



**HAL**  
open science

# Effet de masquage fréquentiel dans les vibrations du corps pour un sujet assis

Carmen Rosa Hernandez Yanez

► **To cite this version:**

Carmen Rosa Hernandez Yanez. Effet de masquage fréquentiel dans les vibrations du corps pour un sujet assis. Autre. INSA de Lyon, 2012. Français. NNT : 2012ISAL0075 . tel-00838762

**HAL Id: tel-00838762**

**<https://theses.hal.science/tel-00838762>**

Submitted on 26 Jun 2013

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

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

# THÈSE

Effet de masquage fréquentiel dans les vibrations du corps pour un sujet assis  
*présentée devant*

L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES DE LYON

Pour obtenir le grade de

## Docteur

École doctorale : Mécanique, Énergétique, Génie Civil, et Acoustique (MEGA)

Spécialité : Vibrations et Acoustique

*par*

**Carmen Rosa HERNANDEZ YANEZ**

Soutenue le 6 septembre 2012 devant la commission d'examen

HAMZAOUI Nacer	Professeur (LVA, INSA de Lyon)	Examineur
MEUNIER Sabine	CR-HDR (LMA, Marseille)	Rapporteur
PARIZET Etienne	Professeur (LVA, INSA de Lyon)	Directeur
SIMON Laurent	Professeur (LAUM, Le Mans)	Examineur
WEBER Reinhard	Professeur (Carl von Ossietzky University, Oldenburg)	Rapporteur



# Remerciements

# Résumé

Dans les sociétés industrialisées, les humains sont exposés à multiples sources de mouvements vibratoires. La posture assise est la position du corps la plus fréquente lorsqu'il est exposé à ce type de stimulus. Dans nombreux cas les stimuli vibratoires proviennent de la combinaison de diverses sources et directions.

Jusqu'à présent, l'analyse de l'effet des stimuli vibratoire dans son ensemble a été bien développée, plus précisément en ce qui concerne le seuil de perception. Au cours des dernières années, diverses études ont analysé l'influence de certains facteurs impliqués, tels que la position du corps, les surfaces d'appui pour les mains, la tête et le dos, les méthodes psychophysiques de mesure et les stimuli. Cependant, l'effet d'une des composantes du stimulus sur la perception d'autres composants a été rarement rapporté.

Dans ce cas, très peu d'information a été trouvée dans la littérature. Dans les deux études trouvées, le seuil absolu a été réévalué en considérant un second signal sinusoïdal. La valeur du seuil était plus élevée que ce qui a été estimé avec le stimulus simple. L'augmentation du seuil a été attribuée à l'effet de masquage. Basé sur ces observations, cette étude examine l'existence de l'effet de masquage dans les vibrations vertical du corps entière, plus précisément à la position assise.

Afin d'examiner l'effet de masquage, la différence entre le seuil absolu et le seuil masqué est nécessaire. Deux types de stimuli ont été utilisés : le stimulus masquage et le stimulus de test. Le masque est un signal de bruit à bande étroite entre 10 et 20 Hz, à trois niveaux d'amplitude différents. La sélection du stimulus de masque a été basée sur le modèle de masquage largement étudié dans certains domaines tels que l'acoustique, le domaine visuel et vibrotactile. Le stimulus de test est un signal sinusoïdale d'amplitude modulée à six fréquences différentes (30, 35, 40, 50, 60, 80 Hz).

L'effet de la fréquence sur le seuil absolu estimé est similaire à ce qui a été indiqué par d'autres études, cependant, la comparaison explicite de ces bases de données n'est pas possible. Les différences trouvées peuvent être attribuées à des divergences par rapport à la posture du corps et des éléments de soutien ainsi qu'à l'utilisation de différentes méthodes psychophysiques. Sachant que la vibration du corps peut être détectée grâce à le sens de la vision, l'audition et le système vestibulaire, d'autres aspects tels que la durée du stimulus, les différents systèmes de génération de mouvement vibratoire, les groupes de sujets et les conditions de test, pourrait également influencer sur la valeur finale du seuil.

La détection du stimulus en présence du signal de masquage a été empêchée. Par conséquent, il est certainement clair que le phénomène de masquage a eu lieu. Les valeurs des seuils masqués étaient considérablement plus élevées que ceux correspondant aux seuils absolus. Le seuil décroît en fonction de la fréquence de test et l'effet de masque est plus important à haute qu'à faible niveau d'intensité du masque.

En raison de la variation du niveau globale d'énergie due à la présentation simultanée des deux stimuli, la différence à peine perceptible du signal de masque a été estimée. À partir de cette valeur, le niveau d'énergie minimum attendu au démasquage a été déterminé. En comparant les niveaux d'énergies attendus et rapportés, des légères différences ont été observées. Le démasquage est lié à l'écart entre les fréquences des signaux masquant et de test. Lorsque l'écart est faible, prévaut la reconnaissance de l'augmentation de l'intensité globale d'énergie. Si l'écart augmente, la discrimination des signaux prédomine.

*Mots-clés* : effet de masquage, vibrations du corps entier, seuil absolu, seuil masqué, différence à peine perceptible.

# Abstract

In industrialized societies, humans are exposed to multiple sources of vibratory motions. The sitting posture is the most frequent position of the body when exposed to this type of stimulus. In many cases the vibratory stimuli comes from the combination of various sources and directions.

To date, the analyses of the impact of vibratory stimuli as a whole have been well developed, more precisely with respect to perception threshold. Along recent years various studies have been analyzed the influence of some factors involved, such as body position, the support surfaces for the hands, head, and back; the psychophysical measurement methods and the stimuli. However, the effect of one component of the stimulus in to perception of other components has been rarely reported.

In this case, little information was found in the literature. In two studies found, the absolute threshold was revalued by integrating a second sinusoidal signal. The threshold value was higher that which has been estimated with the simple stimulus. The increase of threshold has been attributed to a masking effect. Based on these remarks, this study investigates the existence of masking effect for vertical whole body vibration, in particular to sitting position.

To examine the masking effect, the difference between absolute and masked thresholds is required. Two types of stimuli have been used: the masking and the test stimulus. The masker is a narrow-band noise from 10 to 20 Hz



at three different magnitude levels. The selection of mask stimulus was based on the masking model widely studied in acoustic, visual and vibrotactile areas. The test stimulus is a sinusoidal modulated amplitude signal at six different frequencies (30, 35, 40, 50, 60, 80 Hz).

The frequency dependence of the absolute threshold estimated is similar to the results presented in other studies; however, explicit comparison to this database is not possible. Disagreement can be attributed to differences in body posture and body support elements and the use of different psychophysical methods. Since the whole body vibration can be detected by vision, hearing and vestibular senses, other aspects such as the duration of the stimulus, different systems for vibratory movement generation, groups of subjects and the test environment, could also influence the final thresholds values.

The stimulus detection in the presence of the masking signal has been prevented. Therefore, it is certainly clear that the masking phenomenon occurred. The masked thresholds values were considerably higher than those absolute thresholds. The threshold decreases as a function of test frequency and the mask effect is more important at high than at low intensity masker levels.

Due to the variation in the overall level energy arising from the simultaneous presentation of two stimuli, the just noticeable difference of the masker has been estimated. From this value, the minimum energy level expected at unmasking was determinate. When comparing the expected energy level for detection with the value reported, it was observed slight differences. The unmasking is related to the difference between the mask

and test signals frequencies. When the difference is small, the recognition of the increase in the overall energy intensity predominates. However, if the difference increases, then the discrimination of signals is dominant.

*Keywords:* masking effect, whole body vibration, absolute threshold, masked threshold, just noticeable difference.

# Table des Matières

Chapitre 1.Introduction .....	1
1.1 Contexte et problématique .....	1
1.2 Motivation et objectifs .....	4
1.3 Structure de la thèse .....	6
Chapitre 2.Revue des notions fondamentales.....	9
2.1 Introduction.....	9
2.2 Physiologie de la perception vibratoire.....	10
2.3 Réponse du corps aux vibrations .....	14
2.4 L'évaluation sensorielle : notion de seuil.....	20
2.5 Mesure de seuil : Les procédures psychophysiques.....	21
2.6 Vibration du corps entier .....	25
2.6.1 Vibrations du corps entier de personnes debout .....	27
2.6.2 Vibrations du corps entier de personnes couchées.....	31
2.6.3 Vibrations du corps entier des personnes assises.....	32
2.6.4 Seuil absolu de perception vibratoire.....	35
2.6.5 Seuil masqué de perception vibratoire .....	40
2.7 Conclusions du chapitre.....	47

Chapitre 3. Dispositif Expérimental .....	49
3.1. Introduction.....	49
3.2. Le banc d'essais .....	50
3.2.1 Génération du mouvement vibratoire.....	52
3.2.2 Génération des signaux et d'acquisition de données .....	53
3.2.3 La vibration et le bruit de fond.....	53
3.2.4 Vibrations dans les axes x, y et z. ....	57
3.2.5 Procédure d'acquisition et traitement des données. ....	62
3.2.6 Position des sujets lors des tests.....	63
3.3. Procédures psychophysiques.....	65
3.3.1 Procédure psychophysique I .....	65
3.3.2 Procédure psychophysique II.....	70
3.4. Analyse statistique des données .....	75
3.5. Conclusions du chapitre .....	76
Chapitre 4. Seuil absolu de perception vibratoire.....	77
4.1. Introduction.....	77
4.2. Mesure du seuil absolu de perception. Description des expériences. 78	
4.2.1 Description des stimuli.....	79
4.2.2 Procédure psychophysique I .....	84
4.2.3 Procédure psychophysique II.....	86
4.3. Présentation des résultats .....	88
4.3.1 Procédure psychophysique I. ....	88

4.3.2	Procédure psychophysique II.....	93
4.4.	Discussion des résultats .....	100
4.4.1	Influence de la modulation.....	102
4.4.2	Influence de la procédure psychophysique. ....	102
4.4.3	Seuil absolu de perception : Procédure I.....	104
4.4.4	Seuil absolu de perception ; Procédure II. ....	105
4.5.	Conclusions du chapitre.....	105
Chapitre 5.Seuil masqué de perception.....		107
5.1	Introduction.....	107
5.2	Masquage : Influence de la fréquence du signal de test.....	109
5.2.1	Procédure expérimentale.....	109
5.2.2	Résultats.....	112
5.3	Masquage : Influence du niveau du signal masquant.....	117
5.4	Différence de niveau à peine perceptible. ....	120
5.5	Discussion des résultats. ....	125
5.6	Conclusions du chapitre.....	140
Chapitre 6.Conclusions Générales .....		143
6.1	Introduction.....	143
6.2	Synthèse .....	143
6.3	Remarques de conclusion .....	146
6.4	Perspectives .....	152
Références.....		151

# Liste des Figures

Figure 2.1 Systèmes sensoriels liés à la perception vibratoire. ....	10
Figure 2.2 Disposition des différents types de récepteurs sensoriels dans la peau glabre et la peau velue. Adaptée de [PR 04]. ....	13
Figure 2.3 La masse apparente (le module [Kg]) et la transmissibilité du siège (le module [ $\text{rad/s}^2/\text{m/s}^2$ ]) vers le bassin, posture dénommée stricte. Adaptée de [MG 02b]. ....	17
Figure 2.4 Fonction psychométrique. Adaptée de [BEL 02]. ....	24
Figure 2.5 Système de coordonnées pour l'évaluation de l'influence des vibrations mécaniques sur le corps humaine. Adaptée de [GRI 90]. ....	26
Figure 2.6 Système de coordonnées basicentrique. Adaptée de [GRI 90]. ..	27
Figure 2.7 Seuils de perception vibratoire pour des sujets debout (orientation verticale). ....	28
Figure 2.8 Le seuil de perception vibratoire horizontal pour des personnes debout. [GRI 90]. ....	30
Figure 2.9 Les seuils de perception vibratoire verticale pour des personnes couchées. [GRI 90]. ....	31
Figure 2.10 Les seuils de perception vibratoire horizontale pour des personnes couchées. [GRI 90]. ....	32
Figure 2.11 Le seuil de perception vibratoire horizontale pour des personnes assises. [GRI 90]. ....	33

Figure 2.12 Seuil de perception absolu des vibrations verticales de sujets assis. L'information est basée sur des illustrations de [BEL 02], [LWA 07] et [MG 08].	35
Figure 2.13 Perception des stimuli simples. Adaptée de [LOU 70].	42
Figure 2.14 Seuil de perception et claire perception de la composante secondaire. Adaptée de [LOU 70].	42
Figure 2.15 Seuil de perception absolu (études I et II). Adaptée de [LWA 07].	44
Figure 2.16 Composants de base et de test. Adaptée de [LWA 07].	45
Figure 3.1 Composants principaux du banc d'essais.	51
Figure 3.2 Niveau de vibration résiduelle du banc d'essais.	54
Figure 3.3 Niveau de pression acoustique de l'environnement.	56
Figure 3.4 Système de coordonnées et positionnements des accéléromètres.	57
Figure 3.5 Niveaux d'accélération en la direction verticale (axe z) et horizontale (axes x,y).	58
Figure 3.6 Vue inférieure de la surface du siège du banc d'essais.	59
Figure 3.7 Niveaux d'accélération en direction verticale aux positions I-IV.	60
Figure 3.8 Niveaux d'accélération en direction verticale aux positions 1, 2 et 3.	61
Figure 3.9 Dispositifs d'acquisition et de traitement des données.	62
Figure 3.10 Position des sujets lors des essais.	64

