l'augmentation de la fréquence, avec deux groupes de fréquences significativement différents. Dans la direction  $Xh$ , l'évolution est inversée. Ce résultat est curieux car d'après les études de *Aldien et al.* ([24], [25]) l'évolution de la puissance absorbée par le bras en fonction de la fréquence est identique dans les deux directions avec une puissance absorbée plus importante à 30 Hz qu'à 50 Hz. Cependant, ces différences de comportements sont vraies seulement sur une plage d'excitation. En effet, comme les exposants de Stevens sont décroissants avec l'augmentation de la fréquence, il existe un niveau d'excitation à partir duquel cette tendance va changer dans la direction  $Xh$ . Comme on peut le voir sur la Figure 70, à partir de  $3 \text{ m/s}^2$  la dépendance en fréquence va évoluer vers une décroissance de la sensation avec l'augmentation de la fréquence. Ce résultat illustre également la nécessité d'évaluer la sensation produite dans une plage de niveaux d'excitation appropriée.

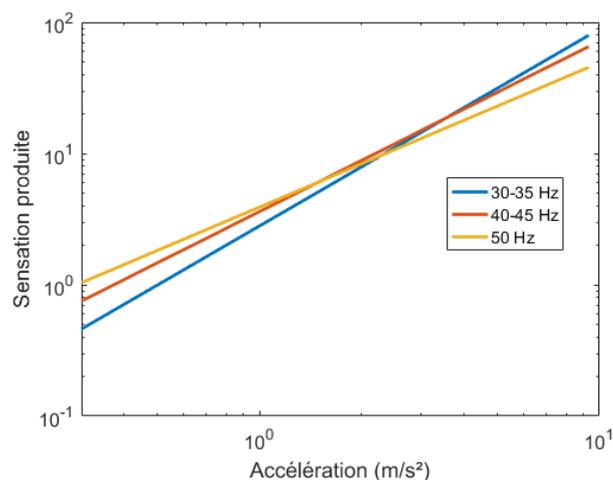


Figure 70 : représentation des lois de Stevens dans la direction  $Xh$  à partir des résultats de l'analyse Bootstrap.

Afin de représenter les interactions qui existent entre les différents paramètres, les courbes d'iso-sensation dans chaque direction d'excitation ont été construites à partir des lois de Stevens proposées. Comme on peut le voir sur la Figure 71, il existe des interactions entre les paramètres Fréquence et Niveau d'une part et Direction et Niveau d'autre part. A faible niveau d'excitation, l'effet de la fréquence est faible. A plus fort niveau, l'influence de la fréquence devient plus importante et l'intensité perçue décroît avec l'augmentation de la fréquence. De façon similaire, à faible niveau, la direction d'excitation a peu d'effet sur la sensation induite. En revanche, lorsque le niveau d'excitation augmente, l'intensité perçue dans la direction **Xh** est nettement inférieure à celle perçue dans la direction **Zh**. On peut noter à titre d'exemple que pour une intensité perçue de  $SV = 1.4$ , le niveau admissible dans la direction **Zh** est en moyenne 1.5 dB plus faible que dans la direction **Xh**. Ce résultat peut être expliqué par les différents mécanismes sensitifs mis en jeu. A faible niveau, seuls les capteurs périphériques sont activés, sur lesquels l'effet de la direction d'excitation est faible. A fort niveau, l'ensemble du bras est mis en vibration, entraînant des mécanismes de sensation additionnels. Selon la mesure réalisée par *Burstrom* [69], la puissance transmise dans la direction **Zh** est plus importante que dans la direction **Xh**. Cet effet pourrait donc expliquer la plus grande sensibilité de la direction **Zh** par rapport à la direction **Xh**.

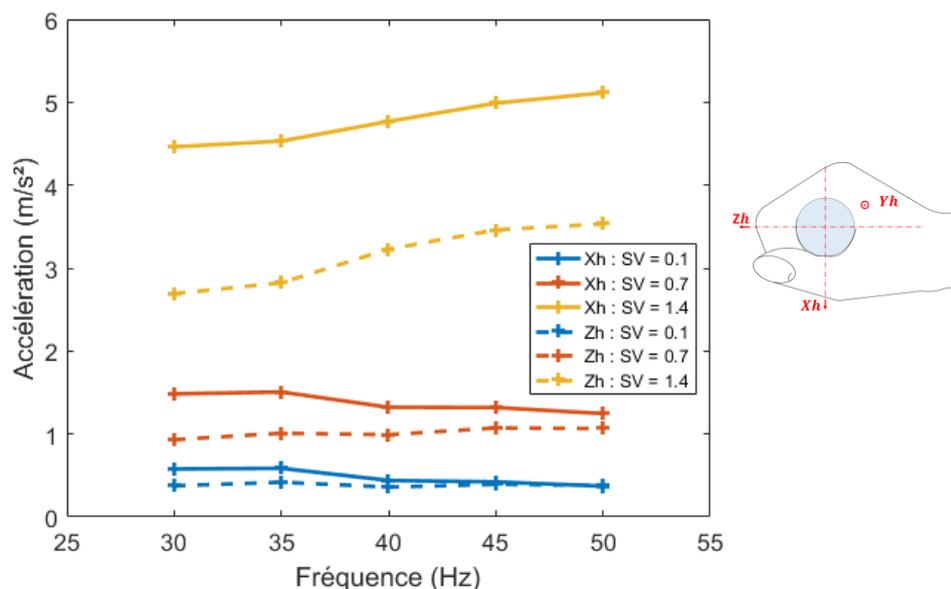


Figure 71 : courbes d'iso-sensations représentées pour les direction **Xh** et **Zh**.

Afin de comparer ces résultats avec ceux proposés par *Morioka et al.* [50], les courbes d'iso-sensation correspondantes à une excitation de 5 m/s<sup>2</sup> à 50 Hz ont été calculées, inversées et normalisées par rapport à la courbe **Wh** de la norme ISO 5349 [53]. Le stimulus de référence utilisé dans l'étude de Morioka est un sinus de 50 Hz à 5 m/s<sup>2</sup> et produit une sensation moyenne de  $\Psi_{Morioka} = 100$ . Dans notre expérience, un stimulus équivalent produit une log-sensation moyenne de 1.56 dans la direction **Xh** et de 1.67 dans la direction **Zh**. On fera donc l'hypothèse que  $\log_{10}(\Psi_{Morioka}) = 2$  est équivalent à  $SV(Xh) = 1.56$  et  $SV(Zh) = 1.67$ . D'autre part, les deux expériences sont réalisées pour des échelles de ratio, on suppose donc qu'une division par deux de l'intensité perçue dans chaque expérience produit une réponse équivalente. Cela se traduit par  $\log_{10}(\Psi_{Morioka}) = \log_{10}(50)$  équivalent à  $SV(Xh) = 1.56 - \log_{10}(2) = 1.26$ . Les courbes d'iso-sensations  $\Psi_{Morioka} = 50$  et  $\Psi_{Morioka} = 100$  ont également été normalisées à 50 Hz afin de permettre la comparaison (initialement normalisées à 8 Hz).

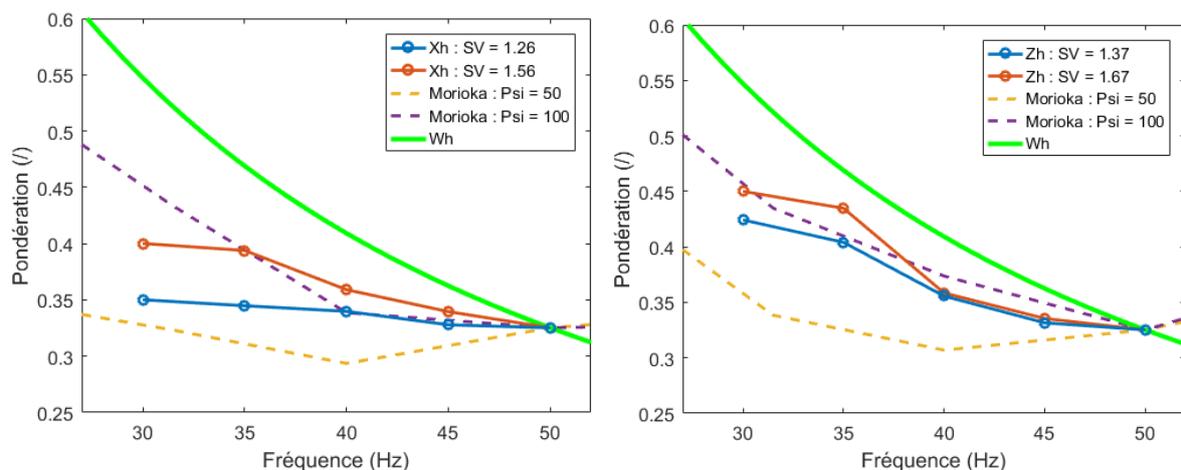


Figure 72 : comparaison entre la pondération fréquentielle *Wh* proposée par la norme [53], les résultats de [50] et les pondérations calculées dans les directions **Xh** et **Zh**.

Comme on peut le voir sur la Figure 72, les pondérations suivent une tendance similaire, décrivant une diminution de l'intensité perçue avec l'augmentation de la fréquence. De plus, on peut remarquer que les pondérations correspondantes aux sensations les plus importantes se rapprochent de **Wh**. Ce résultat est logique car **Wh** a été initialement construite pour décrire les forts niveaux de vibrations. Or, lorsque **SV** ou  $\Psi$  augmente, le niveau d'excitation augmente également. Enfin, ces courbes montrent que l'utilisation de la

norme ISO 5349 n'est pas adaptée pour décrire la perception des vibrations de faibles amplitudes. Dans le contexte automobile décrit ici, l'utilisation de **Wh** pour décrire la perception des vibrations du volant tendrait à surestimer l'intensité réellement perçue par les conducteurs. Il est donc préférable d'utiliser des pondérations dédiées à des gammes d'excitation.

## 1.8 Conclusion

D'un point de vue expérimental, cette étude a montré que l'effet de la main sur le banc vibratoire n'est pas négligeable. Malgré la calibration individualisée du système, la restitution des stimuli a été parfois en écart avec la cible, sans que ces différences puissent être expliquées. Lors d'une prochaine expérience, la mise en place d'une calibration pour chaque stimulus, certes chronophage, permettrait de limiter les écarts de niveaux. La construction d'un asservissement paraît quant à elle compliquée du fait de la courte période d'excitation de 3 secondes. Une variation trop brutale du stimulus pendant sa période de présentation constituerait un biais dans l'expérience.

Afin de pallier ces problèmes de variabilité, une stratégie de sélection des estimations a été mise en place. Elle a permis l'analyse des résultats de 18 participants. Cette expérience a tout d'abord révélé qu'à la fois la fréquence, le niveau et la direction d'excitation ont des effets sur la perception de l'intensité. Bien que les variations de niveau d'excitation soient restreintes ici limitées, on peut voir qu'il existe une interaction entre fréquence, direction et niveau d'excitation. Pour des niveaux de l'ordre de  $0.3 \text{ m/s}^2$ , la fréquence et la direction d'excitation ont peu d'influence sur l'intensité perçue. Dans cette gamme de niveau, la perception est principalement dépendante de l'amplitude d'excitation dont l'influence peut être décrite par l'un des exposants de Stevens calculés. A de plus fort niveaux d'excitation, principalement au-dessus de  $1 \text{ m/s}^2$ , à la fois la fréquence et la direction jouent sur la sensation. Ces effets sont marqués par la décroissance de l'intensité perçue avec l'augmentation de la fréquence et une plus grande sensibilité dans la direction **Zh** par rapport à la direction **Xh**. Afin de décrire ces phénomènes, notre étude propose une série de lois de Stevens, permettant de prédire l'évolution de la sensation dans des gammes d'excitation courantes dans le domaine automobile. Cette expérience apporte ainsi des éclaircissements sur la perception des vibrations pour une faible dynamique d'excitation et sur une bande de fréquence restreinte.

## 2. Exp.4 : perception des vibrations à travers un volant

### 2.1 Introduction

Au travers du Chapitre 2, on a pu voir que le volant vibrait différemment si le conducteur le tient à une main ou à deux mains. L'expérience précédente a quant à elle permis de traiter la perception des vibrations lorsqu'une main est soumise à une excitation vibratoire. Dans un cas plus proche de l'application automobile, deux études se sont intéressées à la perception des vibrations du volant transmises aux deux mains. L'étude de *Amman et al.* [54] a cherché à évaluer l'effet de la direction d'excitation, dont les courbes d'iso-sensation ont été présentées dans le Chapitre 1. L'étude de *Morioka et al.* [55] propose quant à elle d'évaluer la perception des vibrations induites par une double poignée en bois représentant un volant automobile dans une seule direction d'excitation. Cette direction est similaire à la direction dite « verticale » de l'étude de *Amman et al.* [54], représentée par la direction  $z$  sur la Figure 73.

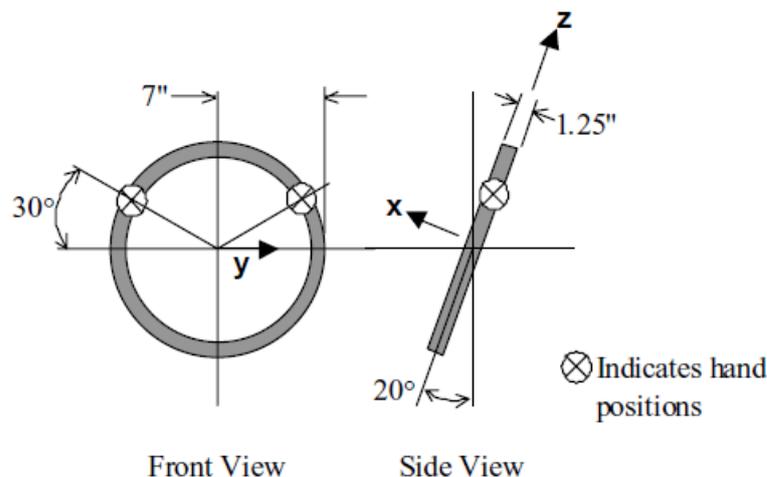


Figure 73 : système de coordonnées utilisé dans l'étude de Amman et al. [54].

Une telle excitation génère une vibration dans les direction  $X_h$  et  $Y_h$  de la main. Comme on peut le voir sur la Figure 74, il apparait qu'il existe des contradictions entre ces études en basse fréquence. Entre 30 Hz et 50 Hz, les deux études semblent plutôt concordantes, décrivant une décroissance de la sensation avec l'augmentation de la fréquence. Si l'on compare les résultats d'Amman avec notre étude, on peut voir que la courbe dans la direction « longitudinale » (représentée par la direction  $x$  sur la Figure 73) donne des résultats proches de ceux trouvés pour la direction  $Z_h$  dans l'expérience précédente. Cependant, l'évolution

décrite dans la direction **Xh** est différente de celle mesurée par Morioka dans la direction « verticale ». Amman propose que la sensation soit également décroissante avec l'augmentation de la fréquence dans cette gamme de niveau. Comme on a pu le voir dans l'expérience précédente, ce résultat n'est vrai qu'à partir d'une excitation de l'ordre de  $3 \text{ m/s}^2$ . Cette différence peut certainement s'expliquer car la direction « verticale » décrite par Amman n'est pas identique à **Xh** mais est une combinaison de **Xh** et de **Yh**.