Figure 3.11 Développement typique avec la méthode PEST (escalier double). Adaptée de [BON 86].	67
Figure 3.12 Développement typique avec les méthodes Up-Down et 1Up-3Down.	72
Figure 4.1 Exemple du spectre des signaux masquant et de test.	80
Figure 4.2 Représentation des signaux de masque et de test dans l'espace temporel.	80
Figure 4.3 Exemple de la superposition (dans l'espace temporel) des signaux de test et de masque.	81
Figure 4.4 Exemple du signal de test modulé en amplitude.	82
Figure 4.5 Interface visuelle de la Procédure I.	85
Figure 4.6 Interface visuel de la Procédure II.	87
Figure 4.7 Développement typique des expériences en utilisant la procédure I.	89
Figure 4.8 Seuil absolu de perception estimé pour des sujets sélectionnés.	90
Figure 4.9 Seuil absolu de perception (la médiane et l'intervalle interquartile (25-75 percentiles)) estimé pour les trois groupes de test.	91
Figure 4.10 Les valeurs individuelles, médiane et l'intervalle interquartile (25-75 percentiles) du seuil absolu de perception.	92
Figure 4.11 Développement typique des expériences en utilisant la procédure II (premier partie).	94
Figure 4.12 Tendances des tests en utilisant la procédure II (premier partie).	96



Figure 4.13 Les valeurs individuelles, médiane et l'intervalle interquartile (25-75 percentiles) du seuil absolu de perception en utilisant la procédure II, premier partie. ....	97
Figure 4.14 Les valeurs individuelles, médiane et l'intervalle interquartile (25-75 percentiles) du seuil absolu de perception (35 Hz), en utilisant la procédure II, deuxième partie. ....	100
Figure 4.15 La médiane du seuil absolu de perception estimé avec les procédures I et II. ....	101
Figure 5.1 Interface visuelle des études I, II et III. ....	111
Figure 5.2 Développement typique des expériences, étude I. ....	112
Figure 5.3 Les valeurs individuelles et la médiane du seuil masqué de perception, étude I. ....	113
Figure 5.4 Les valeurs individuelles, médiane et intervalle interquartile (25-75 percentiles) du seuil masqué de perception, étude I. ....	114
Figure 5.5 La médiane et l'intervalle interquartile (25-75 percentiles) du seuil masqué, étude I. ....	116
Figure 5.6 Les valeurs individuelles, la médiane et l'intervalle interquartile (25-75 percentiles) du seuil masqué de perception, étude II. ....	119
Figure 5.7 La médiane et l'intervalle interquartile (25-75 percentiles) du seuil masqué, étude II. ....	120
Figure 5.8 Développement typique des expériences, étude III (référence à 110 dB). ....	124
Figure 5.9 Les valeurs individuelles, médiane et l'intervalle interquartile (25-75 percentiles) de la différence absolue à peine perceptible, étude III. ....	124

Figure 5.10 Changement de niveau d'énergie au long de test de mesure du seuil masqué.....	127
Figure 5.11 Énergies perçues et attendues en fonction de la fréquence de test .....	129
Figure 5.12 Énergies perçues et attendues en fonction de la fréquence de test, masque à 110 dB (la médiane et l'intervalle interquartile (25-75 percentiles)).....	130
Figure 5.13 Énergies perçues et attendues en fonction du niveau de masquage.....	131
Figure 5.14 Énergies perçues et attendues en fonction du niveau de masquage, signal de test à 35 Hz (la médiane et l'intervalle interquartile (25-75 percentiles)).....	132
Figure 5.15 L'accélération pondérée du signal masquant.....	137
Figure 5.16 Energie totale (masque (à 110 dB)+seuil masqué) pondérée et non pondérée.....	137
Figure 5.17 Seuils de perception pondérés et non pondérés. ....	138

## Liste des Tables

Tableau 2.1 Fréquences de résonance du corps humain, [BEL 02] .....	19
Tableau 4.1 Caractéristiques anthropométriques des participants .....	84
Tableau 4.2 Différences de seuil absolu [dB] en utilisant la procédure II. ...	98



# Chapitre 1.

## Introduction

1.1	Contexte et problématique.....	1
1.2	Motivation et objectifs.....	4
1.3	Structure de la thèse.....	6

### **1.1 Contexte et problématique**

Dans les sociétés industrialisées, les humains sont exposés à de multiples sources de mouvements vibratoires. Par exemple, les conducteurs et les passagers d'un véhicule peuvent percevoir les vibrations provenant de celui-ci. Le passage des différents moyens de transport peut induire un mouvement vibratoire dans les bâtiments perceptible par les occupants. Par contre, on observe dans l'industrie du divertissement une utilisation volontaire de la vibration. Par exemple, dans des jeux vidéo ont été incorporés certains accessoires « vibratoires » tels que les sièges de simulation, des volants et des manettes afin de rendre l'expérience plus dynamique et plus réaliste.

Dans la plupart des ces cas, les stimuli vibratoires sont divers et complexes. Souvent, le stimulus provient de la combinaison de sources et de directions diverses.

Lors de la vie quotidienne, certaines activités favorisent l'exposition vibratoire, tel est le cas des conducteurs, des travailleurs industriels ou des utilisateurs des transports de manière générale. La posture assise est la position la plus fréquente du corps lorsqu'il est exposé à ce type de stimulus.

Les déplacements des surfaces de support peuvent conduire à des mouvements relatifs entre les diverses parties du corps, même si le mouvement est développé dans une direction unique.

Le corps peut être exposé à plusieurs stimuli vibratoires dans la même direction. Pourtant, il est possible de penser à ces stimuli comme la résultante de diverses composantes. Chaque composante apporte au mouvement général un certain niveau d'énergie en fonction du type de signal. L'effet de chacune des composantes n'est pas évident, surtout si l'on considère que l'effet de chaque signal peut influencer les autres.

Jusqu'à présent, l'analyse de l'effet des stimuli vibratoire dans son ensemble a été bien développée, notamment le seuil de détection, l'évaluation de l'intensité subjective et certains indicateurs (par exemple les courbes de pondérations recommandées par diverses organismes internationales de normalisation).

Du point de vue de la perception, la réponse du corps à un stimulus vibratoire dans son ensemble a été bien étudiée, plus précisément en ce qui concerne le seuil de perception ([MCK 72], [PG 88], [BEL 02], [MG 08]). Cependant, l'effet d'une des composantes du stimulus sur la perception d'autres composants a été rarement rapporté. Dans ce cas, Louda [LOU 70] et Ljunggren et al. [LWA 07] constituent les seules références disponibles à ce jour (analysés plus précisément au deuxième chapitre, section 2.6.5). Dans les deux études, ils ont d'abord estimé le seuil de perception d'un stimulus unique (ou simple) de type sinusoïdal. Puis, le seuil a été réévalué en intégrant un deuxième signal, également de type sinusoïdal.

Malgré des conditions d'études différents, [LOU 70] et [LWA 07] ont observé les mêmes effets sur le seuil. D'une part, ils ont trouvé qu'à certaines fréquences, la valeur du seuil était inférieure à ce qui avait été estimé uniquement avec le stimulus simple. Dans ces cas, apparemment l'ajout du deuxième signal a favorisé la perception du stimulus simple. L'effet de combiner les deux signaux probablement a conduit à un mouvement de "battant". Les deux études ([LOU 70] et [LWA 07]) ont attribué la diminution du seuil de perception à l'effet conjugué des deux signaux sinusoïdaux, ce qui fournit des repères supplémentaires.

Le deuxième effet trouvé était l'inverse du premier, c'est-à-dire que la valeur du seuil était supérieure à ce qui avait été estimé avec le stimulus simple. [LOU 70] et [LWA 07] ont attribué l'augmentation du seuil à l'effet de masquage, c'est-à-dire que le second signal aurait probablement empêché la perception du stimulus simple.

Le phénomène de masquage a été défini comme la condition dans laquelle la perception d'un stimulus normalement détectable est empêchée par un autre stimulus [GRI 90]. Ce phénomène a été largement étudié dans d'autres domaines tels que l'acoustique, la communication visuelle et la communication vibrotactile. En ce qui concerne ce dernier, l'effet de masquage a été analysé en profondeur, au niveau de la relation spatiale et temporelle des stimuli, de l'intensité de masque et du type de stimulus masquant. La compréhension du phénomène de masquage a beaucoup progressé grâce aux nombreuses études dans le domaine vibrotactile.

Il existe des différences évidentes entre la vibration du corps entier et la vibration à la main (vibrotactile). Par conséquent, les observations effectuées dans le cas de la vibration à la main ne peuvent pas être étendues

à la vibration du corps entier. Cependant, elles nous apportent quelques aspects généraux qui peuvent aider à identifier les facteurs principaux impliqués dans le phénomène de masquage.

L'incidence du masquage sur le degré de confort, son influence sur les activités quotidiennes et l'atteinte à la santé ne sont pas connus. Cependant, une meilleure connaissance du phénomène de masquage, son effet sur la perception et par conséquent sur la réponse humaine aux vibrations est un avantage conséquent. A partir de ces connaissances, il est possible de fixer des limites ou/et d'établir des régulations afin de minimiser le risque d'exposition aux vibrations excessives et donc, d'améliorer la qualité de vie des humains dans les sociétés industrialisées.

## **1.2 Motivation et objectifs**

La sensibilisation à l'incidence sur la santé de certaines conditions d'exposition vibratoire dans le quotidien ou sur le lieu de travail favorise la conduite d'études et l'identification des facteurs impliqués. Comme dans le cas de la vibration du corps entier.

Actuellement, il existe certaines réglementations qui donnent des directives permettant d'évaluer le niveau d'exposition vibratoire des humains. En général, ces réglementations sont basées sur des modèles reproduisant une situation réelle de manière simplifiée. A partir des évaluations et de leur interprétation, il est possible d'appliquer des correctifs pertinents si nécessaire.

En dépit des progrès sur la compréhension de la réponse du corps aux vibrations, le phénomène de masquage a rarement été étudié, notamment dans le cas des sujets assis. Cependant, dans certains domaines tels que le vibrotactile et l'acoustique, les progrès ont été importants. Sur la base des études effectuées dans ces domaines, cette thèse cherche à mieux comprendre le phénomène de masquage. Le but principal de cette dernière est d'étudier l'existence de l'effet de masquage aux vibrations du corps entier dans le cas précis de sujets en position assise, soumis à des mouvements verticaux.

Afin d'atteindre cet objectif général, plusieurs objectifs secondaires ont été établis. Le premier porte sur la vérification des conditions du dispositif expérimental, c'est-à-dire le banc d'essais, les équipements pour la génération de mouvements et l'acquisition de données. Cet objectif concerne aussi la sélection des stimuli. En vue d'analyser l'effet de masquage, deux stimuli sont considérés nécessaires : le stimulus de test et le stimulus de masquage.

Le second est lié à la sélection de la(es) procédure(s) psychophysique(s) conduisant à la mesure sensorielle, plus précisément la(es) procédure(s) la(es) plus pertinente(s) pour l'estimation du seuil absolu, le seuil masqué et la différence à peine perceptible.

Le troisième concerne l'élaboration et la mise en œuvre des programmes destinés à évaluer le seuil absolu, le seuil masqué et la différence à peine perceptible.

Le dernier porte sur l'analyse et l'interprétation des résultats.



### **1.3 Structure de la thèse**

La structure globale du présent manuscrit comporte six chapitres. Le **Chapitre 1** est destiné à l'exposition de la problématique, plus précisément sur le contexte et les limites du problème abordé. Les objectifs généraux qui ont été suivis afin d'analyser le phénomène de masquage sont également exposés. Finalement, l'organisation du manuscrit est présentée.

Le deuxième chapitre a été conçu afin de mieux comprendre les éléments qui permettent de configurer le contexte de la perception vibratoire. Le **Chapitre 2** est partiellement consacré à la description générale du processus de perception, en considérant la physiologie et la réponse du corps aux vibrations, notamment dans le cas précis de sujets en position assise soumis aux des mouvements dans le sens vertical.

Quelques d'autres aspects liés à la mesure sensorielle tels que la notion du seuil et les techniques d'évaluation actuellement utilisés sont également inclus. Ce deuxième chapitre, est aussi consacré au seuil de perception vibratoire ; le seuil de vibration verticale de sujets assis est spécialement décrit. Le seuil masqué de perception est abordé en considérant le cas précis de sujets assis et aussi d'autres domaines liés à la perception vibratoire.