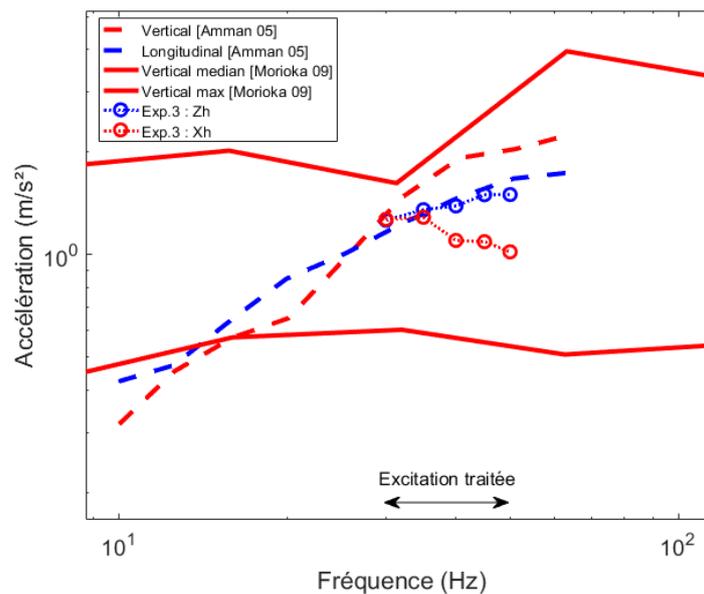


Figure 74 : comparaison entre les courbes d'iso-sensations proposées et celles calculées dans l'expérience précédente.

Pour décrire les paramètres d'influence de la sensation, *Morioka et al.* [55] proposent une série d'exposants de Stevens, sur une gamme de fréquences comprise entre 4 Hz et 250 Hz, une dynamique proche de celle d'un volant ( $0.1\text{-}1.58 \text{ m/s}^2$ ) et pour différents efforts de préhension ; l'effort minimum nécessaire pour tenir la poignée, 50 N et 100 N. Cependant, seules les données relatives à l'effort minimum semblent comparables à une situation automobile. En effet, d'après l'expérience 1 présentée au Chapitre 2, l'effort de préhension appliqué sur un volant est en moyenne de 15 N dans une situation de conduite normale. De plus, *Aldien et al.* [25] ont montré que la quantité d'énergie transmise à travers les mains dépend fortement de la force de préhension appliquée. Par conséquent, il est possible que l'effort appliqué puisse modifier de manière significative la perception des vibrations. Il semble donc raisonnable de ne considérer que les données relatives à l'effort minimum. Dans

cette configuration, l'article de Morioka conclut que les lois de puissance définies par Stevens décrivent correctement la sensation et que l'effet de la fréquence est significatif. L'exposant du modèle atteint sa valeur maximale à 31,5 Hz avec une valeur moyenne de 1,04. De plus, l'étude note une interaction entre le niveau et la fréquence d'excitation. En effet, pour produire une égale faible sensation, le niveau doit être plus élevé à 31.5 Hz qu'à 63 Hz, alors que pour produire une forte sensation, le niveau doit être plus faible à 31.5 Hz qu'à 63 Hz d'après *Morioka et al.* [55]. Cette étude constituera le point de comparaison principal de cette expérience pour la perception des vibrations à deux mains. Les données relatives à la perception des vibrations à travers une main s'appuieront sur l'expérience précédente.

Les études de la littérature apportent des éclaircissements sur la perception des vibrations au travers d'une main ou de deux mains mais aucune étude ne s'est intéressée aux différences de perception existante entre ces deux situations. Afin de les évaluer, l'expérience présentée ici va chercher à calculer les paramètres des lois de Stevens dans les deux situations, sur la plage de fréquences comprise entre 30 Hz et 50 Hz. Nous chercherons également à réduire les variations de niveau d'excitation auxquelles nous avons été confrontés dans l'expérience précédente.

## 2.2 Expérience

### 2.2.1 Montage expérimental

L'expérience est réalisée sur un banc vibratoire, présenté sur la Figure 75. Le volant est monté sur une plaque d'aluminium (15 mm d'épaisseur) elle-même fixée sur un pot vibrant guidé (LDS® V780). Le pot est volontairement incliné à 25° afin de reproduire la position moyenne du volant en véhicule. Les participants font face au volant, assis sur un siège réglable en hauteur et les mains en position « dix heures dix » marquée par deux bandes jaunes. Afin de faciliter la construction du montage expérimental, une unique direction d'excitation est évaluée dans cette expérience, notée  $e_1$ .

Le niveau de vibration est contrôlé par un accéléromètre triaxial (PCB® ICP 10mV/g) fixé à l'interface entre le pot vibrant et le volant. L'excitation et la restitution sont gérées sur Matlab® grâce à l'utilisation d'un convertisseur A/N (ROGA® plug.n.DAQ) à une fréquence d'échantillonnage  $f_s = 1024$  Hz et une résolution de 24 bits. Le niveau d'accélération dans les

directions orthogonales à  $e_1$  est inférieur d'au moins 12 dB sur la bande de fréquence comprise entre 30 Hz et 50 Hz et le niveau vibratoire des harmoniques non souhaités est inférieur au seuil de détection. Pour chaque stimulus, le signal mesuré par l'accéléromètre de contrôle est filtré par un filtre passe-bande (*FIR*, 800 points, bande passante : 25-100 Hz, atténuation 60 dB/octave) afin de limiter les perturbations d'un éventuel mouvement de la main. Enfin, la valeur efficace du signal est enregistrée.

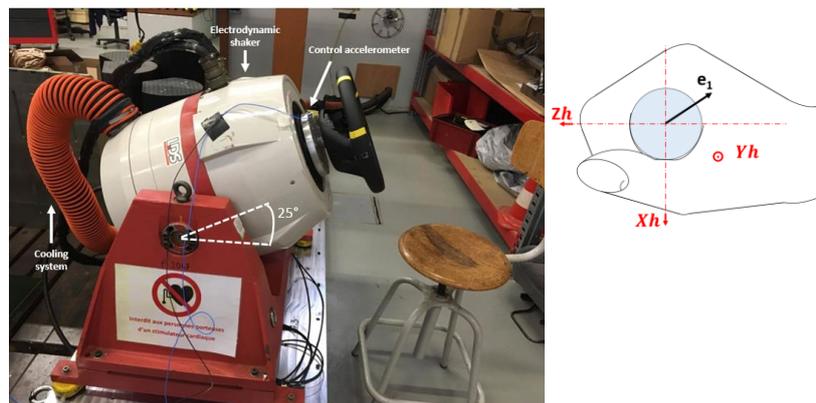


Figure 75 : montage expérimental.

Lors de l'expérience précédente, les variations entre les niveaux d'excitations étaient importantes malgré le processus de calibration. Plusieurs pistes d'amélioration avaient été évoquées en fin d'expérience, comme une calibration pour l'ensemble des stimuli. Ce type de procédure a été écarté car chronophage et fatigante pour les participants. Un asservissement en boucle fermée a également été écarté car le faible temps d'exposition nécessite de grandes variations de niveau, perceptibles par les sujets. Le choix s'est finalement dirigé vers un asservissement en boucle ouverte, de sorte que le stimulus est corrigé puis rejoué si la différence entre l'accélération mesurée et la valeur cible est en dehors de l'intervalle  $[-0.5 \text{ dB}; +0.5 \text{ dB}]$ . Ainsi, un contrôle est réalisé à la fin de chaque stimulus. Cette procédure conduit à l'évaluation d'un nombre différent de stimuli par participant. Cependant, elle permet d'obtenir une estimation subjective pour chaque stimulus dans une gamme d'excitation contrôlée pour l'ensemble des participants.

## 2.2.2 Participants

28 participants, 7 femmes et 21 hommes, entre 19 et 54 ans (moyenne 26 ans), taille moyenne 176 cm, ont participé à l'expérience. Le panel est partagé en 23 droitiers et 5 gauchers. Les participants déclarent ne présenter aucune pathologie liée aux vibrations et être en bonne santé. Le panel se décompose en deux parties, un groupe de 21 individus dit « naïfs » et un groupe dit « experts », composé de 7 ingénieurs acousticiens dont la profession est étroitement liée au confort vibratoire et sonore dans les automobiles. Les sujets reçoivent des instructions orales en rapport avec le contexte de l'étude et la procédure de test avant le début de l'expérience. Afin de limiter les différences de force de préhension appliquée par les participants, un entraînement est réalisé à l'aide d'une poignée calibrée à 15 N, présentée Figure 52, par une séquence de 10 préhensions. Après chaque phase de pause, les sujets ont utilisé la poignée pour contrôler leur effort de préhension.

## 2.2.3 Stimuli

Les signaux de l'étude sont des signaux mono fréquentiel de 3 secondes dont les valeurs d'amplitude et de fréquence sont répertoriées Tableau 5. Les pas de discrétisation en fréquence et en niveau ont été choisis afin de trouver un compromis entre durée d'expérience et qualité d'estimation de ces deux paramètres. Un total de 40 signaux (5 fréquences et 8 niveaux) a finalement été généré.

Fréquences d'excitation (Hz)	Niveaux vibratoire (dB)
30	110
35	112.5
40	115
45	117.5
50	120
	122.5
	125
	127.5

Tableau 5 : caractéristiques des stimuli d'excitation.

## 2.2.4 Procédure

Les participants sont invités à évaluer l'intensité perçue de chaque stimulus selon une méthode d'estimation de grandeur sans référence, comme décrit dans l'expérience précédente. Les réponses pouvaient être tout nombre positif, 0 représentant une absence de sensation. Comme le niveau d'excitation minimum du test est au moins quatre fois supérieur au seuil de détection, aucune réponse 0 n'est attendue.

L'ensemble des 40 stimuli est joué trois fois, dans un ordre pseudo-aléatoire différent, de telle sorte que la différence d'amplitude entre deux stimuli successifs soit inférieure à la moitié de l'écart maximum entre les stimuli, comme préconisé par *Moskowitz* [57], soit 14 dB. Cette procédure est répétée pour les deux conditions de conduite : volant tenu à une main (noté *1M*) et à deux mains (noté *2M*). L'ordre de présentation de ces deux sous-expériences est alterné entre les participants pour limiter les biais introduits par l'effet d'entraînement. Dans la condition *1M*, les participants sont invités à choisir leur main d'écriture pour évaluer les vibrations. Avant le début de l'expérience, une calibration du pot vibrant et un entraînement sont effectués. L'entraînement est composé de deux parties ; une phase de préhension de la poignée calibrée et une séquence d'évaluation de 10 stimuli. L'ensemble de l'expérience conduit à l'évaluation de 240 stimuli pour chaque sous-expérience et environ quarante minutes d'évaluation.

## 2.3 Résultats

La stratégie de mise en place d'un asservissement en boucle ouverte a été payante. Sur la totalité de l'expérience, en moyenne 32 stimuli ont été rejoués sur les 240 présentés, avec un maximum de 62. Ce nombre important de présentations supplémentaires montre la nécessité de contrôler le niveau d'excitation mais a peut-être entraîné une fatigue supplémentaire. Cette procédure a finalement conduit à une augmentation du temps d'expérience allant jusqu'à 25%, soit un temps total d'expérience d'environ 50 minutes. Cependant, cette nouvelle procédure permet de n'écarter aucun participant.

### 2.3.1 Standardisation de l'échelle

Lors de l'expérience, chaque participant a pu construire sa propre échelle afin de décrire sa perception des vibrations. Une standardisation par une méthode d'écart-type moyen a été choisie de façon similaire à l'expérience précédente, dont l'expression est présentée équation (6), partie 1.6.2 du chapitre 3. Les résultats avant et après standardisation sont présentés sur la Figure 76 pour la situation 1M. On peut voir le large éventail d'échelles choisies par les participants et l'effet du protocole de standardisation.

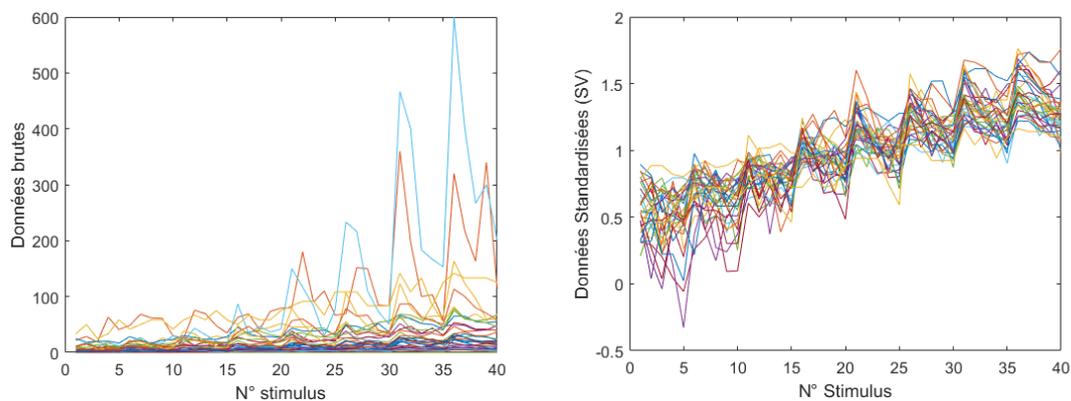


Figure 76 : comparaison entre les estimations brutes et les estimations standardisées pour la situation 1M. Chaque courbe représente les résultats d'un participant.

### 2.3.2 Différences inter individuelle

Une classification hiérarchique des participants a été réalisée selon une méthode de Ward. Les distances entre les participants ont été estimées à partir des distances euclidiennes entre les jeux de valeurs standardisées ( $SV_{i,j}$ ). Comme on peut le voir sur le dendrogramme présenté sur la Figure 77, la population d'experts ne semble pas se distinguer du reste du panel. Ce résultat est en accord avec *Yoo et al.* [61] dont les résultats obtenus pour les deux classes de conducteurs sont très similaires. L'étude de *Yoo et al.* est réalisée en véhicule et sur piste, alors que l'environnement de notre expérience s'éloigne volontairement d'une situation réelle de conduite. Cependant, la même conclusion est réalisée. Il semble donc que les connaissances en acoustique automobile aient peu d'impact sur les réponses au test.