Afin d'analyser l'effet de masquage, certaines expériences liées à la mesure sensoriel ont été développées. Les premières expériences concernant au seuil absolu de perception vibratoire, les deuxièmes au seuil masqué et finalement, quelques d'autres à la différence à peine perceptible.

Le dispositif expérimental général qui encadre toutes les expériences de mesure s'expose au **Chapitre 3**. Dans ce chapitre, la description générale du

banc d'essais et les éléments impliqués à la génération de mouvement et à l'acquisition des données sont présentés. Également, les procédures psychophysiques utilisées lors des expériences son décrites.

Aux **Chapitres 4 et 5** les résultats obtenus lors des mesures sensorielles sont présentés. Le **Chapitre 4** est destiné au seuil absolu de perception tandis que le **Chapitre 5**, au seuil masqué et à la différence à peine perceptible. Dans ces deux chapitres, après l'exposition des résultats, la discussion des données et les conclusions pertinentes sont exposés.

Finalement, une synthèse du travail est présentée dans le chapitre **Conclusions Générales**. Certaines remarques concernant au seuil absolu de perception, au seuil masqué, à la différence à peine perceptible et au phénomène de masquage sont aussi exposés. Les aspects qui méritent une investigation plus approfondie sont également remarqués.



# Chapitre 2.

## Revue des notions fondamentales

2.1.	Introduction.....	9
2.2.	Physiologie de la perception vibratoire .....	10
2.3.	Réponse du corps aux vibrations.....	14
2.4.	L'évaluation sensorielle : notion de seuil .....	20
2.5.	Mesure de seuil : Les procédures psychophysiques .....	21
2.6.	Vibration du corps entier .....	25
	2.6.1 Vibrations du corps entier de personnes au debout .....	27
	2.6.2 Vibrations du corps entier de personnes couchées.....	31
	2.6.3 Vibrations du corps entier des personnes assises .....	32
	2.6.4 Seuil absolu de perception vibratoire.....	35
	2.6.5 Seuil masqué de perception vibratoire.....	40
2.7.	Conclusions du chapitre.....	47

### **2.1 Introduction**

Au long de ce chapitre quelques aspects de base sont exposés. Tout d'abord, une vision très générale du processus de perception vibratoire et les systèmes sensoriels impliqués tels que le système visuel, vestibulaire et somatosensoriel est présentée.

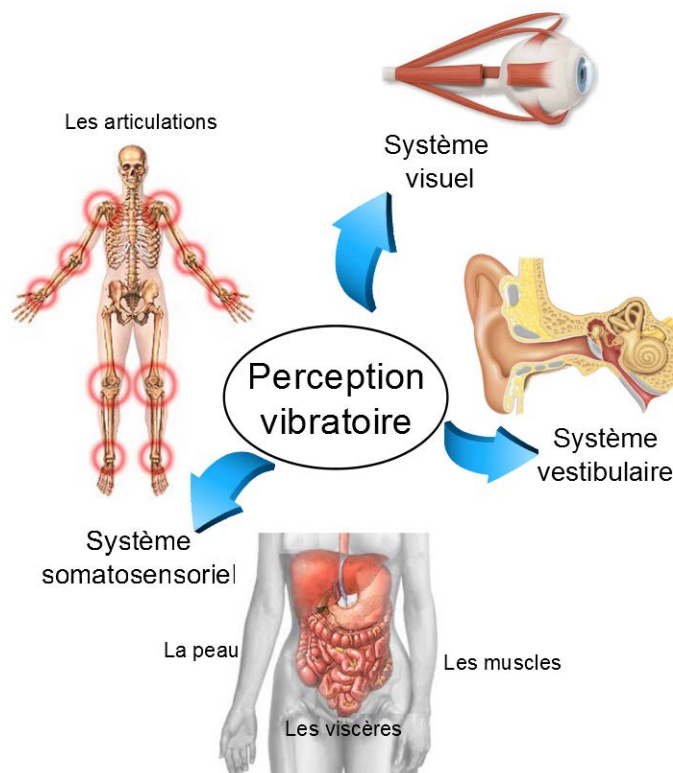
Ensuite, une brève revue de la réponse du corps aux vibrations, plus précisément en termes de l'impédance, la transmissibilité et la biomécanique est introduite. Certains renseignements fondamentaux liés à la mesure sensorielle seront aussi abordés.

Une revue plus détaillée du seuil de perception vibratoire sera présente. Les références à ce sujet seront abordées de façon générale, en fonction de la position du corps et le sens du mouvement. Un traitement plus précis sera

consacré à l'étude du seuil absolu de sujets en position assise, soumis aux mouvements dans le sens vertical. Finalement, une revue du seuil de perception masqué ainsi que certains aspects liés au phénomène de masquage est présentée.

## 2.2 *Physiologie de la perception vibratoire*

Le processus par lequel le corps humain perçoit le mouvement vibratoire, comprend plusieurs systèmes sensoriels très complexes et reliés. Les systèmes les plus relevant sont le système visuel, vestibulaire et somatosensoriel (la peau, les articulations, les muscles et les viscères), ils sont affichés à la Figure 2.1.



**Figure 2.1** Systèmes sensoriels liés à la perception vibratoire.

Les systèmes visuel et vestibulaire deviennent plus importants aux basses fréquences. Aux moyennes fréquences, la perception est fournie par les mouvements du corps et par les forces résultant des mouvements. A moyennes et hautes fréquences, le système somatosensoriel participe de façon significative.

Par l'intermédiaire du système visuel, il est possible d'apprécier la distance des objets en fonction de la lumière émise ou reflétée dans l'œil. La vibration peut être détectée due au mouvement relatif entre les objets dans la scène visuelle. La rotation des yeux provoque un déplacement de l'image sur la rétine, indépendamment de la distance de visualisation. La rotation de la tête, entraîne généralement une rotation involontaire des yeux.

Le système vestibulaire se trouve à l'oreille interne. Grâce à ce système, il est possible d'obtenir des informations concernant à l'accélération angulaire et linéaire du corps. L'information fournie par ce système joue un rôle important dans la posture du corps, afin de maintenir une image visuelle stable sur la rétine.

Le système somatosensoriel est lié à des stimuli qui affectent la peau, les articulations, les muscles et les viscères. La peau, est l'interface entre l'organisme et le monde extérieur. La peau est dotée de récepteurs qui détectent la pression, le toucher, la température, la douleur et la vibration. Les muscles et les articulations possèdent aussi des récepteurs sensoriels qui fournissent des informations concernant à la position et le mouvement des membres du corps.

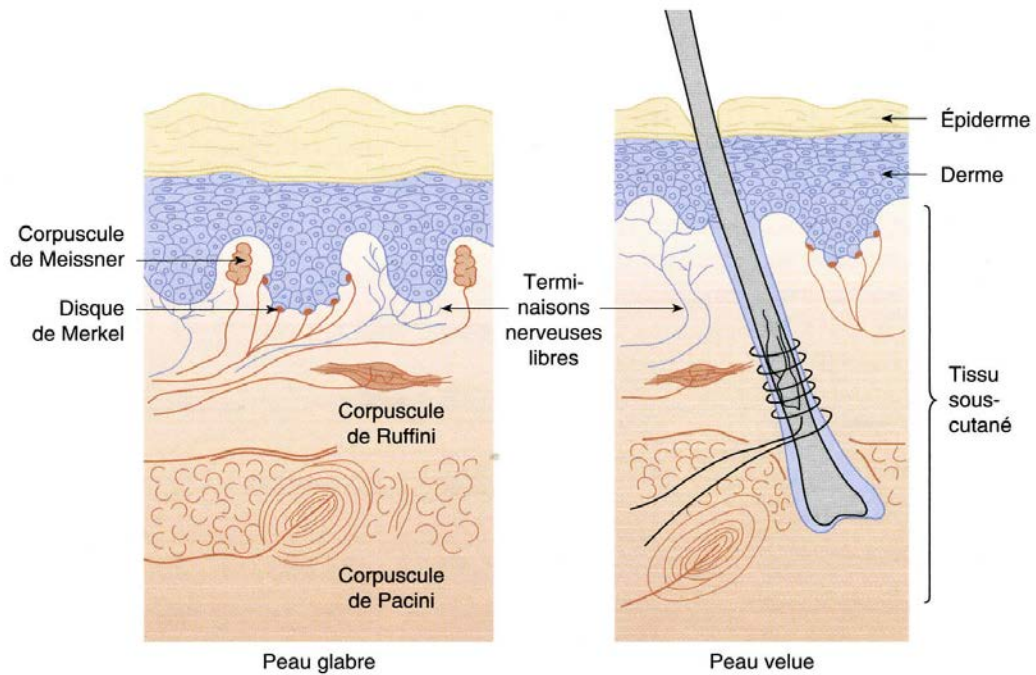
Le processus de perception du système somatosensoriel peut être affecté par le type de récepteur ainsi que par la localisation spatiale, l'intensité, la fréquence et la durée des stimuli. Certains récepteurs interprètent le niveau de pression sur la peau, des autres seulement la variation et la vitesse de la stimulation.

Les récepteurs d'adaptation lente sont activés au long de toute la durée du stimulus, tandis que ceux qui correspondent à la adaptation rapide sont activés uniquement au début et à la fin de la stimulation.

Sur la peau pileuse, les récepteurs d'adaptation rapide comprennent les follicules pileux ; sur la peau glabre, les corpuscules de Meissner et les corpuscules de Pacini (tissu sous-cutané).

Les récepteurs des follicules pileux et les corpuscules de Meissner répondent à des stimuli de fréquence moyenne (30 - 40 Hz [GUE 01] ; 10 - 100 Hz [SD 01] ; 5 - 50 Hz [BEL 02] ; 3 - 40 Hz [FOR 09]). Les corpuscules de Pacini répondent à des stimuli de haute fréquence (environ 250 Hz [GUE 01] ; 40 Hz et au-dessus [GRI 90], [BEL 02], [FOR 09] ; 100 - 400 Hz [SD 01]).

Les récepteurs d'adaptation lente, comprennent les disques de Merkel et les corpuscules de Ruffini. Les disques de Merkel ont des champs récepteurs ponctuels, alors que les corpuscules de Ruffini sont activés par l'étirement de la peau. Certains de ces récepteurs qui sont énumérés ci-dessus, sont illustrés à la Figure 2.2.



**Figure 2.2** Disposition des différents types de récepteurs sensoriels dans la peau glabre et la peau velue. Adaptée de [PR 04].

Sur la peau glabre des humains, c'est-à-dire à la paume des mains et la plante des pieds, il y a quatre types de récepteurs : les corpuscules de Meissner, Pacini et Ruffini et les disques de Merkel. Les récepteurs de Meissner, Ruffini et de Merkel sont également dénommés récepteurs Non Pacini.

En plus, sur la peau velue des mammifères, les récepteurs suivants ont été identifiés [FOR 09] : les corpuscules de Pacini, Meissner et les disques de Merkel, les terminaisons de Ruffini, les follicules pileux de type G-1, G-2 et D poils ainsi que ceux de type C-mech.

La mesure de la perception vibratoire est possible en utilisant le concept du seuil sensoriel. Le seuil de détection (ou absolu) est défini comme la valeur d'un stimulus qui est juste suffisante pour être détecté. Le seuil absolu des quatre canaux somatosensoriels de la peau glabre, peut varier en fonction de



la fréquence, la durée du stimulus, la zone de stimulation, et des caractéristiques des canaux individuels.

Malgré l'identification des certains récepteurs sur la peau velue, l'influence des conditions des stimuli tels que la fréquence, la durée, la zone de stimulation ainsi que les caractéristiques précises des canaux individuels, ne sont pas connus [FOR 09].

### **2.3 Réponse du corps aux vibrations**

En position assise, les stimuli vibratoires dans le sens vertical provoquent une gamme de mouvements physiques de certaines parties du corps. En conséquence, la sensation perçue est liée à tous les aspects impliqués au mouvement ; cette perception peut être simulée et quantifiée.

D'un coté, la simulation est plutôt dirigée à la construction de modèles biodynamiques qui favorisent la compréhension des réactions humaines. De l'autre coté, la quantification se fait par la mesure de l'impédance mécanique et la transmissibilité.

Le terme « impédance mécanique » est souvent utilisé comme un terme générique pour toutes les relations entre la force appliquée sur un système à une fréquence précise et le mouvement conséquent (le déplacement, la vitesse ou l'accélération) à la même fréquence. La relation force/accélération est souvent dénommé masse apparente ou effective, la relation force/vitesse est normalement appelé impédance et la relation force/déplacement est désigné rigidité dynamique [GRI 90].

La transmissibilité fait référence à la propagation vibratoire au travers du corps, c'est à dire l'effet entre un point d'excitation par exemple les pieds et le mouvement résultant en une autre partie du corps, par exemple la tête.

En relation à la réponse du corps aux vibrations, certaines études ont été menées en considérant diverses conditions expérimentales. Les résultats rapportés suggèrent que plusieurs des conditions liées à l'appui des pieds, la posture du corps, l'amplitude du stimulus et les caractéristiques des sujets, peuvent avoir une influence significative sur la réponse mesurée, en particulier en ce qui concerne l'impédance mécanique ou la masse apparente.

La réponse du corps aux vibrations peut être modifiée par les conditions du siège, telles que la présence d'un repose pieds (stationnaire ou en mouvement en phase avec le siège), le contact avec un dossier, l'angle du dossier et l'angle du coussin de siège ([FG 89], [MPRH 93], [WG 98], [NG 03], [MG 02b]). Chaque condition ou l'ensemble des conditions, conduisent à une certaine distribution de masse corporelle ainsi qu'une posture précise.

Fairley et Griffin [FG 89] ont remarqué que la masse apparente à basses fréquences augmente avec l'accroissement de la hauteur du repose-pied stationnaire. Dans le cas du repose-pied en mouvement (en phase avec le siège), il a été observé une réduction de la masse apparente en fonction de l'accrue de la hauteur du repose-pied.

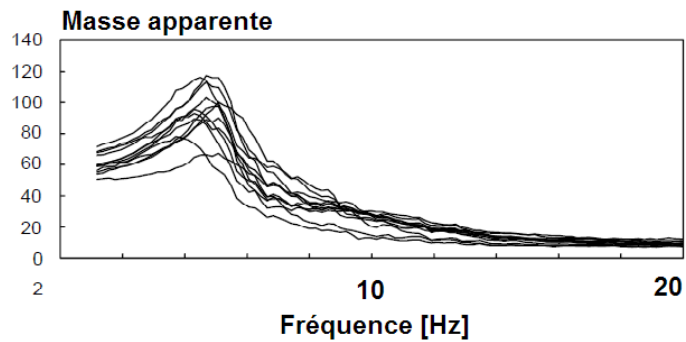
La masse apparente du corps et la transmissibilité à la tête et la colonne vertébrale, sont affectées par la présence d'un dossier. Cette surface d'appui diminue la masse apparente aux basses fréquences ; cependant, à des fréquences supérieures à la résonance, la masse apparente augmente, ce qui suggère une rigidité de la tension musculaire ([FG 89], [FG 90], [NG 04]).

Paddan et Griffin [PG 88] ont trouvé une augmentation de la transmissibilité (à la résonance) du siège à la tête, lorsque l'appui pour le dos a été utilisé.

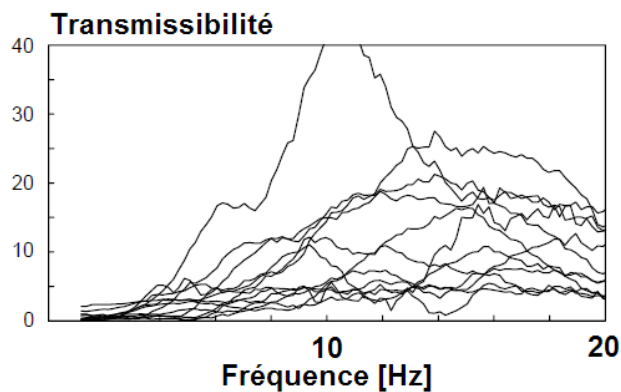
Wei et Griffin [WG 98] ont évalué l'effet de l'inclinaison du siège sur la transmissibilité et la masse apparente du corps. Ils ont trouvé que lorsque l'inclinaison du siège augmente (entre  $0^\circ$  et  $20^\circ$ ), la transmissibilité du coussin de siège diminue aux fréquences inférieures à 6 Hz. Au dessus de cette fréquence, la transmissibilité augmente. Par ailleurs, ils ont observé une baisse de la masse apparente liée à l'augmentation de l'angle du siège (aux fréquences inférieures à 5.5 Hz).

L'effet de la posture du corps et de l'amplitude de la vibration vertical (aléatoire entre 1 et 20 Hz) sur la masse apparente et la transmissibilité a été analysé par Mansfield et Griffin [MG 02b]. Ils ont sélectionnée neuf (9) positions différentes dans la posture assise à trois amplitudes (0.2, 1.0 et 2.0  $m/s^2$ ). La Figure 2.3 a) et b) montre la masse apparente (le module [Kg]) et la transmissibilité du siège (le module [ $rad/s^2/m/s^2$ ]) vers le bassin, des douze sujets qui ont participé aux essais, plus précisément celles qui concerne à la posture dénommé stricte (à 1.0  $m/s^2$ ).

De façon générale, la masse apparente expose caractéristique similaire à celles reportées par [FG 89] ; la variation observé peut être lié à les différences du poids des sujets. En ce qui concerne la transmissibilité, celles là montrent une augmentation important entre 10 et 18 Hz. Mansfield et Griffin [MG 02b] ont trouvé que dans tous les cas analysés, la fréquence de résonance de la masse apparente a diminuée en relation à l'augmentation de l'amplitude des vibrations, ce qui suggère un effet d'atténuation non linéaire.



a)



b)

**Figure 2.3** La masse apparente (le module [Kg]) et la transmissibilité du siège (le module [rad/s<sup>2</sup>/m/s<sup>2</sup>]) vers le bassin, posture dénommée stricte. Adaptée de [MG 02b].

Un effet similaire (atténuation non linéaire) a été observé en relation à la transmissibilité. Par ailleurs, [MG 02b] ont détecté que l'influence de l'amplitude de vibration sur la masse apparente et la transmissibilité, est plus significative que l'influence de la posture.

En position assise, le corps est placé sur les trois axes de translation par rapport à son contact avec le siège, l'arrière du siège et la surface de support des pieds. Ces supports soutiennent toutes les parties du corps (vertèbres lombaires, thoraciques et cervicales, bassin, tête, bras et jambes), ces parties

sont reliées et par conséquence, les forces sont transmises d'un segment à l'autre.

Les forces appliquées sur le corps à partir du siège, ne sont pas toujours «sur» la surface du siège : il existe une composante perpendiculaire et deux composants tangent à la surface. Les forces tangentielles, se produisent dans la principale surface de soutien, en raison de la poussée produite par l'appui-dos. Ces forces peuvent être modifiées par l'ajustement de la position des pieds ainsi qu'en inclinant le siège.

Lorsque le corps (en position assise) repose sur une surface entièrement plane et rigide, la plupart du poids est supporté par la tubérosité ischiatique. Cette partie comprend la saillie osseuse à la partie inférieure et postérieure de l'os de la hanche, laquelle se trouve à la jonction de l'extrémité inférieure du corps [GRI 90].

Il est possible de percevoir une pression excessive dans cette petite zone, laquelle peut être réduite en augmentant la surface de contact, soit par la modification du contour de la surface du siège, soit à cause de la modification de la posture du corps. Ce qui peut expliquer la variation de la posture corporelle lors des essais qui demandent certaine durée.

La perception vibratoire est due partiellement, au mouvement relatif des organes et des segments du corps, tel que le thorax et le bassin [DON 80]. La biomécanique du corps influe sur la perception des vibrations à travers des résonances du corps. Certaines fréquences de résonance ont été évaluées et sont disponibles dans la littérature [BEL 02]. Le Tableau 2.1 montre quelques valeurs des fréquences de résonance du corps.

Région du corps	Bande de fréquences [Hz]
Les viscères et le ventre	3
Homme debout (résonance principale)	4-6
Pelvis	10-12
Tête	20
Yeux	40-100

**Tableau 2.1** Fréquences de résonance du corps humain, [BEL 02]

La résonance principale du corps humain est d'environ 5 Hz [KG 98]. Au moment de la résonance, la tête, la colonne vertébrale, le bassin et les viscères sont déplacés verticalement. Au même temps, la région thoracique supérieure ainsi que le rachis cervical se déplacent en flexion.

Une deuxième résonance principale, a été trouvée entre 8 et 12 Hz ([COE 62], [FG 89]), mais elle est moins claire en raison des différences entre les études.

Lorsque la position stricte est modifiée en une posture relâchée, la fréquence de résonance principale diminue. Cette modification peut être liée à la déformation des muscles glutéaux [KG 98] et à la rigidité du corps ([FG 89], [HLL 00]).

L'effet du type de stimuli a été aussi analysé ; les résultats suggèrent que dans certaines plages de fréquence et d'amplitude (1-10 Hz, 1.6 m/s<sup>2</sup>), les paramètres biodynamiques ne sont que faiblement affectés par le type de stimulus transmis (sinusoïdales ou aléatoires) [DB 83].

## **2.4 L'évaluation sensorielle : notion de seuil**

La perception ne correspond pas à la réalité sensorielle, mais plutôt à l'expression d'une sensation individuelle. De façon générale, l'évaluation sensorielle représente un ensemble de techniques et de pratiques qui visent à mesurer et interpréter la perception. Quelque soit le système sensoriel, la perception se manifeste simultanément sous trois aspects différents : l'aspect quantitatif, ce qui correspond à l'intensité perçue ; l'aspect qualitatif, ce qui reflète la nature du stimulus et finalement celui associé au plaisir de la perception.

La psychophysique concerne l'étude scientifique de la relation entre le stimulus et la sensation [GES 97] ; la notion du seuil, est fondamentale en psychophysique. En relation au seuil de détection, ceci peut être interprété comme une sorte de limite entre deux états, l'un correspondant à une détection et l'autre qui correspond à l'absence de détection.

Le seuil est défini dans les unités physiques du stimulus. Il a été observé que dans le cadre de certaines conditions, la valeur de seuil peut fluctuer d'une expérience à une d'autre. Cette fluctuation «aléatoire» a conduit à une interprétation en termes de probabilité.

En générale, la fluctuation du seuil a été liée à deux aspects. Le premier concerne les caractéristiques du système sensoriel, dont la sensibilité fluctue au cours du temps et dépend de la séquence des événements antérieurs. Le deuxième, qui reste indépendant du premier, est lié aux variations du critère du sujet face à la tâche, aux variations du niveau d'attention, aux processus mnémoniques, etc. [BON 86].

## **2.5 Mesure de seuil : Les procédures psychophysiques**

Diverses méthodologies normalement utilisées pour l'estimation du seuil de perception peuvent se trouver dans la littérature. La sélection dans la plus part des cas, résulte du compromis entre les différentes prescriptions théoriques et empiriques. Parmi ces exigences, il faut souligner la durée de la mesure et le nombre d'essais, la rapidité et la précision.

En fonction de la tâche lors de la mesure, les données obtenues sont liées à un type de seuil concret. La tâche de détection concerne aux situations dans lesquelles le sujet doit répondre à une question sur la présence ou l'absence d'un stimulus.

Le seuil de détection, seuil inférieur ou seuil absolu correspond à la limite entre les valeurs faibles qui ne donnent pas lieu à une perception et ceux qui permettent une perception claire du stimulus.

La tâche de discrimination, concerne des situations dans lesquelles le sujet doit répondre à une question portant sur la présence ou sur l'absence d'une différence entre deux stimuli.

Il existe une analogie conceptuelle entre le seuil différentiel et le seuil absolu. En effet, le seuil différentiel peut être défini comme la limite entre les différences perçues et non perçues. Les mêmes méthodologies de mesure peuvent être utilisées dans les deux cas.



## Procédures psychophysiques

Essentiellement, une procédure psychophysique comprend un ensemble de techniques et de pratiques qui visent à mesurer et interpréter (de façon systématique) la relation entre le stimulus et la réponse.

En considérant la taxonomie proposée par [MFB 03], la plupart des procédures comprennent deux aspects, *le paradigme* et *la méthode*. Ils sont tout à fait distincts, bien que dans la pratique étroitement liés.

*Le paradigme* concerne aussi la tâche du sujet et la manière de présenter les stimuli. La tâche décrit exactement ce que le sujet doit faire au cours de l'essai.

La manière de présentation dispose également de deux parties : le nombre d'intervalles et le contenu de ces intervalles.

Il existe divers paradigmes, tels que le paradigme de sélection forcée, le «Oui/Non», le paradigme d'ajustement.

*La méthode* décrit les règles utilisées pour sélectionner la série des stimuli et préciser le résultat de la mesure.

Souvent, le mot "méthode" est aussi utilisé comme un titre principal pour décrire la conception expérimentale de façon globale, c'est-à-dire les stimuli, les règles, la manière de présentation, la tâche, etc.