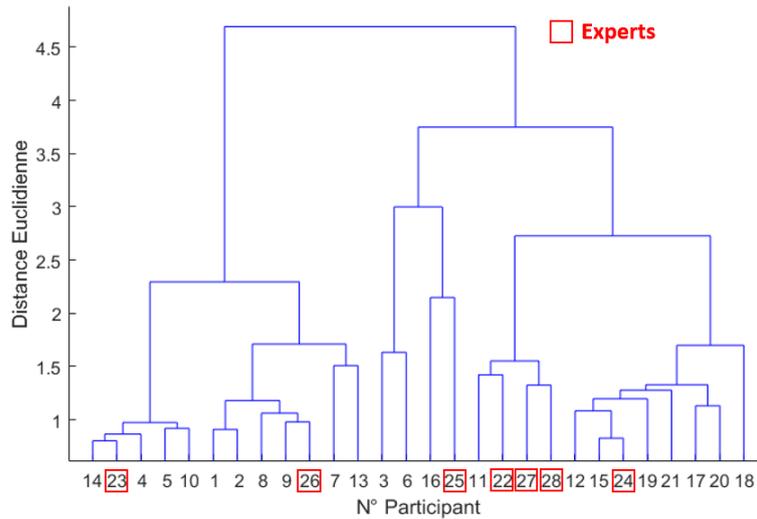


Figure 77 : classification hiérarchique selon une méthode de Ward. Les participants entourés en rouge correspondent au groupe d'experts.

Dans la suite des analyses, la différenciation naïfs/experts ne sera pas prise en compte et un seul groupe de 28 sujets sera considéré.

### 2.3.3 Analyse statistique

La Figure 78 présente les notations standardisées moyennes ( $SV_{i,j}$ ) en fonction du niveau d'excitation. On peut tout d'abord remarquer que la loi de puissance de Stevens semble décrire correctement la dépendance en niveau de la sensation. De plus, il apparaît que la fréquence a un effet sur la perception d'intensité.

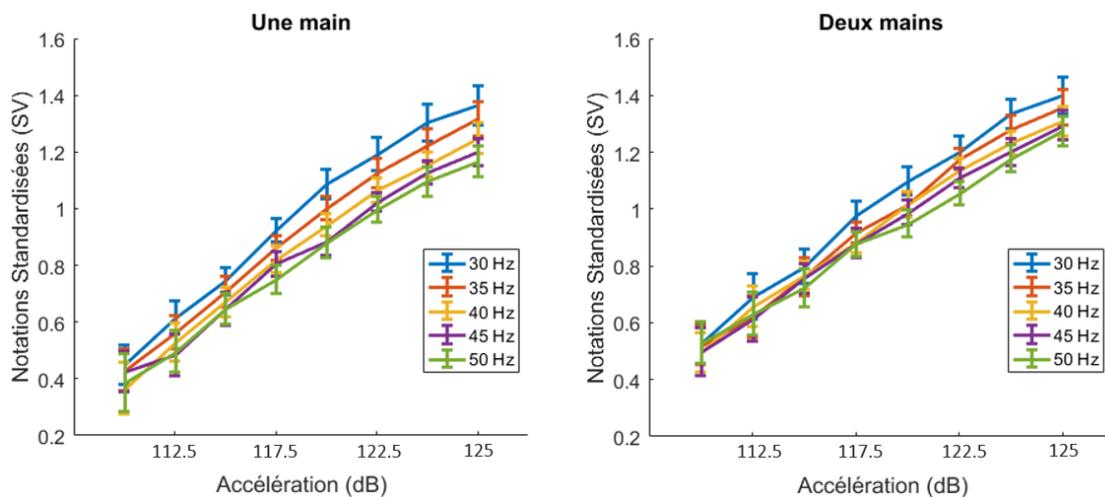


Figure 78 : moyennes et intervalles de confiance à 95 % des estimations (SV) pour les situations à une main et à deux mains.

Afin de vérifier ces suppositions, une ANOVA à mesures répétées sur les ( $SV_{i,j}$ ) et 3 facteurs {Fréquence, Niveau et Tenue du volant à une main ou deux mains} a été réalisée, à l'aide du logiciel R<sup>®</sup>. Seuls les effets principaux et les interactions de premier ordre sont inclus au modèle. Cette ANOVA révèle des effets significatifs des trois facteurs Fréquence ( $p < 0.0001$ ) Niveau ( $p < 0.0001$ ) et Mains ( $p < 0.004$ ). Il existe également des effets significatifs des interactions Fréquence\*Niveau ( $p < 0.0001$ ) et Fréquence\*Mains ( $p < 0.0009$ ). En revanche l'interaction Mains\*Niveau n'est pas significative ( $p = 0.09$ ).

Comme on peut le voir sur la Figure 79, une augmentation de la fréquence tend à réduire la perception d'intensité. Ce résultat a largement été mis en évidence dans la littérature et lors de l'expérience précédente. Cependant, un test post-hoc de Tukey avec une correction de Bonferroni, montre que certaines différences ne sont pas significatives, représentées sur la Figure 79. Comme on peut le voir sur la Figure 80, à faible niveau la fréquence a peu d'effet sur la sensation. Lorsque le niveau augmente, l'intensité perçue tend à décroître avec l'augmentation de la fréquence. On retrouve le même résultat que pour la direction **Zh** de l'expérience 3. Ici, la direction d'excitation testée est une combinaison des direction **Xh**, **Yh** et **Zh**, mais la contribution principale est dans la direction **Zh**. Comme cela a été évoqué précédemment, ce résultat remet en cause l'utilisation d'une unique pondération afin de décrire la perception vibratoire et nécessite l'étude de l'évolution de la perception en fonction du niveau d'excitation.

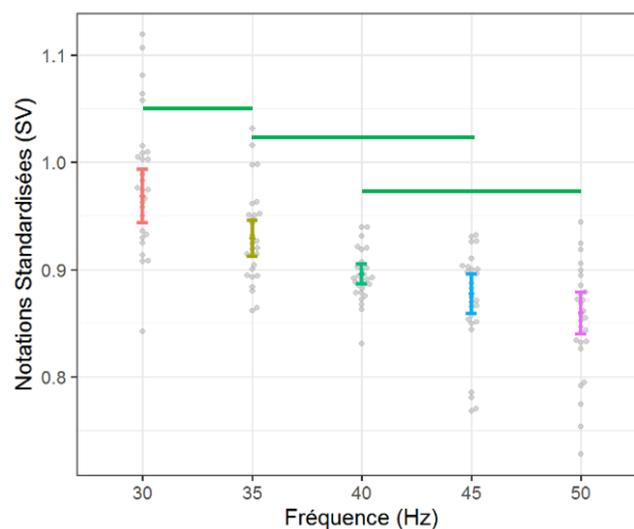


Figure 79 : moyennes et intervalles de confiance à 95 % des estimations (SV) en fonction de la fréquence. Les barres verticales représentent les différences non-significatives avec une correction de Bonferroni du fait des 10 comparaisons réalisées ( $\alpha > 0.05/10$ ).

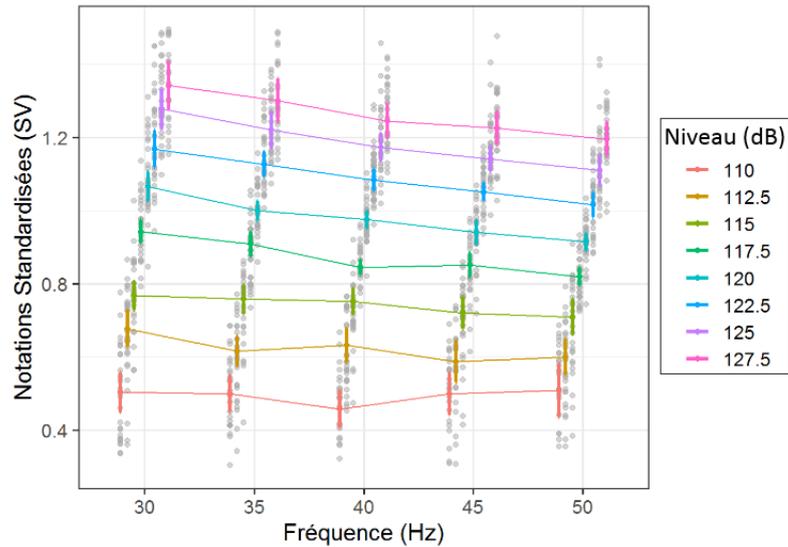


Figure 80 : moyennes et intervalles de confiance à 95 % des estimations (SV) en fonction de la fréquence et du niveau d'excitation

Comme on peut le voir sur la Figure 81, la situation « volant tenu à deux mains » est perçue plus forte que celle à une main. Les moyennes respectives des deux situations sont 0.99 et 0.88. Cette différence pourrait s'expliquer car la situation 2M excite un nombre bien plus important de mécanorécepteurs que la situation 1M. L'équation (6), présentée partie 1.6.2, montre que les valeurs ( $SV_{i,j}$ ) sont proportionnelles au logarithme de la sensation. Ainsi, cette différence de 0.11 entre les situations 2M et 1M correspond à un rapport de sensation  $\frac{\Psi_{2M}}{\Psi_{1M}} = 1.29$ . De façon étonnante, ce ratio 2M/1M est analogue au *binaural-to-monaural ratio*, défini dans la caractérisation de la sonie (de l'ordre de 1.3 pour un son tonal [76]). On trouve donc deux résultats équivalents, d'une part pour l'évaluation d'un son avec une ou deux oreilles et d'autre part pour l'évaluation d'une vibration avec une ou deux mains. L'absence d'interaction entre les facteurs Mains et Niveau montre que ce ratio est indépendant du niveau d'excitation. Cependant, comme on peut le voir sur la Figure 81, il varie en fonction de la fréquence avec une accentuation du ratio avec l'augmentation de la fréquence. Ce rapport varie entre 1.02 à 30 Hz et 1.36 à 50 Hz.

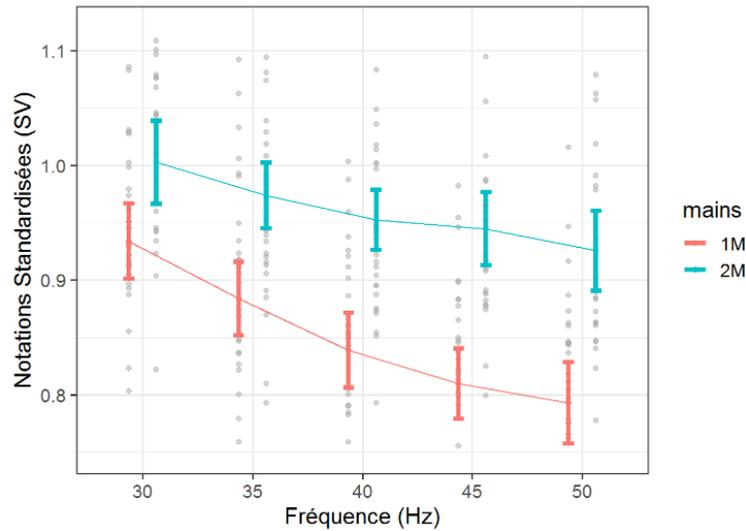


Figure 81 moyennes et intervalles de confiance à 95 % des estimations (SV) en fonction de la fréquence et du nombre de mains.

Il est difficile de trouver une explication à cette dépendance. Avec l'augmentation de la fréquence, la quantité d'énergie transmise à travers l'avant-bras chute [28] et l'on peut penser qu'à faible niveau d'excitation les vibrations sont principalement perçues grâce aux corpuscules pacinien et non pacinien présents dans le derme de la peau. Lorsque la perception est principalement périphérique, les mécanorécepteurs engagés sur une ou deux mains sont identiques. La réponse en fréquence entre les deux situations devrait donc être équivalente. De plus, la surface d'excitation de la main est suffisamment large pour qu'il n'y ait pas d'effet d'intégration surfacique des canaux paciniens, qui apparaît au-dessus de 40 Hz [47] et qui aurait pu expliquer ces différences. Il est donc difficile d'interpréter ce résultat mais il montre l'importance de tenir compte de la situation de conduite lors de la construction du modèle de perception.

### 2.3.4 Lois de Stevens

Comme on a pu le voir sur la Figure 78, la loi de Stevens  $\Psi = k \cdot \varphi^n$  semble adaptée pour décrire la perception d'intensité. Les coefficients  $n$  et  $k$  ont été calculés à partir des  $(SV_{i,j})$  et de  $\varphi$ , représentant l'accélération des vibrations (en  $m/s^2$ ) pour chaque fréquence et chaque situation, présentées dans le Tableau 6. Cette table montre également le coefficient de détermination de la régression linéaire utilisée ( $SV_{i,j} = \log_{10}(k) + n \cdot \log_{10}(\varphi)$ ) ainsi que la valeur F à comparer avec la table de Fisher-Snedecor à 6 degrés de liberté).

a) Conduite à une main

F (Hz)	n	k	R <sup>2</sup>	F (Fisher, df = 6)
30	1.07	10.6	0.99	385
35	1.02	9.3	0.99	845
40	1	8.2	0.99	649
45	0.93	7.6	0.98	729
50	0.9	7.2	0.99	971

b) Conduite à deux mains

F (Hz)	n	k	R <sup>2</sup>	F (Fisher, df = 6)
30	0.99	11.6	0.99	649
35	0.98	10.4	0.98	792
40	0.91	9.9	0.97	798
45	0.9	9.4	0.98	1370
50	0.83	9	0.97	1800

Tableau 6 : coefficient moyens de Stevens en fonction de la fréquence et de la situation de conduite

On remarque que l'exposant de Stevens  $n$  décroît avec l'augmentation de la fréquence. Ce résultat indique que lorsque la fréquence augmente, la sensibilité à l'intensité de la vibration diminue. Le paramètre  $k$  décroît également avec l'augmentation de la fréquence. On retrouve donc l'effet de décroissance de la sensation avec l'augmentation de la fréquence présenté précédemment. Une analyse Bootstrap [71] a été réalisée (10 000 tirages aléatoires des 28 participants avec remise) afin d'évaluer la robustesse des exposants trouvés. La Figure 82 présente les résultats de l'analyse et deux groupes statistiquement différents peuvent alors être construits pour chaque condition, basés sur les exposants de Stevens.

Condition 1M :

$$f \in [30, 40] \text{ Hz}, n = 1.04, k = 9.4$$

$$f \in [45, 50] \text{ Hz}, n = 0.93, k = 7.4$$

Condition 2M :

$$f \in [30, 35] \text{ Hz}, n = 1, k = 11$$

$$f \in [40, 50] \text{ Hz}, n = 0.9, k = 9.4$$

Note : les valeurs affichées ci-dessus correspondent à la médiane empirique calculée à partir des tirages de l'analyse Bootstrap.