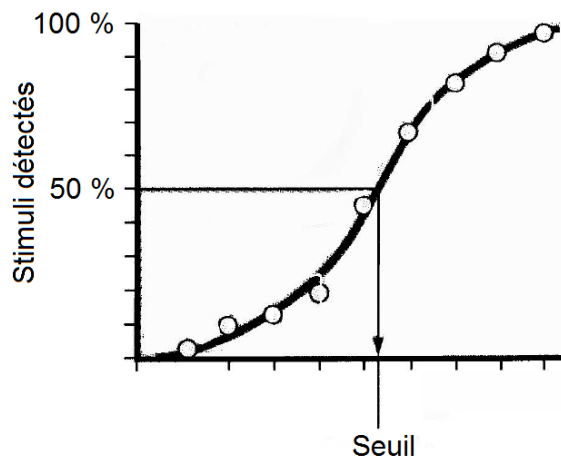
La méthode comprend également deux parties. Tout d'abord la stratégie de mesure qui décrit les règles qui régissent le déroulement d'une procédure :

- (1) La règle du départ, qui détermine le stimulus au début de l'essai.
- (2) La règle de progression, qui concerne la présentation des stimuli ainsi que les réponses reçues.
- (3) La règle d'arrêt, qui détermine le moment de finir la présentation des stimuli.

Finalement, la méthode définit la stratégie de calcul du résultat final de la mesure.

Il existe divers paramètres pour décrire l'exécution d'une procédure psychophysique. Un des paramètres est lié à la fonction psychométrique. Cette fonction caractérise la réponse subjective d'un individu (ou groupe d'individus) en fonction d'un paramètre du stimulus [BEL 02].

La Figure 2.4 montre le pourcentage de probabilité de réponse correcte en fonction du niveau d'un certain stimulus. Cela veut dire que la fonction psychométrique montre la probabilité de réponses correctes pour différents niveaux du stimulus. En conséquence, la fonction psychométrique correspond à la fonction d'interpolation des données mesurées. Souvent, les capacités sensorielles peuvent être décrites adéquatement par un seul point sur la fonction psychométrique.



**Figure 2.4** Fonction psychométrique. Adaptée de [BEL 02].

En général, les méthodes sont regroupées en ceux de stimuli constants et ceux de stimuli adaptatifs.

De façon générale, dans les méthodes des stimuli constants, l'ordre de présentation des stimuli ne dépend pas des réponses des événements précédents, et la règle de présentation est aléatoire. Les règles sont rigides et ne peuvent pas être modifiées au cours des expériences. Le seuil résultant est placé à un seul point de la fonction psychométrique.

Les caractéristiques communes des méthodes adaptatives sont : le rassemblement des réponses à chaque présentation, puis la manipulation systématique du niveau de stimulation. Les variables expérimentales qui peuvent influencer sur les résultats sont : la grandeur de la différence entre les stimuli (le pas), la valeur de départ du stimulus, le processus qui guide la séquence des niveaux et la règle d'arrêt.

Les deux méthodes (stimuli constants et adaptatives) peuvent fournir des mesures précises. Cependant, chaque méthode peut être la plus appropriée

dans une certaine situation expérimentale que dans d'autres. Les procédures psychophysiques utilisées à la présente étude sont décrits plus précisément dans la section 3.3 du Chapitre 3.

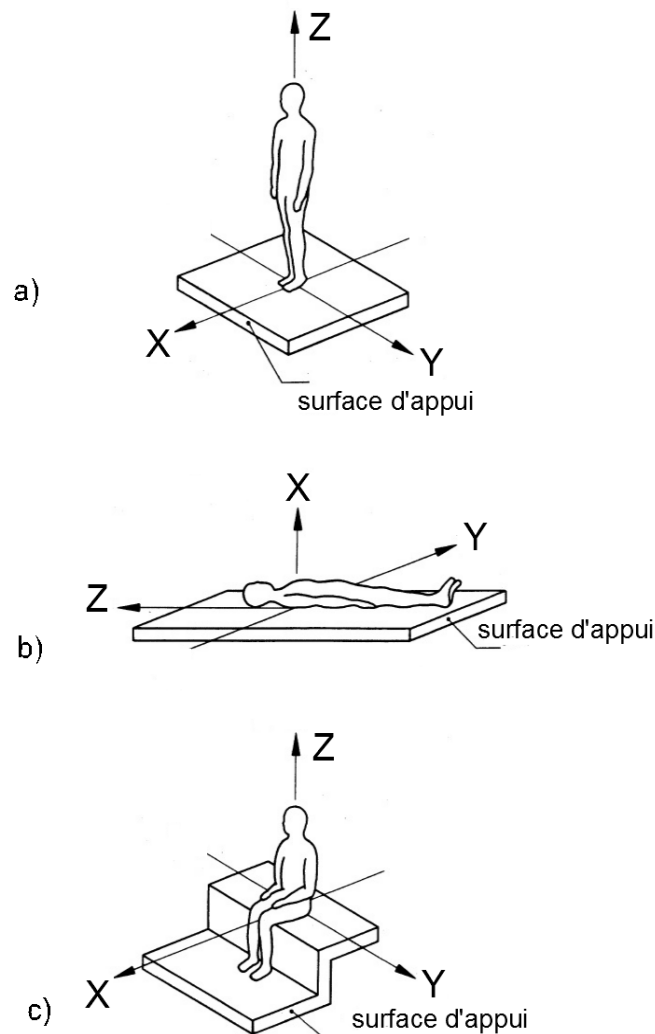
## **2.6 Vibration du corps entier**

Les perturbations produites sur le corps humains dues à des vibrations des bâtiments, des machines, des automobiles ou dues à quelque autre source, ont été abordées à partir de divers domaines. L'étude du seuil de perception représente l'une des approches les plus souvent utilisées.

Afin d'améliorer la compréhension de la façon dont le mouvement est perçu, certaines données liées au seuil de perception ont été obtenues. Puisque le processus de perception des vibrations n'est pas simple, des nombreux types d'études peuvent être conçus.

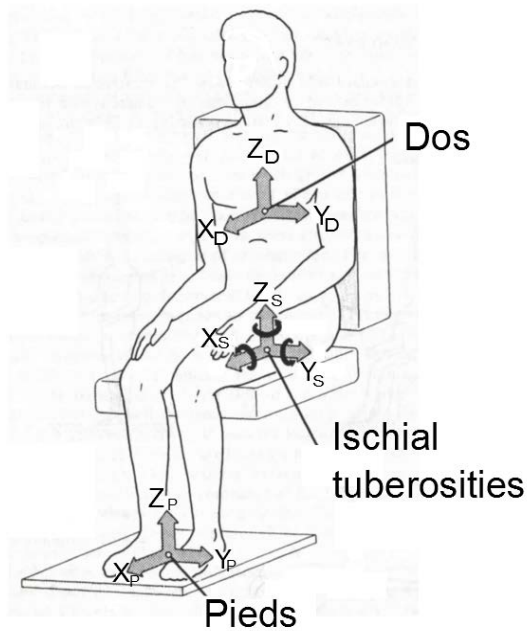
Lorsque le corps est supporté par une surface vibrante, la vibration du corps entier a lieu. Il y a trois positions principales normalement considérées : debout, couchée ou assise.

La norme internationale 2631-1 [INT 97] a défini un système de coordonnées pour afficher l'amplitude des vibrations qui se présentent dans des directions différentes sur le corps humaine. Ceci est montré à la Figure 2.5.



**Figure 2.5** Système de coordonnées pour l'évaluation de l'influence des vibrations mécaniques sur le corps humain. Adaptée de [GRI 90].

La Figure 2.6, illustre un système de coordonnées basicentrique, normalement utilisé afin d'évaluer l'exposition aux vibrations des personnes assises. Dans cet exemple, il y a six axes orthogonaux sur le siège (trois en translation et trois en rotation), trois axes de translation à l'arrière et trois axes de translation aux pieds.



**Figure 2.6** Système de coordonnées basicentrique. Adaptée de [GRI 90].

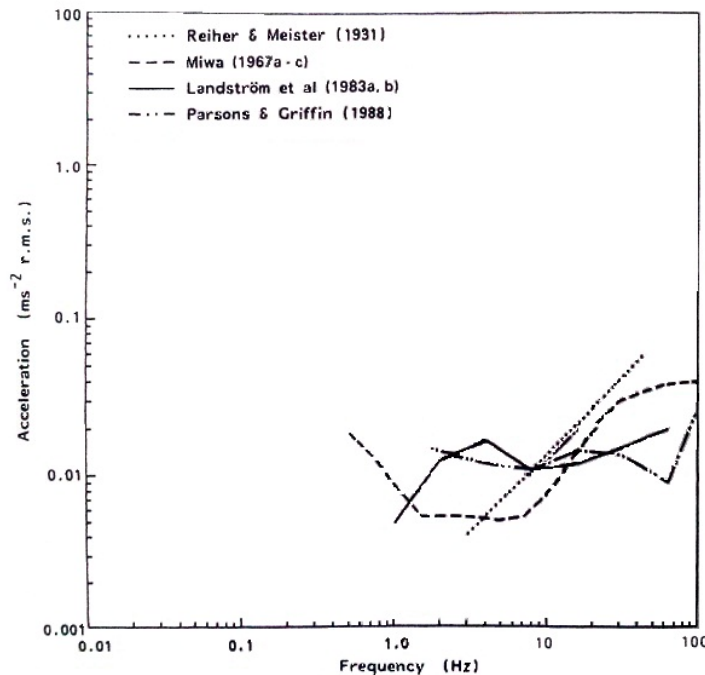
Les trois points d'origine des systèmes de coordonnées se trouvent chacun à une région située entre la surface vibrante et le corps. La première zone se trouve au plan sagittal médian (tubérosité ischiatique) et au-dessus de la surface d'appui du siège. La deuxième, entre l'arrière du corps et le dossier du siège à une hauteur prescrite. La troisième correspond à celle située sous les pieds et au-dessus du sol. Les axes de vibration sont définis par rapport au corps et se déplacent avec le corps.

### **2.6.1 Vibrations du corps entier de personnes debout**

#### **Orientation verticale**

La Figure 2.7 représente des valeurs de seuil de perception vibratoire issues de différents études. Les différences trouvées entre les résultats peuvent être

expliqué par les variations de la posture, les caractéristiques des stimuli ainsi que par la variabilité entre les sujets.



**Figure 2.7** Seuils de perception vibratoire pour des sujets debout (orientation verticale). Adaptée de [GRI 90].

Les seuils indiqués à la Figure 2.7, peuvent être considérés comme les amplitudes les plus faibles qui sont perceptibles dans certaines conditions par la moyenne des personnes en connaissance de l'application des stimuli. Globalement, entre 1 et 20 Hz le seuil reste proche à  $0.01 \text{ m/s}^2$  (vers 80 dB) sauf les données présentées par Reiher et Meister [RM 31] et Miwa [MIW 67 a-c]. Les variations du seuil entre 2 et 5 Hz peuvent refléter la réponse biodynamique du corps, cependant l'augmentation observée à basse fréquence est probablement associée à la sensibilité des systèmes sensoriels.

Les seuils moins élevés auraient lieu lorsque les stimuli visuels ou auditifs, fournissent des repères supplémentaires pour la détection des mouvements.

Généralement, les seuils seront plus élevés en raison des activités distrayantes, le niveau de vibrations et du bruit de fond. En plus, [GRI 90] suggère d'autres raisons tels que la manque de conscience du mouvement et de toute confusion entre la perception et le confort. La plus grande source de variabilité dans les seuils sera souvent la différence entre les individus.

[MCK 71] a trouvé qu'aux basses fréquences, il y a une plus grande sensibilité aux vibrations verticales pour les sujets assis par rapport à la position debout. Cependant, la différence de sensibilité était faible et dépendante du mouvement des pieds, lesquels étaient placés sur une surface vibrante et en phase avec le siège. Apparemment, pour de raisons pratiques, le seuil des personnes en position debout et celui correspondant à la position assise peuvent être considérées comme identiques ou similaires.

[PAR 81] a réalisé des expériences pour déterminer le seuil de perception vibratoire pour des sujets dans les postures assise et debout. Les résultats ont montré qu'il n'y avait aucune différence significative entre les réponses des sujets masculins et féminins.

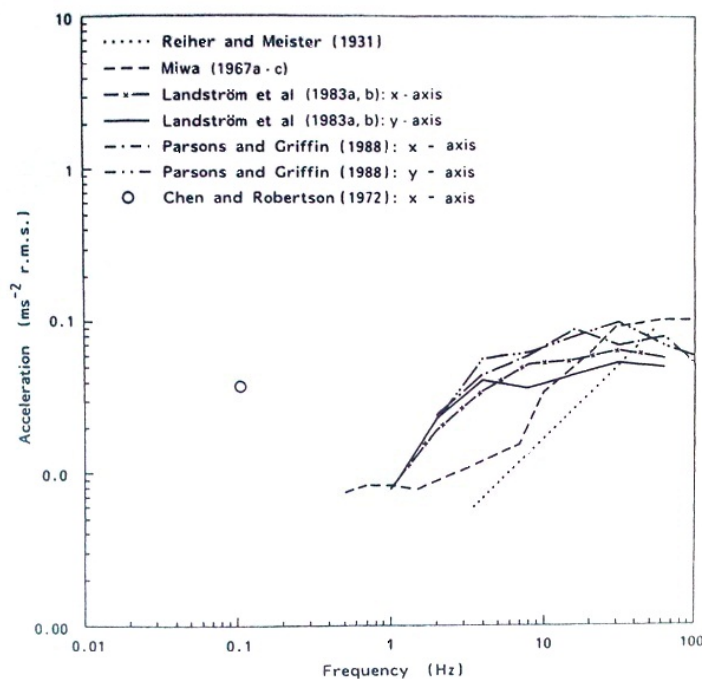
En relation à l'évaluation de la transmissibilité des vibrations verticales pour les sujets debout, [HG 98] ont mené des expériences en utilisant des stimuli de type aléatoire. Ils ont observé que la transmissibilité entre la surface vibratoire et les points de contact du corps dépend des postures des sujets. Les postures du corps des sujets ont modifié la largeur des bandes de résonance et les valeurs de la transmissibilité. Les résultats ont montré qu'au-delà de 25 Hz, la moitié de cette variation de transmissibilité est due à la posture.