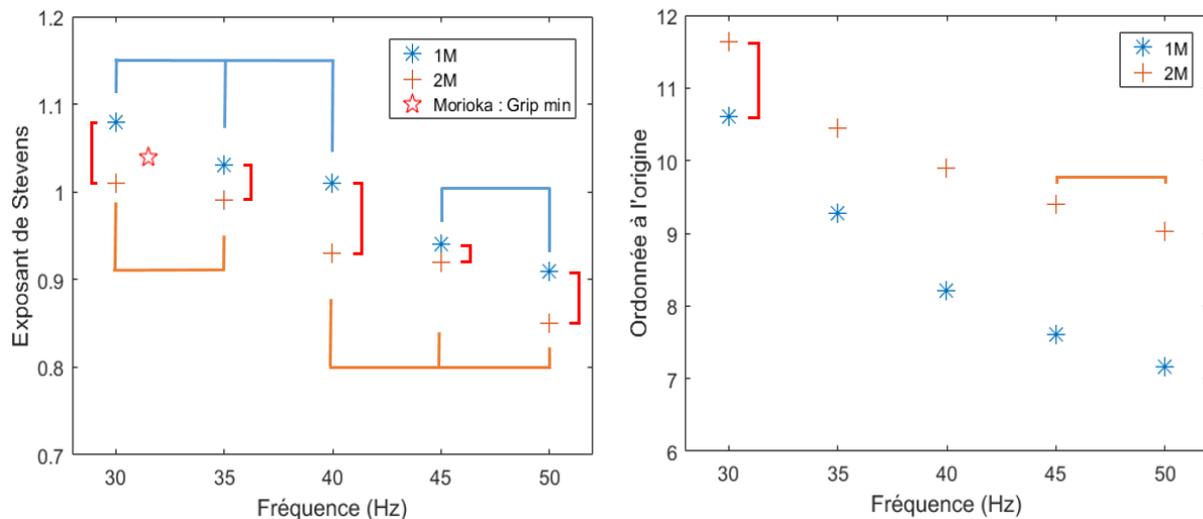


Figure 82 : valeurs  $n$  (à gauche) et  $k$  (à droite) de la loi de Stevens ( $\psi = k \cdot \varphi^n$ ) en fonction de la fréquence. Les lignes en traits pleins représentent les différences non-significatives compte tenu d'une correction de Bonferroni ( $\alpha > 0.05/10$ ).

On peut voir sur la Figure 82 que les décroissances de  $n$  et de  $k$  avec l'augmentation de la fréquence sont significatives. Les valeurs des exposants de Stevens sont proches de 1 et en accord avec celle proposée par *Morioka et al.* [55] pour une faible préhension. De plus, on peut remarquer que les exposants entre la situation 1M et 2M ne sont pas statistiquement différents. La sensibilité à une augmentation de niveau est donc similaire qu'une ou deux mains soient soumises aux vibrations. En revanche, les ordonnées à l'origine sont différentes, traduisant une sensibilité plus importante lors d'une préhension à deux mains. Si l'on compare à présent les exposants mesurés dans l'expérience 3 et ceux de la situation 1M, on peut voir que ceux calculés ici sont beaucoup plus faibles. Pour une excitation à 30 Hz, l'exposant calculé dans l'expérience 3 était de l'ordre de 1.5 dans la direction **Zh** contre 1.1 ici. Dans ces deux expériences, les stimuli utilisés sont identiques et le protocole expérimental similaire. Cependant, dans un cas les participants ont perçu les vibrations au travers d'une poignée en métal et dans l'autre par un volant automobile. Si le volant et la poignée ont un diamètre équivalent (30 mm et 25 mm) le volant présente une géométrie plus complexe. La courbure du volant et le méplat présent pour accueillir le thénar et le pouce peuvent affecter la préhension du volant. Le contact entre la main et la poignée ou entre la main et le volant est donc sensiblement différent. Nous n'avons à ce jour que peu d'explication quant aux différences entre les exposants trouvés. L'expérience de *Morioka et al.* [55] est conduite sur

une plage de variation équivalente à celle proposée ici et sur une double poignée en bois. Le contact est donc plus proche de celui de la poignée vibrante que du volant. Cependant, l'exposant proposé par Morioka est plus en accord avec ceux trouvés pour le volant. De façon similaire, si l'on tient compte de l'effet de la plage d'excitation vibratoire sur l'évaluation des exposants de Stevens (décrit page 112) on peut voir que les exposants trouvés par Morioka dans ses deux études ([50], [55]) diffèrent. Pour une plage d'excitation équivalente, on obtient à 31.5 Hz un exposant plus élevé pour l'expérience avec une poignée simple [50] que lors de l'utilisation d'une double poignée en bois [55]. On retrouve donc bien le même résultat. Cependant, il est donc difficile de conclure sur les différences existantes entre les exposants. De façon générale, l'évolution de  $n$  en fonction de la fréquence est similaire entre les différentes études, validant une décroissance de la sensibilité à une variation de niveau avec l'augmentation de la fréquence.

A partir de ces résultats, les courbes d'iso-sensations ont été construites et comparés à la littérature ainsi qu'à celles de l'expérience 3, présentées sur la Figure 83. Comme on peut le voir, les tendances des différentes courbes sont similaires pour des niveaux supérieurs à  $1 \text{ m/s}^2$ , décrivant une décroissance de la sensation avec l'augmentation de la fréquence. L'effet de la fréquence est quant à lui plus ou moins marqué selon les courbes. On peut observer que l'influence de la fréquence est plus marquée dans cette expérience que lors de l'expérience 3, pour une situation équivalente de préhension à une main. Les courbes proposées dans cette étude pour une conduite à deux mains sont en accord avec celles proposées par *Amman et al.* [54] et par *Morioka et al.* [55] pour les fortes amplitudes. En revanche, pour les faibles amplitudes, les courbes proposées diffèrent. En effet, dans notre cas la dépendance en fréquence évolue peu entre les différentes amplitudes alors que l'étude proposée par *Morioka et al.* [55] décrit une inversion de la sensibilité lorsque l'excitation décroît. Dans l'étude de Morioka, l'excitation est réalisée dans une direction différente de celle évaluée ici, avec une composante principale dans la direction  $X_h$ . Dans cette direction, le changement d'évolution avec l'augmentation de la fréquence a été montré lors de l'expérience précédente, en partie décrit sur la Figure 70. L'effet de la direction d'excitation pourraient ainsi expliquer les différences existantes.

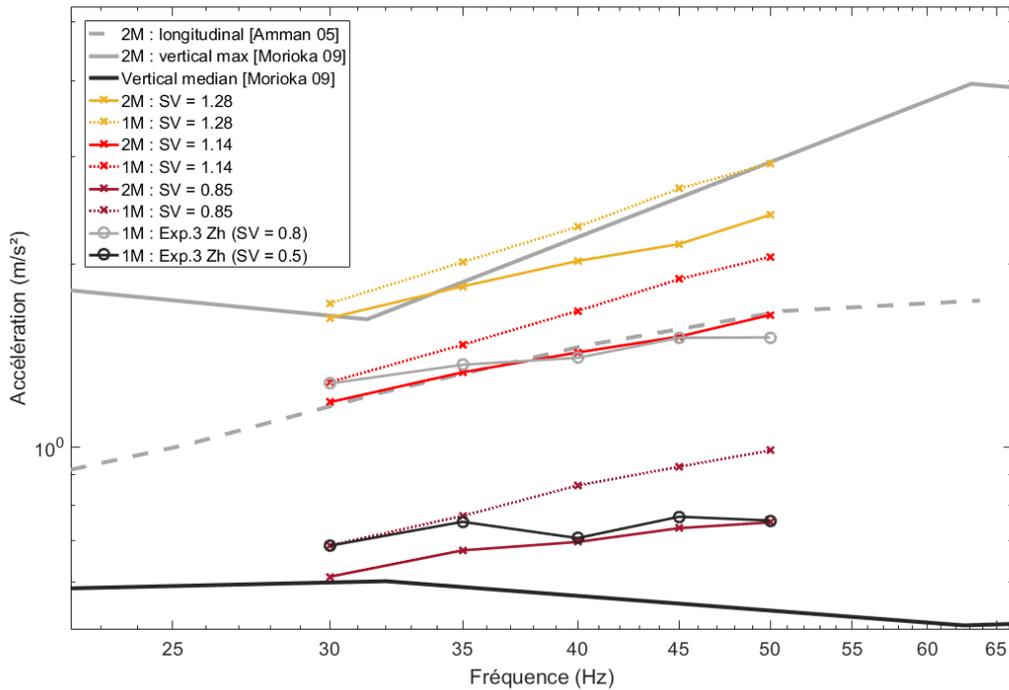


Figure 83 : courbes d'iso-sensation proposées par [54], [55], les résultats de l'expérience 3 pour les vibrations perçues à travers une main ainsi que les résultats de cette expérience (une et deux mains)

### 2.3.5 Construction d'une pondération fréquentielle

Pour chaque condition de conduite (1M et 2M) les courbes d'ISO-perception pour  $SV = 0.67$  et  $0.97$  ont été calculées, inversées et normalisées à 30 Hz par rapport à la courbe de pondération  $W_h$  proposée par la norme ISO 5349 [53]. Ces valeurs ont été choisies afin de permettre la comparaison avec l'étude de *Morioka et al.* [55]. D'une part, le stimulus de référence utilisé dans [55] est un sinus de 31.5 Hz à  $0.4 \text{ m/s}^2$  et produit une sensation moyenne de  $\log_{10}(\Psi_{Morioka}) = \log_{10}(100) = 2$ . Dans cette expérience, un stimulus équivalent de 30 Hz à  $0.4 \text{ m/s}^2$ , produit une log-sensation moyenne de 0.67. On fera donc l'hypothèse que  $\log_{10}(\Psi_{Morioka}) = 2$  est équivalent à  $SV = 0.67$ . D'autre part, les deux expériences sont réalisées pour des échelles de ratio, on suppose donc qu'un doublement de sensation dans chaque expérience produit une réponse équivalente. Cela se traduit par  $\Psi_{Morioka} = 200$  équivalent à  $SV = 0.67 + \log_{10}(2) = 0.97$ .

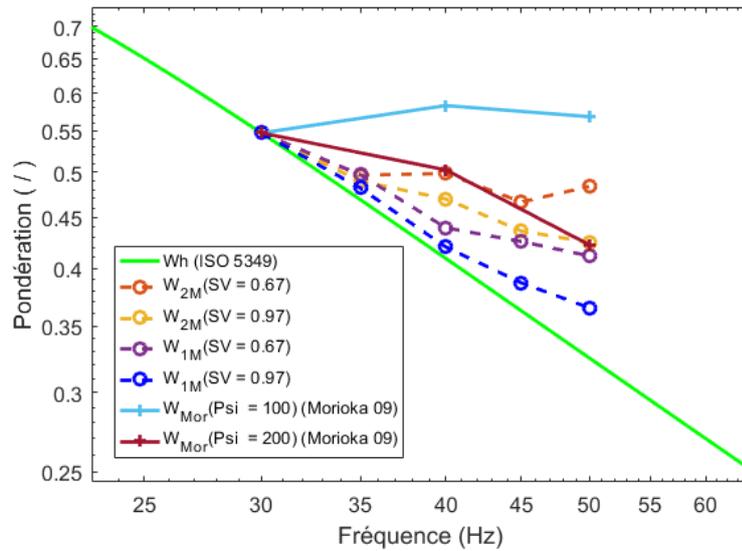


Figure 84 : comparaison entre les pondérations fréquentielles ;  $W_h$  [53], les résultats proposés par  $W_{Mor}$  [55] et les résultats de cette expérience  $W_{1M}$  et  $W_{2M}$

Comme on peut le voir sur la Figure 84,  $W_h$ ,  $W_{1M}$  et  $W_{2M}$  suivent une même tendance, décrivant la décroissance de la sensation avec l'augmentation de la fréquence. Cependant, il existe des différences entre les pondérations proposées ici et celles de *Morioka et al.* [55]. Bien qu'il soit difficile d'expliquer ces différences, on peut noter que la comparaison entre les trois études n'est pas immédiate. En effet, l'étude de Morioka est réalisée sur deux poignées vibrantes en bois alors que cette étude est conduite sur un vrai volant automobile. Il se peut que les différences de texture et de forme évoquées précédemment ait un impact sur la perception. L'étude de Morioka est également réalisée en cachant la source vibratoire, du fait des très basses fréquences testées dans le protocole ( $f < 10$  Hz) dont le déplacement généré est visuellement perceptible. Il semble cependant peu probable que le mouvement vibratoire soit visible au-dessus de 30 Hz, pour des niveaux de l'ordre de  $1 \text{ m/s}^2$  (déplacement de l'ordre de  $10^{-5}$  m) et ait un impact sur la perception des vibrations. On peut enfin noter que la tendance de  $\Psi_{Morioka} = 200$  reste cohérente par rapport aux résultats présentés précédemment. En revanche, l'utilisation de  $\Psi_{Morioka} = 100$  semble peu appropriée dans le cadre des faibles vibrations du volant. La pondération  $W_{1M}(SV = 0.97)$  est la plus proche de  $W_h$ . Ce résultat est très satisfaisant car la norme a été conçue pour l'évaluation d'une poignée tenue à une main et des niveaux de vibrations élevés. Pour la condition  $1M$ ,  $SV = 0.97$  correspond à une situation de forte vibration. Il est donc raisonnable de dire que l'utilisation de la norme dans cette configuration est adaptée. Cependant, dans les autres situations,

l'utilisation des pondérations définies dans cette étude est nécessaire afin de mieux décrire l'effet des vibrations de faibles niveaux exercés sur les deux mains.

## 2.4 Conclusion

L'expérience a montré que l'appartenance à un groupe d'experts avait peu d'influence sur la sensation produite. Ce résultat montre que, dans le cadre d'une expérience de laboratoire, la population experte est représentative d'une population naïve. Cependant, il serait intéressant de tester ces populations dans le cadre d'une expérience de conduite plus libre, par exemple sur piste. Les résultats seraient peut-être différents en raison des a priori sur le modèle, la motorisation et la réponse vibratoire de la voiture.

D'un point de vue des caractéristiques vibratoires, la fréquence est le facteur qui influence le plus la perception. L'augmentation de celle-ci tend à diminuer l'intensité perçue. Même si la plage de fréquence de 20 Hz évaluée dans cette expérience est faible par rapport à celles étudiées dans la littérature, des différences significatives entre les modèles de sensation ont pu être notées. L'exposant de Stevens varie entre 1.04 à 30 Hz et 0.93 à 50 Hz, dans la situation à une main et entre 1 et 0.9 pour la situation à deux mains. De plus, l'expérience a permis de mettre en évidence les différences de sensation générées par la situation de conduite, avec un ratio  $2M/1M$  moyen d'environ 1.3, analogue au binaural-to-monaural ratio. Enfin, cette expérience montre que l'utilisation d'une unique pondération fréquentielle n'est pas adaptée. Il est donc important de tenir compte de la situation de conduite et de la gamme de niveaux dans le choix de la pondération fréquentielle à utiliser. Contrairement à l'expérience précédente, la fréquence d'excitation a un effet significatif pour l'ensemble de la gamme d'excitation testée. La situation de conduite a également une influence. Afin de tenir compte de l'ensemble de ces paramètres, les lois de Stevens mesurées peuvent permettre de construire des courbes de pondérations à l'image de celles proposées dans la partie 2.3.5 de ce chapitre.

## Conclusion du chapitre 3

Ce chapitre a présenté les travaux réalisés sur la perception des vibrations induites par le volant. Lors de l'introduction de celui-ci, les mouvements de translation induits par la colonne de direction ont été mis en évidence dans une campagne de mesure. Les deux expériences présentées ensuite ont proposé d'évaluer l'influence de la fréquence, du niveau et de la direction d'excitation sur la perception d'intensité, décrivant ainsi l'effet des vibrations induites par le volant.

D'un point de vue expérimental, ces deux expériences ont montré l'influence non négligeable des mains sur la réponse vibratoire du volant. Si des difficultés de reproductibilité des excitations ont compliqué l'analyse de la première expérience, l'asservissement en boucle ouverte mis en place dans la seconde expérience a permis de s'en affranchir. Ces expériences apportent un protocole robuste d'évaluation de la sensation produite par les vibrations sur un banc d'essai. A partir de l'expérience 4, on a également pu voir qu'avec cette méthode d'estimation, les connaissances en acoustique automobile du panel n'avaient pas d'influence sur les évaluations réalisées. Ce résultat montre une certaine représentativité d'un panel d'expert vis-à-vis d'un groupe de conducteurs naïfs.

Lors de l'expérience 3, on a pu voir que la sensation évoluait différemment en fonction de l'amplitude. Autour de  $0.3 \text{ m/s}^2$ , la sensation dépend principalement du niveau et peu de la fréquence ou de la direction d'excitation. Lorsque le niveau augmente, des dépendances à la fréquence et à la direction d'excitation apparaissent. En effet, la sensation tend à diminuer avec l'augmentation de la fréquence. De plus, la sensibilité est plus importante dans la direction **Zh** par rapport à la direction **Xh**. L'expérience 3 propose finalement une série d'exposants de Stevens permettant de tenir compte à la fois de la dépendance en fréquence, à la direction et au niveau d'excitation. A partir de ces lois, il est possible de construire des courbes d'iso-sensations adaptées aux gammes d'excitations auxquelles sont soumis les conducteurs automobiles. La deuxième partie de ce chapitre a montré au travers de la quatrième expérience qu'il existait des différences importantes entre la perception des vibrations à une ou à deux mains. En effet, les vibrations sont perçues plus fortes lorsqu'elles sont présentées aux deux mains plutôt qu'à une seule. On trouve un ratio d'environ 1.3 entre les perceptions d'un même stimulus pour ces deux situations. Les résultats proposés ici pour

décrire la perception des vibrations au travers des deux mains concordent avec la littérature. Ils apportent également des éclaircissements sur la variabilité de la sensation sur de faibles gammes de fréquence et d'amplitude. Il serait tout de même intéressant de confronter ces modèles lors d'évaluations subjectives sur route ouverte. De plus, lors du Chapitre 2 nous avons pu montrer que les mains avaient une influence sur la réponse dynamique du volant. En effet, l'atténuation apportée par la main est différente en fonction du nombre de mains en contact avec le volant. L'étude combinée de l'atténuation induite par les mains et de la sensation procurée par la vibration résultante est nécessaire dans la compréhension du confort vibratoire en véhicule.

# Conclusion générale

Ce manuscrit de thèse a présenté les travaux réalisés autour des deux axes principaux : la caractérisation du couplage mécanique {main(s)-volant} et la mise en place de modèles de perception. Au regard des réponses déjà apportées par la littérature, une série de questions ont été soulevées en début de thèse. Cette conclusion va chercher à répondre à l'ensemble de celles-ci à partir des résultats obtenus et à identifier les points d'ombres qui permettraient d'améliorer le niveau de connaissance sur la perception des vibrations dans le domaine automobile.

Afin de caractériser la réponse mécanique du système couplé {main(s)-volant}, les questions suivantes ont été posés :

- **Quels efforts sont appliqués par un conducteur moyen dans différentes situations de conduite ?**

Afin de décrire l'effort appliqué par un conducteur, deux efforts ont été définis : l'effort de poussée et de préhension. Ces deux efforts permettent de caractériser entièrement l'interaction statique entre la main et le volant. Lors d'une situation de conduite dite « normale », les conducteurs appliquent un effort de préhension plus important que l'effort de poussée avec en moyenne une préhension de l'ordre de 18 N contre 14 N pour la poussée. Lorsque la situation de conduite est sportive ou lors de conditions météorologiques défavorables, ces efforts ont tendance à augmenter et atteignent en moyenne 51 N de préhension et 30 N de poussée. L'expérience 1 a également pu montrer que les efforts ne dépendent pas de l'excitation vibratoire présentée. En effet, aucune différence n'a été observée entre une situation pour laquelle le volant ne vibre pas et les situations sous sollicitation vibratoire d'un moteur. Ces efforts ne dépendent également pas des différences anthropométriques existantes entre les conducteurs (taille, âge et dimensions des bras). Cependant, les efforts appliqués par le panel masculin sont en moyenne plus importants que ceux du panel féminin, avec respectivement 18 N et 10 N. En synthèse, les efforts statiques appliqués dépendent principalement de la situation de conduite, marquée par la nécessité de

contrôle du véhicule. Les mesures ainsi réalisées constituent une première base de données des efforts de poussée et de préhension au sein du Groupe Stellantis. Ces essais ayant été réalisés dans le cadre de mesure sur banc d'essai, les nécessités de maintien du véhicule sont faibles et les conditions d'expériences par mauvaises conditions météo n'étaient pas reproduites. Cette base pourra être enrichie par des mesures complémentaires visant par exemple à évaluer d'autres situations de conduites ou des mesures sur piste.

➤ **Le protocole de caractérisation vibratoire du volant utilisé au sein du Groupe Stellantis est-il représentatif des excitations réellement perçues ? La présence des mains modifie-t-elle de façon significative la réponse vibratoire du volant ?**

Au travers de l'expérience 1, on a pu voir que les mains ont un effet non-négligeable sur la réponse vibratoire du volant autour de 40 Hz. Cet effet est similaire entre les trois directions d'excitations et se traduit par une atténuation du niveau de vibration du volant par rapport à une excitation volant libre. Son importance varie entre les participants, avec des atténuations comprises entre 43% et 68% lorsque le volant est tenu à deux mains. Ces différences interindividuelles n'ont pas pu être expliquées par les paramètres anthropométriques mesurés ni par les efforts appliqués sur le volant. Une des pistes de réponse proposée pourrait être les différences interindividuelles des impédances mécaniques du bras, mises en évidence dans la littérature. Cependant, la mesure de celles-ci s'est avérée peu concluante et non présentées dans ce manuscrit. L'expérience 2 a quant à elle confirmé l'existence d'un phénomène d'atténuation pour des fréquences comprises entre 30 Hz et 80 Hz. Ce constat montre encore une fois le manque de représentativité des mesures volant libre pour décrire l'excitation présentée aux conducteurs. L'expérience 2 a également confirmé que l'atténuation était plus importante lorsque le volant est tenu à deux mains par rapport à une seule, avec une atténuation moyenne de l'ordre de 30% lors d'une conduite à une main et de 45% à deux mains. Cependant, les différences de comportement entre les directions d'excitation n'ont pas été clairement établies, en partie masquées par la variabilité de l'excitation générée par le banc d'essai. Enfin, la similitude des atténuations observées pour le 3<sup>ème</sup> et le 5<sup>ème</sup> rapport a renforcé l'idée que la main et le volant forment un système couplé linéaire, hypothèse nécessaire à la construction du modèle prédictif souhaité.

➤ **Peut-on quantifier la réponse du système {main(s)-volant} à partir des modèles mécaniques de main proposés par la littérature ?**

Les modèles de main proposés par la norme ISO 10 068 décrivent un ensemble d'impédance mécanique mesurées dans la littérature. Le couplage de ces modèles avec un volant par une méthode des mobilités a donné des résultats prometteurs. En effet, l'accélération estimée donne des résultats plus proche des excitations mesurées qu'une mesure volant libre. Dans la direction tangentielle au volant, l'estimation apporte une idée précise du niveau d'excitation auquel sont soumis les participants sur l'ensemble de la gamme de fréquence testée (30 Hz – 80 Hz). Dans les deux autres directions, l'estimation est satisfaisante pour une grande partie de la gamme de fréquence mais certaines émergences sont encore mal estimées. L'utilisation de la modélisation à ces fréquences-là pourrait être une source d'erreur lors de l'évaluation de l'inconfort. Cependant, lors de mesures en piste, les erreurs induites par le modèle correspondent aux erreurs moyennes de mesure. En conséquence, l'utilisation du modèle dans ce cadre, donnerait des résultats acceptables. De plus, dans la direction normale à la paume de la main, le problème principal mis en avant dans l'analyse semble lié à l'hypothèse de corps rigide réalisée. Celle-ci ne remet donc pas en cause la modélisation mise en place ici et pourrait être écartée en réalisant une mesure directement à l'interface main-volant. Au vu de ces résultats, la modélisation proposée ici est adaptée pour décrire le comportement mécanique du système main(s)-volant dans un spectre de fréquence compris entre 30 Hz et 80 Hz. La procédure décrite ici apporte une estimation plus précise des vibrations auxquelles est soumis un conducteur « moyen » qu'une mesure volant libre et constitue le point d'entrée de l'approche de perception des vibrations.

Comme cela a été décrit dans le chapitre 1, la littérature ne permet pas de décrire l'ensemble des phénomènes de perception des vibrations d'un volant sous une sollicitation du groupe motopropulseur. Afin de la compléter, plusieurs questions ont été posées lors de l'approche expérimentale auxquelles nous allons répondre à partir des expériences réalisées.

➤ **La fréquence d'excitation a-t-elle un effet sur la sensation, autour des modes propres de la colonne de direction ?**

Comme on a pu le voir dans l'expérience 3 et 4, la fréquence d'excitation joue un rôle important sur la perception d'intensité de la vibration d'un volant. Cependant, son étude nécessite l'évaluation simultanée du niveau d'excitation car les effets du niveau et de la fréquence sur la sensation sont couplés. En effet, aux faibles niveaux (par exemple autour de  $0.3 \text{ m/s}^2$ ), l'effet de la fréquence sur la perception d'intensité est négligeable. Lorsque le niveau vibratoire augmente, l'effet de la fréquence augmente également : on observe une décroissance de la sensation avec l'augmentation de la fréquence. Ces écarts peuvent aller jusqu'à 6 dB entre des excitations à 30 Hz et à 50 Hz produisant une même sensation. L'ensemble de ces effets sont décrits par les lois de Stevens proposées dans cette thèse.

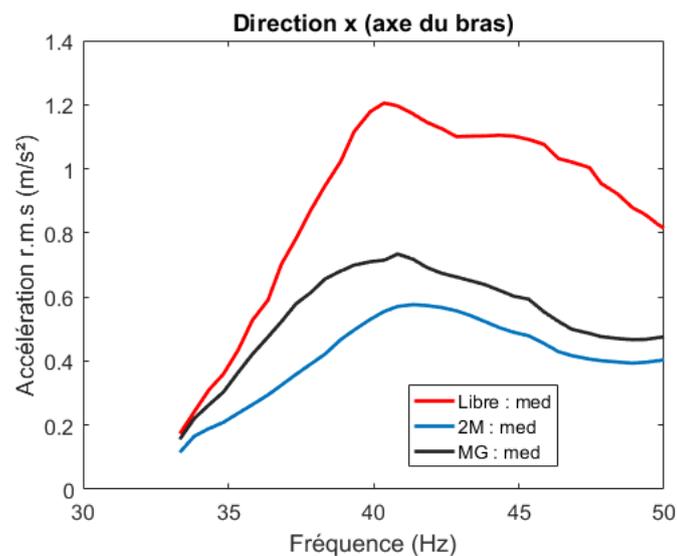
➤ **La direction d'excitation influence-t-elle la sensation ?**

Dans ce manuscrit, deux directions d'excitations ont été testées : la direction normale à la paume de la main et celle colinéaire à l'axe du bras. La troisième direction n'a pas été évaluée car elle a été largement traitée dans la littérature pour le domaine automobile. De la même manière que pour la fréquence d'excitation, l'effet de la direction sur la sensation est dépendant du niveau d'excitation. A faible niveau, aucune différence n'a été notée entre les deux directions d'excitation. Cependant, à plus fort niveau l'effet d'une sollicitation vibratoire est plus important dans l'axe du bras que dans la direction normale à la paume de la main. Les lois de Stevens proposées décrivent également cet effet. Le domaine d'utilisation de ces lois correspond à une plage fréquentielle comprise entre 30 Hz et 50 Hz, pour les deux directions d'excitations citées ci-dessus et une excitation entre 110 dB et 130 dB.

➤ **Existe-t-il des différences de perception lorsqu'une ou deux mains sont soumises à une excitation vibratoire ?**

Pour un même niveau de sollicitation, les vibrations sont perçues plus fortes si les deux mains sont en contact avec le volant. Cette thèse a pu montrer qu'il existe un ratio de l'ordre de 1.3 entre les sensations produites dans ces deux situations. Ce ratio varie avec la fréquence d'excitation, il est donc nécessaire de construire des lois psychophysique différentes si l'on cherche à évaluer la perception des vibrations pour un volant tenu à une ou à deux mains. Cependant, les exposants de Stevens calculés pour chaque situation sont similaires, indiquant que la présence d'une ou de deux mains n'affecte pas la sensibilité à une variation de niveau.

Dans le chapitre 3, les vibrations présentées entre une situation à une ou à deux mains étaient identique. En revanche, on a pu voir que l'atténuation apportée par deux mains était plus importante que celle apportée par une seule. On peut donc se demander si l'atténuation induite par la présence de la deuxième main « n'efface » pas l'apport de sensation également lié à sa présence. A titre d'exemple, reprenons les résultats de l'expérience 2, décrivant les différences entre une excitation volant tenu à une main et tenu à deux mains. Sur la Figure 85, on peut voir que l'atténuation est plus importante lorsque le volant est tenu à deux mains par rapport à une seule. A présent, multiplions ces courbes par les pondérations proposées dans l'expérience 4, courbes rouge de la Figure 83.