## Orientation horizontale

Le seuil de perception vibratoire dans le sens horizontal pour des personnes debout, sont présentés dans la Figure 2.8.

Les résultats de Parsons et Griffin [PG 88] suggèrent qu'entre l'axe des coordonnées  $x$  et  $y$ , il n'existe pas de différences de sensibilité, quelle que soit la position du sujet. Les seuils ont été déterminés en utilisant un siège sans dossier. Probablement, le contact avec un appui pour le dos, pourrait influencer le seuil aux hautes fréquences (surtout dans l'axe  $x$ ).



**Figure 2.8** Le seuil de perception vibratoire horizontal pour des personnes debout. [GRI 90].

Cependant, la similitude entre les seuils assis et debout aux fréquences supérieures à environ 16 Hz, suggère que dans les deux postures, la perception aux hautes fréquences peut être due à des récepteurs à proximité de la source vibratoire.

## 2.6.2 Vibrations du corps entier de personnes couchées

### Orientation verticale et horizontale

Quelques études expérimentales ont été menées avec des sujets couchés sur le dos (Figure 2.5b) ; les résultats sont affichés dans la Figure 2.9. Apparemment, le seuil dans l'axe  $x$  (entre 1 et 100 Hz), est très peu influencé par la fréquence.

Probablement, la forme de la courbe du seuil dépend de l'endroit où la vibration a été mesurée. Les contours affichés à la Figure 2.9 s'appliquent lorsque le support pour le corps est rigide et il y a le même ordre de grandeur des vibrations des pieds à la tête. Soit dans l'axe  $y$  ou  $z$ , les seuils de perception vibratoire semblent être similaires pour des sujets en position couchée, (Figure 2.9).

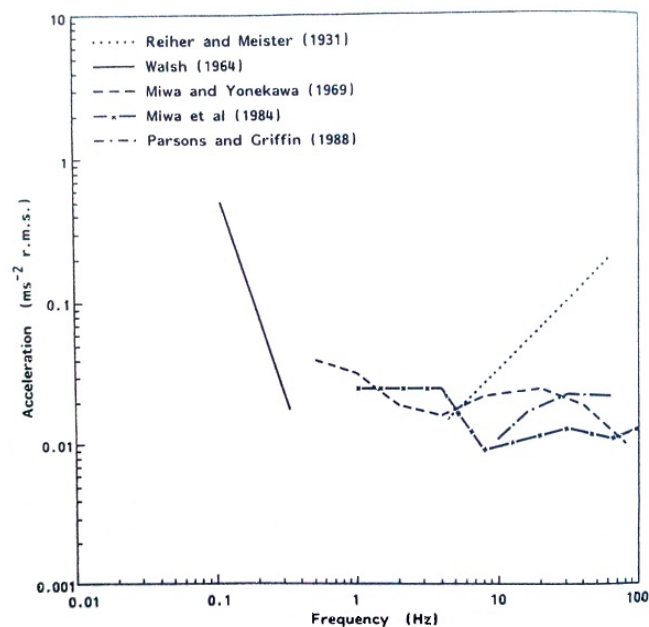


Figure 2.9 Les seuils de perception vibratoire verticale pour des personnes couchées. [GRI 90].

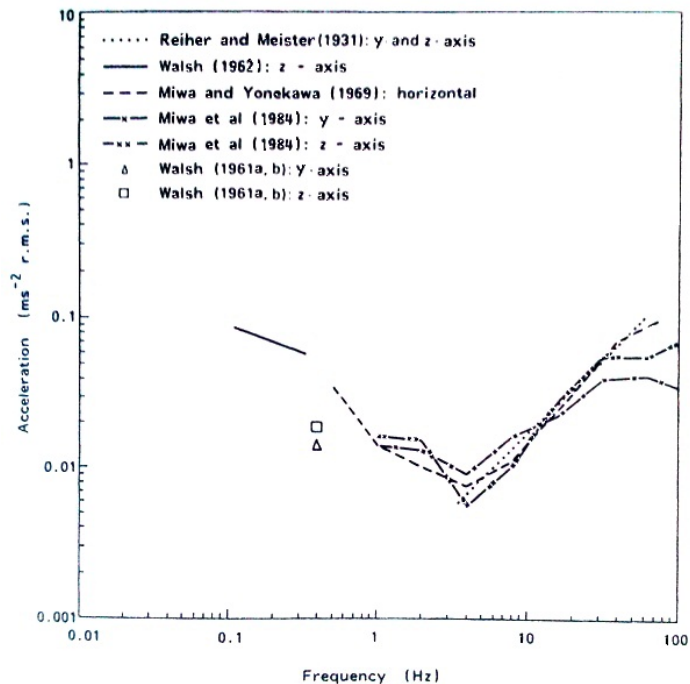


Figure 2.10 Les seuils de perception vibratoire horizontale pour des personnes couchées. [GRI 90].

### 2.6.3 Vibrations du corps entier des personnes assises

#### Orientation horizontale

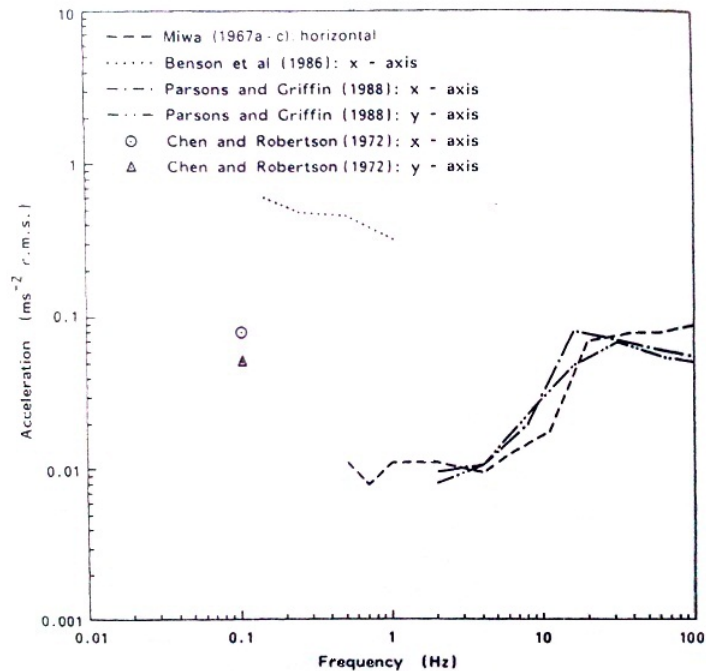
Le seuil de perception vibratoire dans le sens horizontal, pour des personnes assises tel que rapporté dans différentes études, sont résumés dans la Figure 2.11. On observe que les seuils correspondants aux positions assise et debout dans le sens horizontal, sont différents. Ces différences peuvent être dues aux particularités de la transmission de vibrations dans les deux postures [GRI 90].

Entre 1 et 10 Hz le seuil est similaire à ce qui correspond au seuil dans le sens vertical. À partir de 10 Hz, le seuil dans le sens horizontal est plus élevé

que dans le sens vertical, ce qui peut être du à la diminution de la transmissibilité vibratoire à haute fréquence.

En général, les courbes dans la Figure 2.11 montrent une tendance similaire. [BSS 86] suggèrent que le système sensoriel est sensible à l'accélération et au taux de variation de cette dernière, malgré ses résultats ont été obtenus en utilisant des stimuli de type pulse ou batre plutôt que d'un mouvement sinusoïdal.

Les données de l'étude de [CR 72] correspondent aux seuils de perception de mouvements harmoniques simples horizontaux. La période d'oscillation, le mouvement du corps, l'attente de mouvement et la posture du corps ont été les facteurs les plus importants qui ont influencé les résultats.



**Figure 2.11** Le seuil de perception vibratoire horizontale pour des personnes assises. [GRI 90].

Les résultats de Parsons et Griffin [PG 88], ne montrent pas de différence importante entre les axes  $x$  et  $y$  ; ces seuils ont été déterminés en utilisant d'un siège sans dossier. L'usage d'un dossier augmente les surfaces en contact avec le corps ; à haute fréquence, ce contact peut fournir références additionnelle (notamment dans l'axe  $x$ ) entraînant un seuil plus bas [GRI 90].

## **Orientation verticale**

Depuis 1930, le seuil de perception vibratoire dans la direction verticale a été étudié ; certains de ces études sont synthétisés chronologiquement par [MIW 67a], sous la dénomination d'expériences psychologiques.

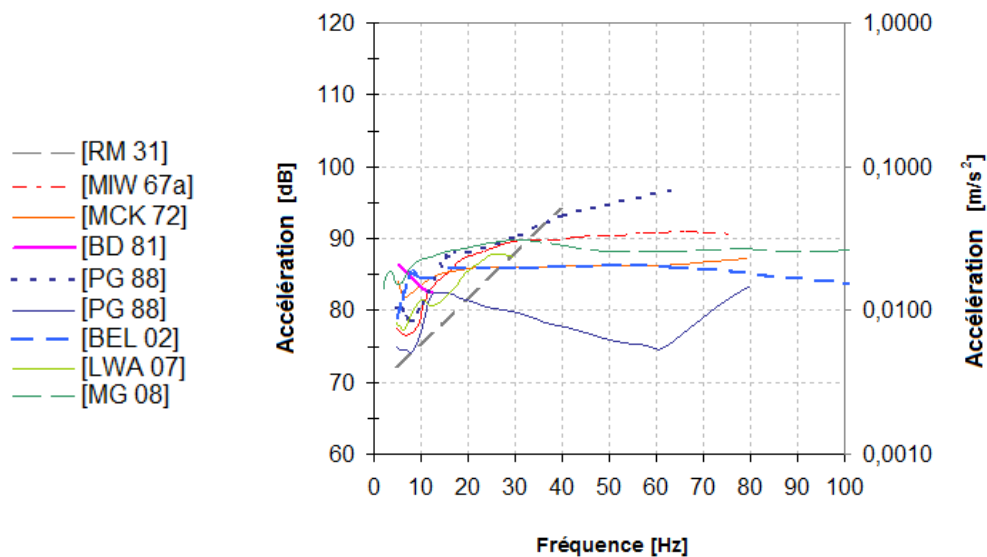
Au cours des dernières années, quelques études ont été menées en considérant l'analyse subjective (le confort, la nuisance, etc.) plutôt que l'analyses quantitative de la perception vibratoire (par exemple [HAN 70], [HOW 89]).

Les renseignements exacts des stimuli vibratoires (telle que la distorsion, les vibrations de fond, l'axe de couplage croisés et l'effet de la dynamique des surfaces d'appui) ainsi que d'autres facteurs pertinents, ont été rarement documentées (par exemple [LOU 70]).

Par ailleurs, la sémantique utilisée afin de dénommer un certain niveau de sensation (par exemple l'usage du terme «perceptible» pour indiquer le degré de gêne ou confort), peut conduire à interprétations erronées.

Compte tenu des aspects ci-dessus, la discussion dans la présente section se base sur les recherches les plus récentes liées au seuil de perception

vibratoire dans le sens vertical en position assise. Ces études ont été encadrées sur des procédures psychophysiques établies et souvent utilisées ainsi qu'en considérant des informations précises des stimuli. La Figure 2.12, affiche un récapitulatif graphique des ces travaux.



**Figure 2.12** Seuil de perception absolu des vibrations verticales de sujets assis. L'information est basée sur des illustrations de [BEL 02], [LWA 07] et [MG 08].

#### 2.6.4 *Seuil absolu de perception vibratoire*

La relation entre les vibrations et la gêne ou l'inconfort, a été analysée par [RM 31]. Ces auteurs ont obtenus les jugements de 40 sujets, à la position debout en utilisant des stimuli vibratoires. Les résultats obtenus, leur ont permis de tracer des graphiques affichant les frontières entre les sensations classées en tant que : «non perceptible», «faiblement perceptible», «facilement perceptible», «fortement perceptible», «désagréable, considéré

comme dangereuse pendant de longues périodes» et «très désagréable, considéré comme dangereux pour de courtes périodes».