*Figure 85 : comparaison entre la médiane des excitations mesurées dans la situation volant libre, volant tenu à deux mains (2M) et tenu en main gauche (MG) issue des résultats de l'expérience 3.*

On peut voir sur la Figure 86 que les accélérations pondérées sont confondues pour des fréquences supérieures à 40 Hz. Il semble donc que si l'on tient compte à la fois de l'apport d'atténuation et de sensation d'une deuxième main sur le volant, les effets s'annulent au-dessus de 40 Hz. En dessous de 40 Hz, les vibrations seront quant à elles certainement perçues plus forte lorsque le volant est tenu à une main plutôt qu'à deux. Cet exemple montre la nécessité de tenir compte à la fois du couplage mécanique et des dépendances de la sensation pour décrire la perception des vibrations. Cependant, le résultat proposé ici ne peut être généralisé pour l'ensemble des véhicules. En effet, l'atténuation induite par la présence des mains est fortement liée à la mobilité du volant. Il sera donc nécessaire de réaliser une mesure de mobilité du volant pour chaque véhicule que l'on souhaite caractériser afin d'évaluer le comportement vibratoire du système couplé.

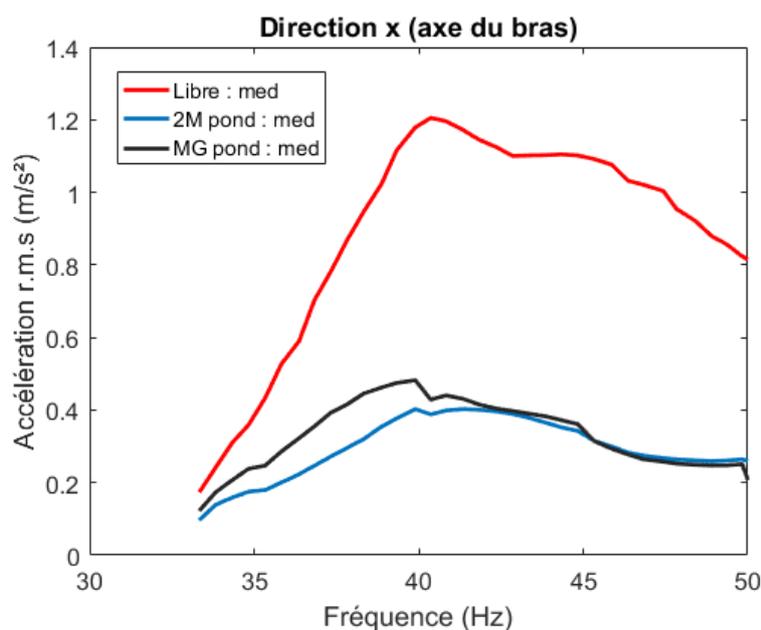


Figure 86 : comparaison entre la médiane de l'accélération volant libre et des accélérations pondérées à partir des courbes proposées dans l'expérience 3 pour la situation 1M et 2M

A partir des différents résultats proposés dans ce manuscrit, une démarche pour la caractérisation de l'inconfort généré par les vibrations du volant peut être mise en place. Comme cela a été présenté dans le chapitre 2, bien que l'utilisation de la méthode de mobilité présente quelques erreurs d'approximation, son utilisation permet une estimation des niveaux d'excitation auxquels sont soumis les conducteurs. Cette méthode présente l'avantage d'être utilisable par une simple mesure de la mobilité du volant et des vibrations

au point d'interface main-volant. De plus, le temps de calcul est très court car il ne dépend que de l'inversion du problème matriciel. Ainsi, cette méthode s'adapte très bien au monde industriel. Une fois l'évaluation du niveau présenté au conducteur réalisée, il est possible de calculer l'influence de ces vibrations selon de nombreux paramètres. Les lois de Stevens et les pondérations proposées dans l'expérience 3 permettent de prendre en compte l'influence de la direction, du niveau et de la fréquence d'excitation. Enfin, les lois de Stevens décrites dans l'expérience 4 permettent de tenir compte des différences existantes entre une préhension du volant à une ou à deux mains.

Afin de compléter cette démarche, il serait intéressant d'évaluer l'ensemble de ces paramètres lors d'expériences sur piste. Dans un premier temps, la construction d'un volant instrumenté d'une nappe de capteurs de pression surfacique et de jauges de contrainte aux points d'interface main(s)-volant permettrait de mesurer les efforts statiques et dynamiques appliqués par les mains. Il serait ainsi possible de tester les conditions de conduites sportives ou de mauvaises conditions météo dans des situations réelles. De plus, l'utilisation de ce volant permettrait d'accroître la compréhension du comportement du système main(s)-volant couplé grâce à la mesure de l'impédance mécanique du système couplé directement en véhicule. Cependant, la construction de ce type de volant doit garantir une mesure peu invasive, permettant aux conducteurs d'avoir une tenue similaire à celle d'un volant classique et de ne pas obstruer la tâche de conduite sur piste.

Enfin, l'évaluation des modèles décrit dans cette thèse sera effectuée au travers d'une campagne de mesures et d'évaluations subjectives de véhicules de différentes gammes. Cette campagne permettra d'évaluer la robustesse du modèle de couplage ainsi que la précision des lois de Stevens proposés. De plus, cette même campagne de mesure servira également à évaluer l'influence des différentes sources de stimulations vibratoire. Parmi elles, les vibrations du siège, du plancher et du volant dont on pourra chercher à caractériser l'influence relative sur l'inconfort. Une expérience a été lancée à ce sujet au sein du Groupe Stellantis. L'objectif à terme est de converger vers un modèle d'inconfort complet, intégrant à la fois des stimulations sonores et vibratoires aux trois interfaces, dont la première version a été construite et basée sur les résultats de cette thèse [77].



# Annexes

## Annexe 1 : discrétisation en pression du volant

La nappe mesure une pression moyenne sur une surface de  $0.25 \text{ in}^2$ , numérotée selon la section du volant de 1 à 13, du fait des 13 capteurs nécessaires au maillage de la section du volant. Quartes discrétisation ont donc été créés, respectivement Haut/Bas et partie gauche et droite du volant :

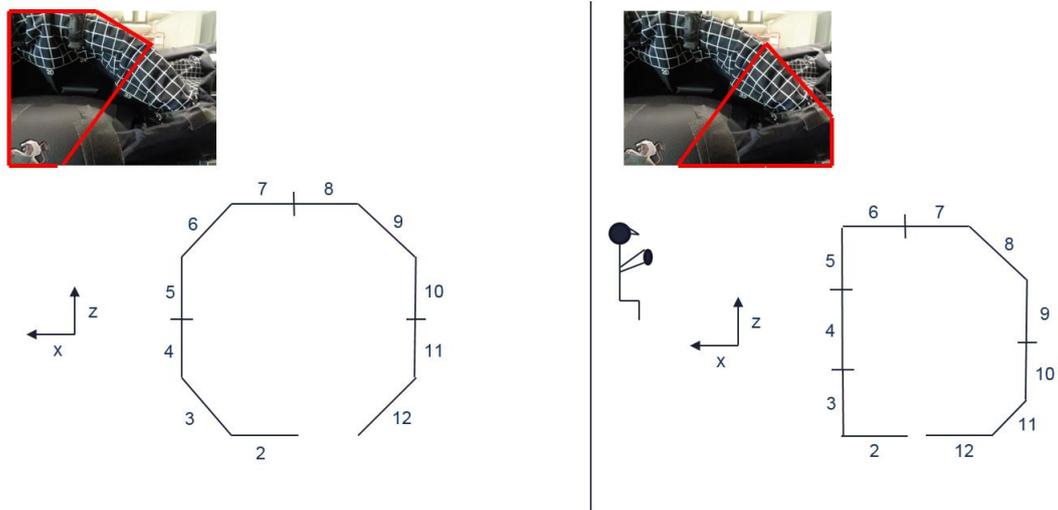


Figure 87 : discrétisation main droite.

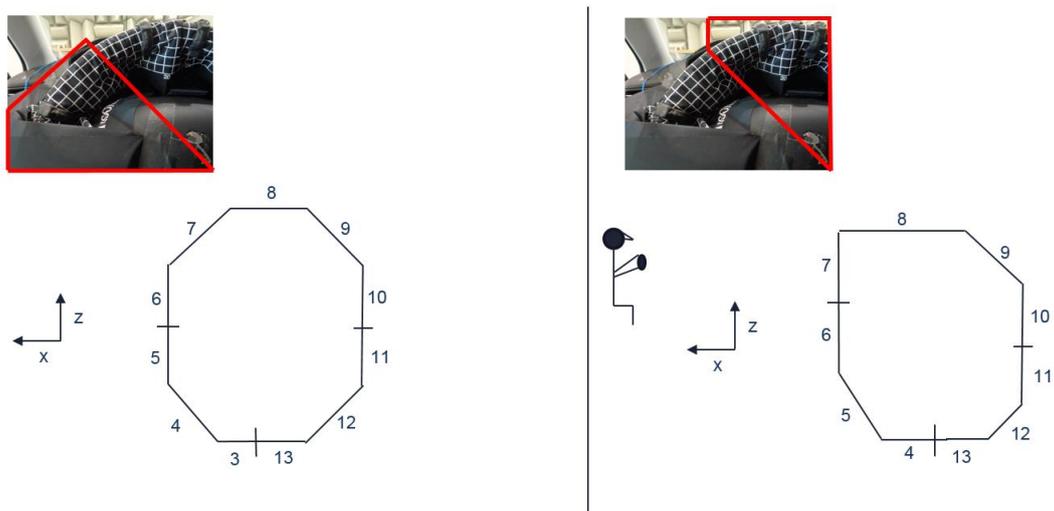


Figure 88 : discrétisation main gauche.

## Annexe 2 : comparaison des niveaux vibratoires entre les situations volant libre et volant tenu

### Direction t

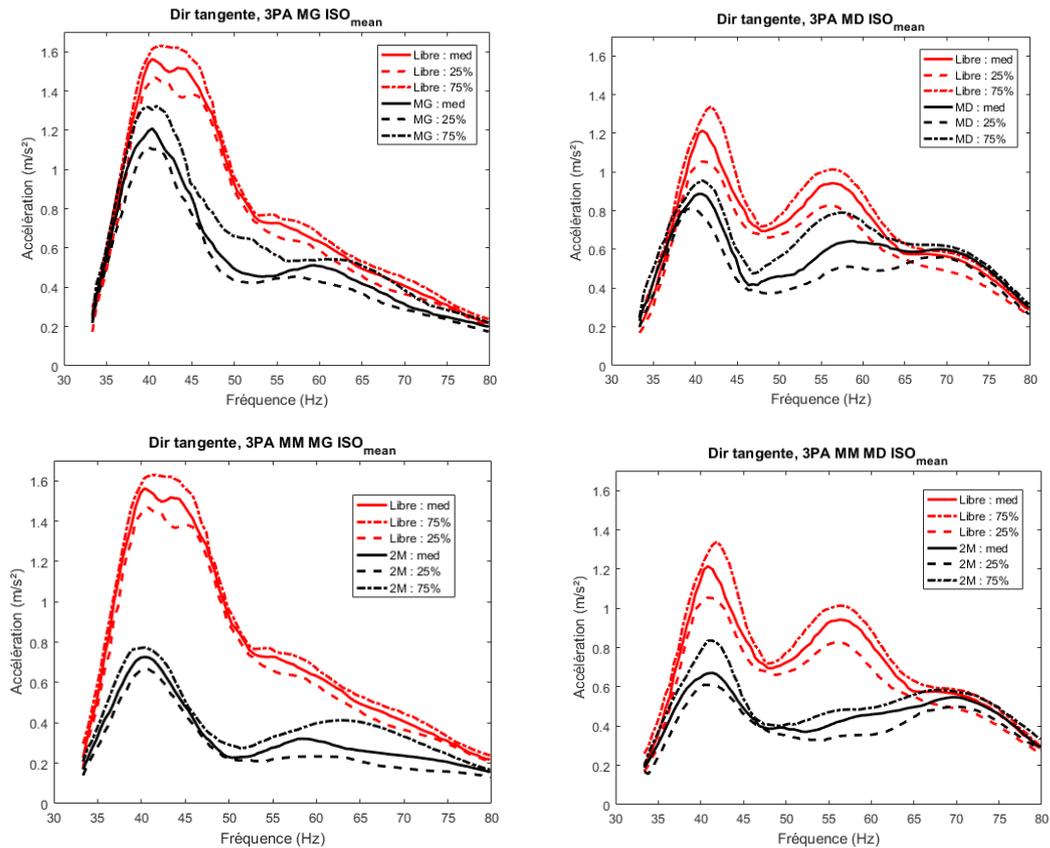


Figure 89 : médiane et intervalles interquartiles des accélérations mesurées en fonction des différentes situations, direction t.

## Direction n

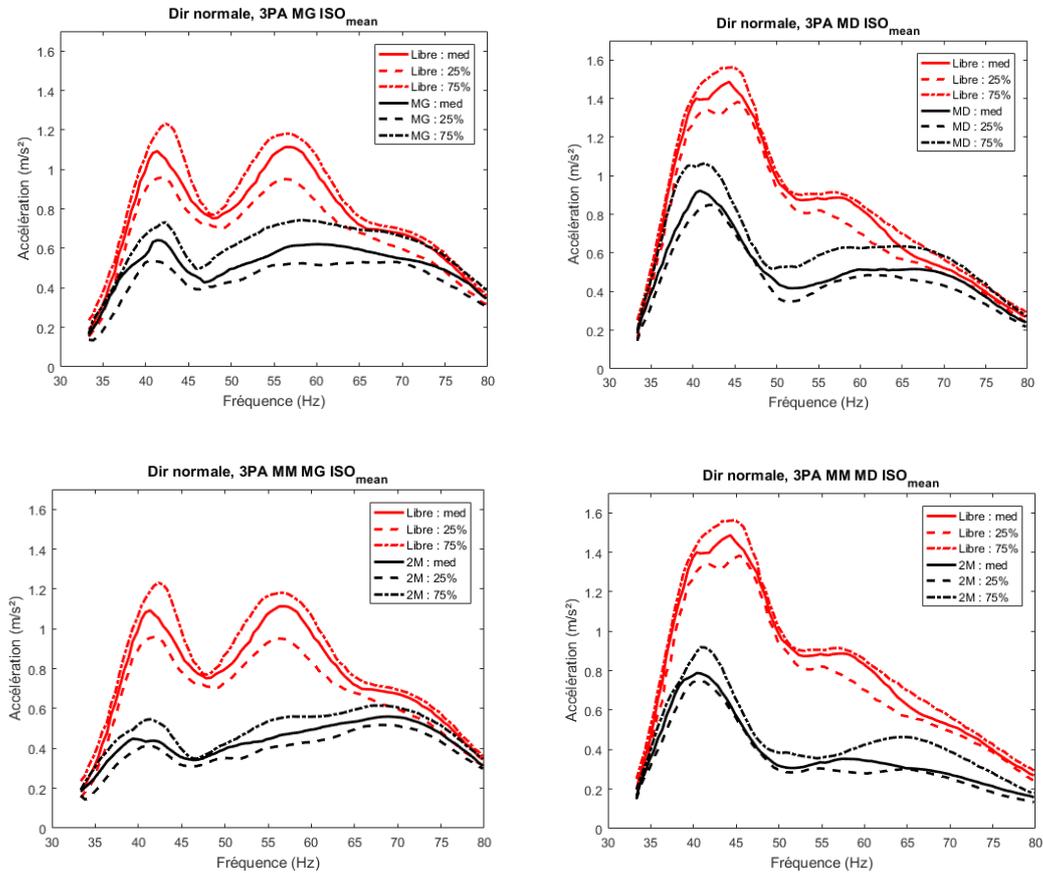


Figure 90 : médiane et intervalles interquartiles des accélérations mesurées en fonction des différentes situations, direction n.

## Annexe 3 : comparaison entre les mesures et les prédictions du modèle de couplage

### Situation Main Gauche : point G

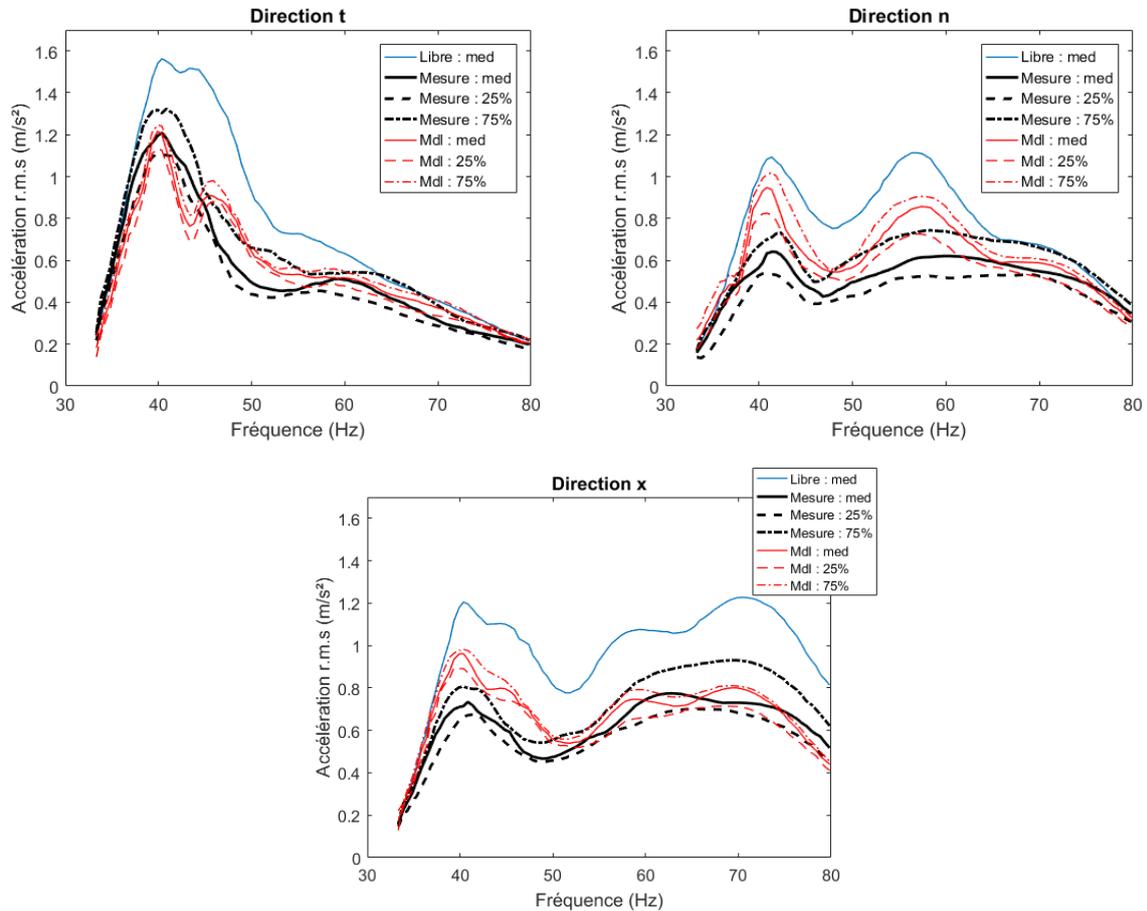


Figure 91 : médiane et intervalles interquartiles des atténuations. Comparaison entre la mesure volant libre, volant tenu à une main et le modèle prédictif

## Situation Deux Mains : point G

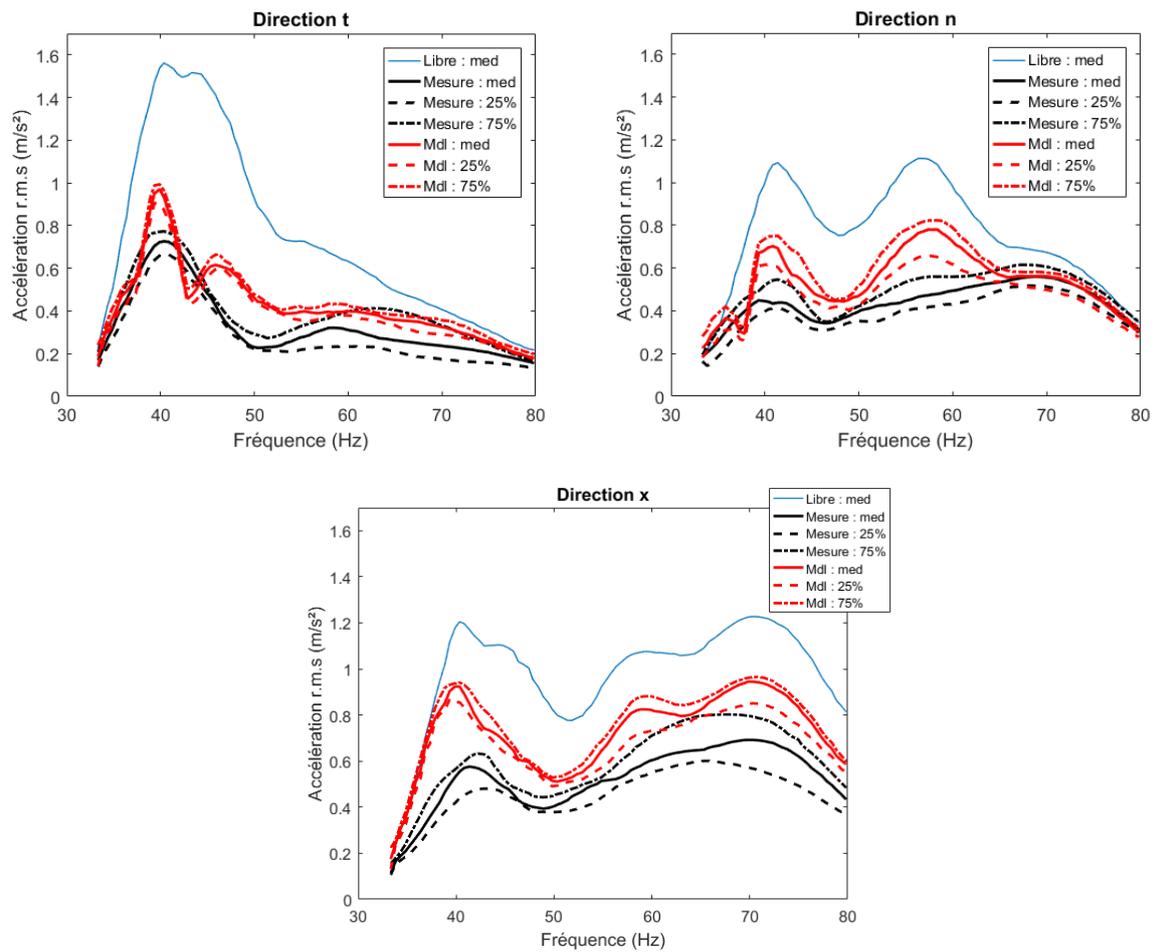


Figure 92 : médiane et intervalles interquartiles des atténuations. Comparaison entre la mesure volant libre, volant tenu à deux mains et le modèle prédictif

## Annexe 4 : Consignes aux participants

« Lors de l'expérience, vous allez placer votre main d'écriture sur la poignée, avant-bras dégagé et coude à 90°. Comme vous devez imaginer être dans une voiture, je vais vous demander de serrer la poignée avec la même force que si vous teniez un volant. Pour vous aider, je vous propose de vous entraîner à évaluer cette force à l'aide de la poignée de référence.

Maintenant que vous êtes installé nous allons pouvoir commencer. Lors de l'expérience, une vibration est envoyée dans la poignée. Pour chacune d'elle, je vais vous demander d'évaluer votre sensation d'intensité de la vibration. Vous allez évaluer votre sensation en affectant un nombre proportionnel à celle-ci. Affectez un nombre à la première situation puis affectez les nombres suivants de sorte qu'ils soient représentatifs de votre sensation. Par exemple, s'il vous apparait que la seconde vibration est trois fois plus forte que la première, affectez-lui un nombre trois fois plus grand. Il n'y a aucune limite dans les nombres que vous affectez, ils peuvent être entiers, décimaux ou sous forme de fraction. Je vous informerai au fur et à mesure de l'avancée de l'expérience et vous proposerai de faire des pauses toutes les 10 minutes. Vous pouvez également demander à faire une pause quand vous le souhaitez. En revanche les stimuli ne seront joués qu'une seule fois, il vous faudra donc donner une estimation pour chacun d'eux.

Nous allons maintenant commencer l'entraînement. Cette phase a pour but de vous familiariser avec la procédure mais également vous donner une idée de la variété des vibrations présentées dans l'expérience. »

# Références

- [1] M. P. De Looze, L. F. M. Kuijt-Evers and J. Van Dieen, "Sitting comfort and discomfort and the relationships with objective measures," *Ergonomics*, vol. 46, no. 10, p. 985 – 997, 2003.
- [2] S. Coren, L. M. Ward and J. T. Enns, *Sensation and Perception*, New York: Wiley, 2003.
- [3] R. Khoudeir and B. Roussel, "Le confort dans l'habitacle des véhicules : l'utilisation des principes architecturaux pour la conception des voitures," in *10ème Séminaire CONFERE*, pp. 65-75, Belfort – France, 2003.
- [4] L. Zhang, M. G. Helander and C. G. Drury, "Identifying Factors of Comfort and Discomfort in Sitting," *The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, vol. 38(3), pp. 377-389, 1996.
- [5] M. G. Helander and L. Zhang, "Field studies of comfort and discomfort in sitting," *Ergonomics*, vol. 40, no. 9, p. 895 – 915, 1997.
- [6] P. Vink and S. Hallbeck, "Editorial: Comfort and discomfort studies demonstrate the need for a new model," *Applied Ergonomics*, Vols. 43, Issue 2, pp. 271-276, 2012.
- [7] A. Tilley and H. Dreyfuss, *The Measure of Man and Woman : Human Factors in Design*, Jhon Wiley & sons, inc., 2002.
- [8] J. Porter and D. Gyi, "Exploring the optimum posture for driver comfort," *International Journal of Vehicle Design*, vol. 19, pp. 255-266, 1998.
- [9] G. Kyung and M. A. Nussbaum, "Specifying comfortable driving postures for ergonomic design and evaluation of the driver workspace using digital human models," *Ergonomics*, vol. 52, no. N°8, pp. 939-953, 2009.

- [10] S. Schmidt, M. Amereller, M. Franz and R. Kaiser, "A literature review on optimum and preferred joint angles in automotive sitting posture," *Applied Ergonomics*, Vols. 45, Issue 2, Part B, pp. 247-260, 2014.
- [11] J. Giacomini and S. Gnanasekaran, "Driver estimation of steering wheel vibration intensity: questionnaire-based survey," *Engineering Integrity*, vol. 18, pp. 23-29, 2005.
- [12] ISO 1683, *International Organisation for Standardization, Acoustique — Valeurs de référence recommandées pour les niveaux acoustiques et vibratoires*, 2008.
- [13] Y. J. Shim and C. S. Shin, "The study of the reduction of idle vibration of steering wheel through the use of a weight reduction method," *SAE Technical Paper Series*, pp. 01-0393, 1999.
- [14] S. Wang, W. Shi, G. Wu and S. Nie, "Research and Improvement of Steering Wheel's Idle Shaking," *SAE Technical Papers*, 2013-01-1711.
- [15] V. A. J. Britto, E. Loganathan, S. Sadasivam, K. Hatti and S. Sankaranarayana, "Methodology of Steering Assembly Development for NVH for Medium and Heavy Commercial Vehicle," *SAE Technical Papers*, 2013-01-2351.
- [16] J. Chatterjee, Y. K. Vaddi and C. P. Jain, "Design for Improvement in Steering Vibration Performance in a Passenger Vehicle," *SAE Technical Paper*, 2017-01-0439.
- [17] ISO 8727, *International Organisation for Standardization, Vibrations et chocs mécaniques — Exposition de l'individu — Systèmes de coordonnées biodynamiques*, 1997.
- [18] R. G. Dong, E. W. Sinsel, D. E. Welcome, C. Warren, X. S. Xu, T. W. McDowell and J. Z. Wu, "Review and Evaluation of Hand-Arm Coordinate Systems for Measuring Vibration Exposure, Biodynamic Responses, and Hand Forces," *Safety and Health at Work*, Vols. 6, Issue 3, pp. 159-173, 2015.

- [19] ISO 15230, *International Organisation for Standardization, Vibrations et chocs mécaniques — Forces de couplage à l'interface homme-machine en cas de vibrations transmises par les mains*, 2007.
- [20] M. Eksioglu and K. Kızılaslan, "Steering-wheel grip force characteristics of drivers as a function of gender, speed, and road condition," *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 38, no. Issue 3-4, p. 354–361, 2008.
- [21] A. Garinei and R. Marsili, "Development of a new capacitive matrix for a steering wheel's pressure distribution measurement," *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 44, no. Issue 1, pp. 114-119, 2014.
- [22] L. B. R. Lundstrom, "Mechanical impedance of the human hand-arm system," *International Journal of Industrial Ergonomics*, 3, pp. 235-242, 1989.
- [23] R. Gurram, S. Rakheja and G. Gouw, "Mechanical impedance of the human hand-arm system subject to sinusoidal and stochastic excitations," *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vols. 16, Issue 2, pp. 135-145, 1995.
- [24] Y. Aldien, P. Marcotte, S. Rakheja and P. E. Boileau, "Mechanical Impedance and Absorbed Power of Hand-Arm under xh–Axis Vibration and Role of Hand Forces and Posture," *Industrial Health*, vol. 43(3), p. 495–508, 2005.
- [25] Y. Aldien, P. Marcotte, S. Rakheja and P. Boileau, "Influence of hand–arm posture on biodynamic response of the human hand–arm exposed to zh-axis vibration," *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vols. 36, Issue 1, pp. 45-59, 2006.
- [26] E. Concettoni and M. Griffin, "The apparent mass and mechanical impedance of the hand and the transmission of vibration to the fingers, hand and arm," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 325, no. Issue 3, pp. 664-678, 2009.
- [27] S. Adewusi, S. Rakheja, P. Marcotte and P. Boileau, "On the discrepancies in the reported human hand– arm impedance at higher frequencies," *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vols. 38, Issues 9-10, p. 703– 714, 2008.