Bien que l'exactitude de ces données ont été mise en doute [GRI 90] (elles ont été utilisées comme références pour le seuil des sujets assis), son importance réside à sa condition en tant que pionnier.

[RM 31] ont fournit les bases pour la description de la réponse humaine à des stimuli vibratoires. Ce travail a été largement référencé et a influencé plusieurs des normes existantes relatives à l'exposition des humains aux vibrations.

[MIW 67a] a rapporté le seuil et les contours d'égale sensation, pour les vibrations du corps entier dans le sens vertical et horizontale, lorsque les sujets prennent des postures assise et debout. Les tests ont été menés grâce à la participation de dix sujets masculins entre 20 et 40 ans.

Les tests ont été effectués entre 0.5 et 300 Hz, en utilisant le paradigme de sélection forcée (deux alternatives). Les expériences dans les deux directions (verticale et horizontale) et dans les deux positions (assise et debout) ont considérée les postures stricte et relâchée.

Lors des tests préliminaires, l'effet des postures (stricte et relâchée) dans les deux positions (assise et debout) n'a été pas clair. Donc les mesures ont été faites en considérant la posture stricte. Les sujets ont été assis directement sur une surface vibratoire (en aluminium) et sans appui pour les pieds. Les seuils pour la position assise et debout ont été moyennés afin de fournir une courbe de seuil unique.

Grace à la participation de 48 sujets, [MCK 72] a analysé le seuil de perception de sujets assis et debout en utilisant le paradigme de sélection forcée (deux alternatives). Dans le cas des sujets en position assise, les pieds des sujets étaient posés sur une surface stationnaire. Il a observé que, aux basses fréquences, il y avait une plus grande sensibilité aux vibrations verticales par la position assise que par la position debout. Cependant, les différences étaient faibles et apparemment dépendantes de la position des pieds des sujets.

L'augmentation du seuil à basse fréquence rapporté par [BD 81], peut être liée à la réponse biodynamique du corps (entre 5 et 2 Hz). Cependant, cette tendance est en contraste avec l'augmentation de la sensation de nausée qui peut se présenter à partir de 0.5 Hz [GRI 90]. Benson et Dilnot [BD 81] ont associé ces résultats à la sensibilité des systèmes sensoriels pertinents.

Les deux courbes du seuil présentées par Parsons et Griffin [PG 88] ont été déterminées pour des sujets assis en utilisant un support stationnaire pour les pieds et sans appui pour le dos. Les tests ont été menés à l'aide de deux méthodologies. La première, correspond à la théorie de la détection du signal grâce à la participation de 36 sujets (courbe inférieure de la Figure 2.12). La deuxième correspond à la méthode de réglage. Pour cette dernière, 8 sujets ont participé à l'expérience (courbe supérieure de la Figure 2.12).

À partir d'environ 20 Hz, les courbes présentées par [PG 88] montrent une écarte importante et par ailleurs, avec une tendance opposé. [PG 88] suggèrent que ces résultats peuvent être principalement associés aux divers critères adoptés par les sujets. Le point d'inflexion trouvé à 63 Hz (courbe inférieure), a été attribué à quelque instabilité du système de génération du mouvement.



[BEL 02] a effectué quelques expériences en relation à l'influence de la méthode de mesure, la durée des stimuli et le bruit audible sur le seuil absolu de perception. Pour estimer le seuil absolu de perception, l'auteur a utilisé le paradigme de sélection forcée (3 alternatives) avec la méthode Up-Down transformée.

Les études ont été réalisées grâce à la participation de 17 sujets en position assise sur une chaise en bois avec un support pour le dos. Les stimuli sont de type sinusoïdal, entre 5 et 16 Hz et à 31.5, 63, 125 et 200 Hz. La durée des stimuli a été 2 secondes en dessous de 16 Hz et 1 seconde pour les fréquences plus élevées. Des casques fermés ont été utilisés afin de réduire l'influence du bruit de fond.

Bellmann [BEL 02] a rapporté que le seuil de perception diminue avec la l'augmentation de la durée du stimulus (jusqu'à 2 secondes d'exposition), et reste sans changement significatif en dessous 16 Hz. Par ailleurs, [BEL 02] a trouvé que sauf à 63 Hz, il ne existe pas influence de un stimulus audible additionnel.

[LWA 07] ont estimé le seuil de perception absolu en considérant des stimuli vibratoires de type sinusoïdal, compris entre 5 et 31.5 Hz. Sept sujets assis sur une chaise en bois, avec un support pour le dos ont participé aux essais. Les pieds des sujets étaient posés sur une surface mobile attachée au siège d'essais. [LWA 07] ont utilisé la méthode d'ajustement pour l'estimation du seuil. Le réglage d'amplitude a été effectué grâce à l'utilisation d'une molette tournante sans marques de repère (contrôle de l'amplificateur des signaux des stimuli).

Plus récemment, [MG 08] ont utilisé la procédure "oui-non" avec la méthode Up-Down transformée, afin d'examiner l'effet de l'emplacement du stimulus (à la main, à travers le siège, et au pied) ainsi que l'effet de la fréquence des stimuli sur le seuil absolu de perception, en considérant les axes vertical et horizontal.

Les tests sont déroulés sur un siège rigide en bois et de surface profilée. Il y avait un support stationnaire et incliné pour les pieds et sans support pour le dos. Les stimuli étaient entre 2 et 315 Hz, avec une durée de 2 secondes.

De façon générale, [MG 08] ont observé que (dans les trois emplacements et dans les deux axes) le seuil dépend de la fréquence du stimulus. Ils ont rapporté que le contour du seuil à partir de 80 Hz, suggère que la perception dans les trois emplacements a été fournie par le même canal psychophysique.

A partir des seuils affichés dans la Figure 2.12, on observe que malgré les différences des conditions générales, entre 20 et 80 Hz la plus part des résultats sont proches à 85 dB (0.017 m/s<sup>2</sup>), par ailleurs dans cette plage le seuil ne dépend pas de la fréquence. Quelques conditions précises telles que les méthodologies de mesure, la durée des stimuli ou les systèmes de génération du mouvement, peuvent expliquer les valeurs extrêmes.

Autres aspects tels que le champ acoustique de l'ambiance, les nombres et caractéristiques des groupes des sujets, la posture du corps, les appuis pour les pieds, le dos, etc., peuvent influencer les résultats. Cependant, l'effet d'une des composantes du stimulus sur la perception d'autres composants a été rarement rapporté.

### **2.6.5 Seuil masqué de perception vibratoire**

Le phénomène dans lequel la perception d'un stimulus, normalement détectable, peut être empêchée par un deuxième stimulus, est défini comme masquage [GRI 90]. Afin de provoquer le «masquage latéral», le second stimulus peut être présenté à une zone différente dans le même système sensoriel. Par ailleurs, le second stimulus peut être présenté à un d'autre moment, soit en avant, pour le «pré-masquage», ou soit après, pour le «post-masquage» du stimulus de test.

Le phénomène de masquage, dans le cas concret de vibration verticale de corps entière, plus précisément sur des sujets en position assise, a été très peu étudié. En ce qui concerne à ce sujet, à la date de la présente étude seulement deux références ont été trouvées, lesquelles sont présentées ci-dessous.

Louda [LOU 70] a effectué quelques expériences afin d'analyser la perception de deux stimuli vibratoires de type sinusoïdal présentés de façon simultanée. La réaction des sujets à la vibration a été évaluée uniquement sur la base de la perception subjective ; aucun d'autres facteurs physiologiques ou psychologiques n'ont été étudiés. L'information précise concernant aux stimuli n'est pas rapporté.

Neuf sujets (7 masculins et 2 féminines), ont participé aux essais. Lors des tests, les sujets étaient assis sur un siège rigide sans coussin et sans support pour le dos.

[LOU 70] a considéré deux types de stimuli qui ont été dénommés la composante principale et la composante secondaire. La composante principale inclut un stimulus de fréquence et intensité constante. Le deuxième stimulus ou la composante secondaire, inclut un signal de fréquence constante.

Les tests étaient menés entre 0.5 et 70 Hz. La durée des stimuli était d'environ 2 minutes. Par l'intermédiaire d'un potentiomètre, ils ont ajusté l'amplitude de la composante secondaire, afin d'obtenir une des conditions suivantes :

- (1) Juste perceptible (seuil de perception).
- (2) Clairement perceptible.
- (3) Si considérable comme limite d'exposition pour la durée 30 minutes ou moins.

Finalement les trois conditions précédentes ont été évaluées. Les résultats des expériences avec des stimuli simples et simultanées, sont présentés dans les Figure 2.13 et Figure 2.14, respectivement.

Globalement, les courbes présentées dans la Figure 2.13, exposent une tendance similaire, mais l'effet de la fréquence n'est pas clair.

En ce qui concerne aux résultats exposés à la Figure 2.14, on observe qu'entre 2 et 30 Hz, le seuil de perception de la composante principale (stimulus simple) est inférieur à celui estimé en utilisant les stimuli de façon simultanée (composante secondaire).

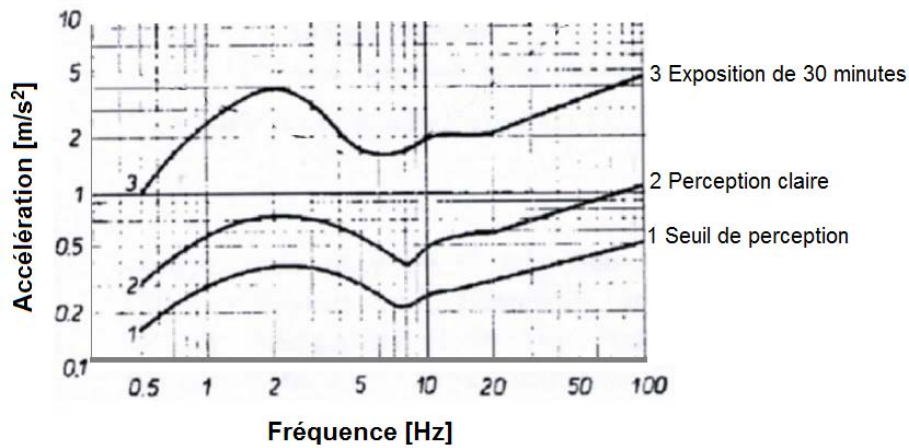


Figure 2.13 Perception des stimuli simples. Adaptée de [LOU 70].

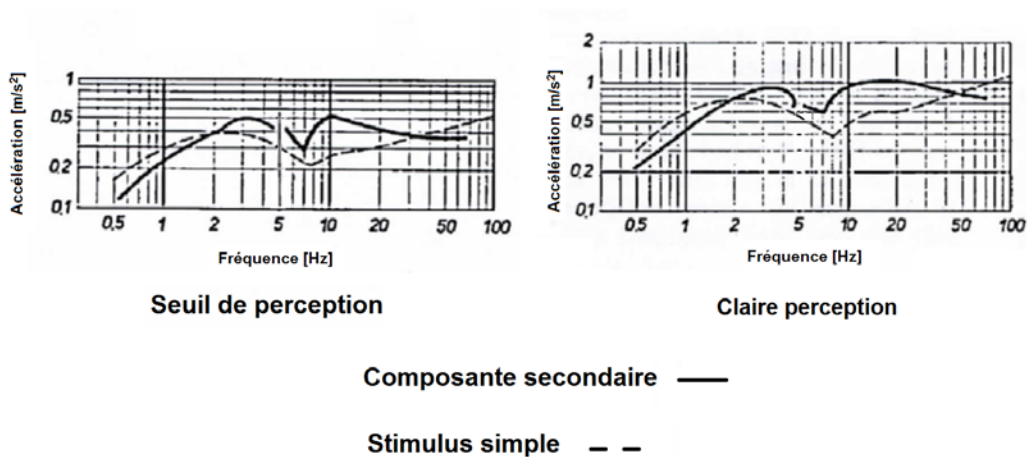


Figure 2.14 Seuil de perception et claire perception de la composante secondaire. Adaptée de [LOU 70].

La courbe dénommée de claire perception présente un comportement similaire à celui correspondant au seuil de perception. Cependant, entre 0.5 et 2 Hz ainsi qu'à partir de 30 Hz, l'effet de la composante secondaire est inversé.

Ces résultats suggèrent que la présence d'un second stimulus a empêché la détection de la composante principale ; en conséquence, il est possible d'attribuer au phénomène de masquage l'augmentation de seuil. Apparemment l'effet contraire, c'est-à-dire de démasquage, a favorisé la baisse du seuil.

L'étude présentée par Ljunggren et al. [LWA 07] comprend quelques aspects à noter en relation à la perception des vibrations verticales. Ils ont analysé le seuil absolu de perception d'un signal de fréquence unique, puis le seuil de perception avec une deuxième composante et finalement, la nuisance de ces deux stimuli. Sept sujets ont participé aux essais.