- [28] P. Marcotte, J. Boutin, S. A. Adewusi and S. Rakheja, "Vibration transmissibility characteristics of the human hand-arm system under different postures, hand forces and excitation levels," *Journal of sound and vibration*, vol. 329, no. 14, pp. 2953-2971, 2010.
- [29] R. G. Dong, T. W. McDowell and D. E. Welcome, "Biodynamic Response at the Palm of the Human Hand Subjected to a Random Vibration," *Industrial Health*, vol. 43(1), p. 241–255, 2005.
- [30] R. Lundstrom and L. Burstrom, "Mechanical impedance of the human hand-arm system," *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vols. 3, Issue 3, pp. 235-242, 1989.
- [31] J. W. Mishoe and C. W. Suggs, "Hand-arm vibration partie II : vibrational responses of the human hand," *Journal of sound and vibration*, vol. 53(4), pp. 545-558, 1977.
- [32] L. Burstrom and A. Sorensson, "The influence of shock-type vibrations on the absorption of mechanical energy in the hand and arm," *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 23, no. Issue 5-6, pp. 585-594, 1999.
- [33] ISO 10068, *International Organisation for Standardization, Mechanical vibration and shock — Mechanical impedance of the human hand-arm system at the driving point*, 2012.
- [34] M. J. Griffin, *Handbook of Human Vibration*, San Diego: Academic Press, 1990.
- [35] D. D. Reynolds and W. Soedel, "Dynamic response of the hand-arm system to a sinusoidal input," *Journal of sound and vibration*, vol. Volume 21, no. Issue 3, pp. 339-353, 1972.
- [36] D. D. Reynolds and R. Falkenberg, "A study of hand vibration on chipping and grinding operators, part II : four-degree-of-freedom lumped parameter model of the vibration response of the human hand," *Journal of sound and vibration*, vol. Volume 95, no. Issue 4, pp. 499-514, 1984.

- [37] L. A. Wood, C. ... W. Suggs and C. F. Abram Jr, "Hand-arm vibration part III : a distributed parameter dynamic model of human hand-arm system," *Journal of sound and vibration* , vol. 57(2), pp. 157-169, 1978.
- [38] S. Adewusi, S. Rakheja and P. Marcotte, "Biomechanical models of the human hand-arm to simulate distributed biodynamic responses for different postures," *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vols. 42, Issue 2, pp. 249-260, 2012.
- [39] R. G. Dong, J. H. Dong, J. Z. Wu and S. Rakheja, "Modeling of biodynamic responses distributed at the fingers and the palm of the human hand–arm system," *Journal of Biomechanics*, Vols. 40, Issue 10, p. 2335–2340, 2007.
- [40] M. W. Dobry and T. Hermann, "A comparison of the human physical models based on the distribution of power in a dynamic structure in the case of hand-arm vibrations," *Journal of theoretical and applied mechanics*, vol. 53(1), pp. 3-13, 2015.
- [41] R. G. Dong, D. E. Welcome, T. W. McDowell and J. Z. Wu, "Methods for deriving a representative biodynamic response of the hand–arm system to vibration," *Journal of sound and vibration*, Vols. 325, Issue 4-5, p. 1047–1061, 2009.
- [42] R. G. Dong, D. E. Welcome, T. W. McDowell and J. Z. Wu, "Theoretical foundation, methods, and criteria for calibrating human vibration models using frequency response functions," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 356, p. 195–216, 2015.
- [43] M. Ajovalasit, "Effect of Fuel Content on the Human Perception of Engine Idle Irregularity. PhD thesis, University of Sheffield.," 2006.
- [44] S. J. Bolanowski, G. A. Gescheider, R. T. Verrillo and C. M. Checkosky, "Four channels mediate the mechanical aspects of touch," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 84(5), pp. 1680-1694, 1988.
- [45] G. A. Gescheider, K. E. Hoffman, M. A. Harrison, M. L. Travis and S. J. Bolanowski, "The effects of masking on vibrotactile temporal summation in the detection of sinusoidal and

- noise signals," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 95(2), pp. 1006-1016, 1994.
- [46] J. Zwislocki, "Theory of Temporal Auditory Summation," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 32, pp. 1046-1060, 1960.
- [47] G. Gescheider, S. Bolanowski and R. Verrillo, "Some characteristics of tactile channels," *Behavioural Brain Research* 148, pp. 35-40, 2004.
- [48] M. J. Griffin, "Frequency dependence of Psychophysical and Physiological Responses to Hand-transmitted Vibration," *Industrial Health*, vol. 50, no. 5, pp. 354-369, 2012.
- [49] D. D. Reynolds, K. G. Standlee and E. N. Angevine, "Hand-arm vibration, part III : subjective response characteristics of individuals to hand-induced vibration," *Journal of Sound and Vibration*, 51(2), pp. 267-282, 1977.
- [50] M. Morioka and M. J. Griffin, "Magnitude-dependence of equivalent comfort contours for fore-and-aft, lateral and vertical hand-transmitted vibration," *Journal of Sound and Vibration*, Vols. 295, Issue 3-5, p. 633-648, 2006.
- [51] T. Miwa, "Evaluation methods for vibration effect, part 3. Measurements of threshold and equal sensation contours on hand for vertical and horizontal sinusoidal vibrations," *Industrial Health*, pp. 213-220, 1967.
- [52] R. T. Verrillo, A. J. Fraioli and A. J. Smith, "Sensation magnitude of vibrotactile stimuli," *Perception & Psychophysics*, vol. 6, pp. 366-372, 1969.
- [53] ISO 5349, *International Organisation for Standardization, Mechanical vibration - Measurement and evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration*, 2001.
- [54] S. Amman, R. Meier, K. Trost and F. Gu, "Equal annoyance contours for steering wheel hand-arm vibration," *SAE Technical paper*, 2005-01-2473.

- [55] M. Morioka and M. J. Griffin, "Equivalent comfort contours for vertical vibration of steering wheels : effect of vibration magnitude, grip force, and hand position.," *Applied Ergonomics*, vol. 40, no. Issue 5, pp. 817-825, 2009.
- [56] S. S. Stevens, "On the psychophysical law," *Psychological review*, vol. 64(3), pp. 153-181, 1957.
- [57] H. R. Moskowitz, "Magnitude estimation : notes on what, how, when, and why to use it," *Journal of food quality*, vol. 3, pp. 195-227, 1977.
- [58] ISO 11056, *International Organisation for Standardization, Sensory analysis — Methodology — Magnitude estimation method*, 1999.
- [59] J. Giacomini and Y. Woo, "Steering system vibration information and perception enhancement," *ATZ Worldwide*, vol. 107, no. Issue 5, pp. 15-17, 2005.
- [60] J. Giacomini and S. Gnanasekaran, "Driver estimation of steering wheel vibration intensity : questionnaire-based survey," *Engineering Integrity*, vol. 18, pp. 23-29, 2005.
- [61] W. Yoo, S. Na and M. Kim, "Relationship between subjective and objective evaluations of steering wheel vibration," *Journal of mechanical science and technology*, vol. 25(7), pp. 1695-1701, 2011.
- [62] J. Giacomini and O. Abrahams, "Human Fatigue Due to Automobile Steering Wheel Vibration," The University of Sheffield, 2000.
- [63] J. Giacomini, M. Shayaa, E. Dormegnien and E. Richard, "Frequency weighting for the evaluation of steering wheel rotational vibration," *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 33, no. Issue 6, p. 527–541, 2004.
- [64] M. Shayaa, J. Giacomini, D. E. and L. Richard, "Human perception of sinusoidal rotational steering wheel vibration," in *36th United Kingdom Group Meeting on Human Responses to Vibration*, Farnborough, UK, 2001.

- [65] S. Gnanasekaran, A. M. and J. Giacomini, "Driver estimation of steering wheel vibration intensity: laboratory-based tests," *Engineering Integrity*, vol. 20, pp. 25-31, 2006.
- [66] M. Ajovalasit and J. Giacomini, "Non-linear dependency of the subjective perceived intensity of steering wheel rotational vibration," *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 39, no. Issue 1, p. 58–67, 2009.
- [67] B.-h. Jeon, M. Ajovalasit and J. Giacomini, "Effects of gender differences on the subjective perceived intensity of steering wheel rotational vibration based on a multivariate regression model," *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 39, no. Issue 5, p. 736–743, September 2009.
- [68] M. Kolich, "Predicting automobile seat comfort using a neural network," *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 33, no. Issue 4, p. 285–293, 2004.
- [69] L. Burstrom, "The influence of biodynamic factors on the absorption of vibration energy in the human hand and arm," *Nagoya journal of medical science*, vol. 57, no. (3-4), pp. 159 - 167, 1994.
- [70] N. Seo and T. J. Armstrong, "Investigation of Grip Force, Normal Force, Contact Area, Hand Size, and Handle Size for Cylindrical Handles," *Human Factors and Ergonomics Society*, vol. 50, no. 5, p. 734–744, 2008.
- [71] B. Efron and T. Tibshirani, *An introduction to the bootstrap*, vol. Monographs on Statistics and Applied Probability 57, United Kingdom: CHAPMAN & HALL/CRC, 1993.
- [72] M. Florentine, A. N. Pooper and R. R. Fay, *Loudness*, Springer Handbook of Auditory Research 37, 2010.
- [73] R. Teghtsoonian, "On the exponent in Stevens' law and the constant in Ekman's law," *Psychological Review*, vol. 78, no. 1, pp. 71-80, 1971.
- [74] R. Teghtsoonian, "Range effects in psychophysical scaling and a revision of Stevens' law," *American Journal of Psychology*, vol. 86, no. 1, pp. 3-27, 1973.

- [75] R. Teghtsoonian and M. Teghtsoonian, "Range and regression effects in magnitude scaling," *Perception & Psychophysics*, vol. 24(4), pp. 305-314, 1978.
- [76] J. Marozeau, M. Epstein, M. Florentine and B. Daley, "A test of the Binaural Equal-Loudness-Ratio hypothesis for tones," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 120(6), p. 3870–3877, 2006.
- [77] L. Laroche, D. Piranda, E. Parizet and F. Bornet, "Multi-excitation discomfort in a driving car: contribution from sound and vibrations," in *Forum Acusticum*, Lyon, France, Dec 2020.
- [78] C. e. R. N. Bazley, "Patterns of Discomfort 5, no 1 (2015).," *Journal of Ergonomics*, p. n°1, 2015.
- [79] N. J. Mansfield, Human response to vibration, Boca Raton London New York Washington, D.C.: CRC PRESS, 2005.
- [80] G. Aghilone and M. Cavacece, "Analysis of Driving–Point Mechanical Impedance of the Human Hand Arm System," *Progress in Vibration and Acoustics*, vol. 1, no. Issue 2, pp. 1-20, 2013.
- [81] R. Gurram, S. Rakheja and A. J. Brammer, "Driving-point mechanical impedance of the human hand-arm system : synthesis and model development," *Journal of sound and vibration*, vol. 180(3), pp. 437-458, 1995.



FOLIO ADMINISTRATIF

THESE DE L'UNIVERSITE DE LYON OPEREE AU SEIN DE L'INSA LYON

NOM : LAROCHE

DATE de SOUTENANCE : 09/11/2021

Prénoms : Luc, Albert, Georges

TITRE : Caractérisation de l'inconfort induit par les vibrations d'un volant automobile sous la sollicitation du groupe motopropulseur

NATURE : Doctorat

Numéro d'ordre : AAAALYSEIXXXX

Ecole doctorale : Mécanique, Énergétique, Génie civil, Acoustique (MEGA) N°162

Spécialité : Acoustique

RESUME :

Du fait des avancées technologiques dans le domaine du transport et de l'augmentation globale du confort, les constructeurs automobiles cherchent à transformer l'acte de conduite en expérience interactive et sensorielle. Parmi les différentes interactions entre le conducteur et le véhicule, les vibrations transmises par le volant figurent dans les premières sources de stimulation vibratoire. L'objectif des constructeurs automobiles est donc multiple : caractériser la source vibratoire, travailler sur son atténuation et évaluer son influence en terme de confort. Dans la littérature, l'inconfort généré par les vibrations dues à une déformation de la route ou un problème d'équilibrage des roues a largement été traité. En revanche, il existe peu d'information sur l'inconfort généré par les vibrations du moteur. Cette thèse cherche donc à caractériser l'inconfort induit par les vibrations du volant automobile selon deux thématiques : le couplage mécanique entre le conducteur et le volant et les paramètres d'influence de ces vibrations sur l'inconfort. Ce manuscrit synthétise les travaux réalisés au cours de cette thèse, proposant des solutions afin d'améliorer l'estimation des vibrations à l'interface conducteur/véhicule et leurs influences sur la sensation produite. Des perspectives de recherche sont également décrites afin de résoudre certaines problématiques mises en évidence dans la thèse. L'ensemble des travaux présentés ont été réalisés au sein du centre technique Belchamp du Groupe Stellantis et sur les installations du Laboratoire Vibration et Acoustique de l'INSA de Lyon. Cette thèse s'inscrit dans une collaboration entre le Groupe Stellantis et le Laboratoire Vibration Acoustique sous la forme d'une thèse Cifre de l'école doctorale MEGA (ED 162). L'encadrement a été réalisé par Etienne Parizet (professeur du Laboratoire Vibration et Acoustique de l'INSA de Lyon) et par Frédéric Bomet (Ingénieur du Groupe Stellantis).

MOTS-CLÉS : Acoustique, Vibration, Automobile, Perception, Couplage mécanique, système de direction

Laboratoire (s) de recherche : Laboratoire Vibration Acoustique (LVA)

Directeur de thèse: Etienne Parizet

Président de jury :

Composition du jury :

Chiementin, Xavier, Maître de conférence HDR, URCA Reims  
Marcotte, Pierre, Associate Professor, IRRST Montréal  
Meunier, Sabine, Chargée de Recherche HDR, LMA Marseille  
Totaro, Nicolas, Professeur des universités, INSA Lyon  
Hamzaoui, Nacer, Professeur des universités, INSA Lyon  
Parizet, Etienne, Professeur, INSA de Lyon  
Bomet, Frédéric, Ingénieur du Groupe Stellantis

Rapporteur  
Rapporteur  
Examinatrice  
Examinateur  
Examinateur  
Examinateur  
Invité