Lors des tests, les sujets ont été assis sur une chaise en bois avec un dossier, en position stricte. Les pieds étaient posés sur la surface vibratoire du simulateur. Les sujets portaient des casques afin d'éviter toute influence du bruit ambiant.

Le seuil absolu a été estimé entre 5 et 31.5 Hz en considérant des stimuli de type sinusoïdal (étude I). Dans la deuxième expérience (étude II), un signal à 8 Hz et d'amplitude fixe (à 35, 50 et 70 mm/s<sup>2</sup>) a été utilisé avec un second signal (de test) à 10, 12.5, 16, 20 et 25 Hz ; finalement, 15 signaux combinés ont été testés.

Lors des essais, les sujets ont réglé l'amplitude du signal de test à l'aide d'une molette. A partir du niveau zéro, l'amplitude de test a été augmenté jusqu'à percevoir un changement dans le stimulus. A ce moment là, le niveau de seuil a été mesuré.

Les tests ont été réalisés en trois étapes liées aux trois amplitudes de la fréquence de base. Dans chaque étape, les fréquences d'essais ont été présentées de façon aléatoire. La Figure 2.15 montre les valeurs des seuils correspondants aux études I et II.

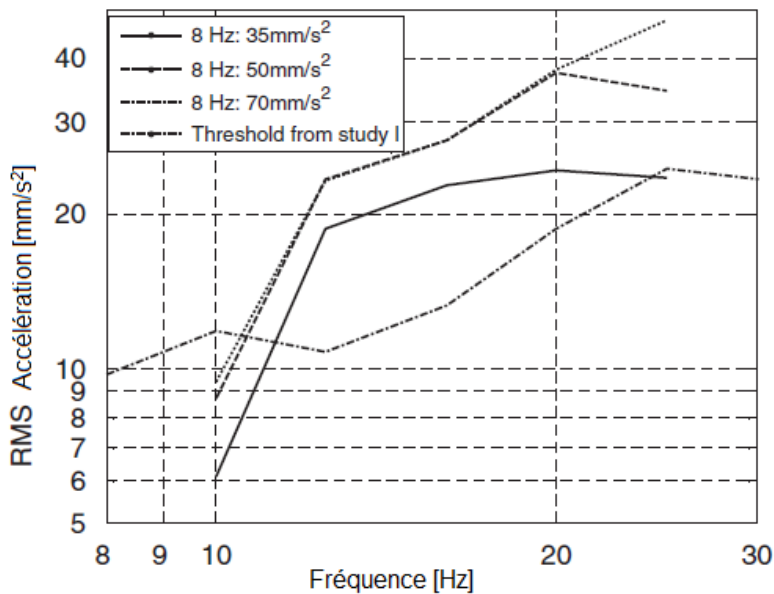
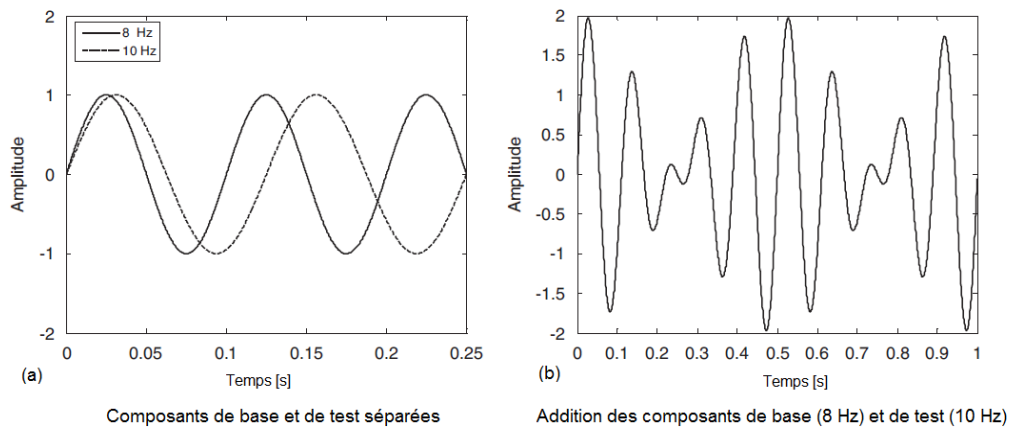


Figure 2.15 Seuil de perception absolu (études I et II). Adaptée de [LWA 07].

A partir d'environ 12 Hz un effet de masquage peut être clairement observé, le seuil estimé avec la deuxième composante est nettement plus élevé par rapport au seuil absolu. Apparemment, le second stimulus a provoqué un effet de masquage qui augmente avec l'intensité du masque. Cependant, l'effet du signal à 70 mm/s<sup>2</sup> est très faible par rapport à l'influence du signal à 50 mm/s<sup>2</sup>. A partir de 20 Hz, la tendance du seuil masqué concernant 70 mm/s<sup>2</sup>, n'est pas identique à la tendance des autres courbes.

Entre 10 et 12 Hz, le seuil estimé en présence du second signal (aux trois niveaux d'amplitude) est plus basse que le seuil absolu. Probablement cet effet de démasquage peut être lié à la proximité des fréquences des stimuli. Selon [LWA 07], l'explication la plus probable semble être celle liée au phénomène illustré dans la Figure 2.16.



**Figure 2.16** Composants de base et de test. Adaptée de [LWA 07].

L'effet de combiner les deux signaux implique la modulation d'amplitude, ce qui peut fournir de repères supplémentaires qui facilitent la détection du stimulus de test.

Dans d'autres domaines tels que le vibrotactile, le phénomène de masquage a été plus largement étudié ; quelques aspects notables peuvent être signalés:

Verrillo et Gescheider [VG 75] ont observé que le masquage se produit uniquement lorsque le stimulus de masque affecte le même canal sensoriel que le stimulus de test.



Craig [CRA 76a] a évalué les seuils absolu et masqué en fonction de la surface de contact. Il a constaté qu'aux hautes fréquences, le stimulus de masque réduit ou élimine l'effet de sommation spatiale. Cette réduction semble être une fonction directe de l'intensité du stimulus de masquage. Egalement, il a été observé que la sommation spatiale pourrait être atténuée en plaçant le masque sur le côté opposé du corps.

Gescheider et al. [GVV 82] ont étudié les effets de masquage sur le seuil absolu à l'éminence thénar de la main. Ils ont observé que le seuil se déplace en fonction de l'intensité du masque.

Gescheider et al. [GBV 89] ont analysé les effets de l'asynchronisme du début et la fréquence du stimulus de masquage sur le seuil. Ils ont aussi rapporté que l'effet de masquage est plus importante en utilisant un masque de type bruit par rapport à l'effet d'un masque de type sinusoïdal. Ces résultats sont en accord avec les études de Hamer et al. [HVZ 83].

En base à l'information existante et afin d'atteindre une meilleure compréhension du phénomène de masquage, des nombreux sujets restent à être étudiés, plus précisément dans le cas de vibrations de corps entier.

## **2.7 Conclusions du chapitre**

Le contenu de la première partie de ce chapitre, présente le contexte fondamental pour comprendre la physiologie et biodynamique impliquées dans la perception des stimuli vibratoires. La généralité de la réponse du corps aux stimuli vibratoires en termes de l'impédance et la biodynamique a été exposée. La notion du seuil ainsi que quelques aspects concernant à la mesure sensorielle ont été également présentés.

Dans le contexte de la vibration du corps entier, les antécédents qui soutiennent et encadrent l'objectif principal de ce travail ont été établis. En général, le seuil de perception vibratoire des sujets assis, soumis aux mouvements dans le sens vertical, est influencé par des divers aspects liés aux conditions des surfaces d'appui, ainsi que qu'à la position des sujets.

Le seuil masqué de perception vibratoire, dans le cas des sujets assis, soumis aux mouvements dans le sens vertical a été rarement rapporté dans la littérature. Apparemment, le phénomène de masquage est lié à la présence d'un deuxième stimulus dans le même système sensoriel et peut être influencé par divers aspect qui doivent être étudiés plus profondément.



# Chapitre 3.

## Dispositif Expérimental

3.1.	Introduction.....	49
3.2.	Le banc d'essais .....	50
3.2.1	Génération du mouvement vibratoire.....	52
3.2.2	Génération des signaux et d'acquisition de données .....	53
3.2.3	La vibration et le bruit de fond.....	53
3.2.4	Vibrations dans les axes x, y et z.....	57
3.2.5	Procédure d'acquisition et traitement des données.....	62
3.2.6	Position des sujets lors des tests.....	63
3.3.	Procédures psychophysiques .....	65
3.3.1	Procédure psychophysique I.....	65
3.3.2	Procédure psychophysique II.....	70
3.4.	Analyse statistique des données.....	75
3.5.	Conclusions du chapitre.....	76

### **3.1. Introduction**

Ce chapitre, présente la description générale de la méthodologie expérimentale utilisée.

Au départ, la description des éléments du banc d'essais et tous les composants principaux pour la génération de mouvement, ainsi que pour l'acquisition de données sont exposées.

Les conditions générales des tests tels que le système de coordonnées, la vibration et le bruit de fond, les caractéristiques dynamiques du banc, sont détaillées. Une description précise de la position des sujets lors des tests, a été également incluse.

En suite, la description des procédures psychophysiques pour des mesures sensorielles est introduite, notamment les règles qui régissent la présentation des stimuli lors des expériences.

### **3.2. Le banc d'essais**

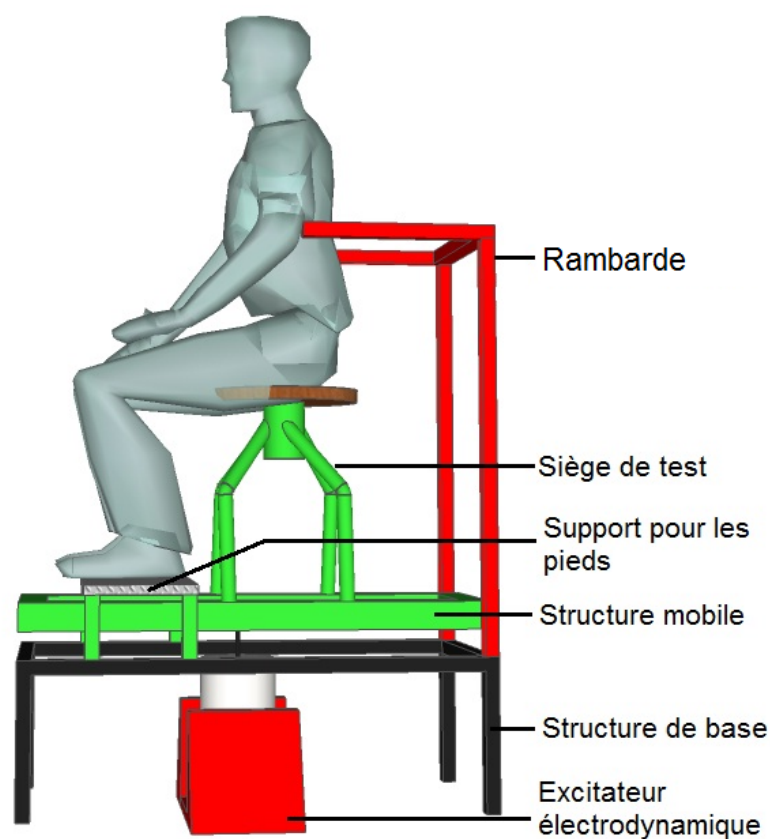
Toutes les expériences ont été menées dans le banc d'essais situé au Laboratoire Vibrations Acoustique (LVA), INSA de Lyon, France. Figure 3.1, montre un schéma général du banc. En vue de simplifier cette figure, certains éléments (tels que des guides de déplacement vertical et ceux pour la suspension), ont été supprimés.

La structure principale de ce banc, est formée par un cadre fixe et rigide (structure de base), et un deuxième cadre (structure mobile), lequel est placé sur des ressorts et d'autres éléments de guide de déplacement.

La structure de base, de forme rectangulaire (dimensions 1.20 x 0.56 x 0.06 m), est construite en acier. La conception et sa configuration, garantissent une base solide et forte.

Le deuxième cadre de forme rectangulaire (dimensions 1.30 x 0.40 x 0.10 m), est construit également en acier. Il repose sur quatre éléments de suspension et de guide de déplacement vertical identiques, fixés à la structure de base. Les guides de déplacement sont placés afin de garantir le mouvement dans le sens vertical et par ailleurs empêcher le mouvement dans quelque autre direction. Sur le cadre mobile, il est possible de placer un siège de test. La forme et les caractéristiques de ce siège, peuvent varier selon les exigences de l'étude.

Le siège de test utilisé dans tous les expériences, a une structure en acier, de 0.46 m de hauteur par rapport à la structure de base. Il dispose d'une surface plane et circulaire, en bois, de 0.30 m de diamètre et 0.02 m d'épaisseur. Cette surface, est toujours en position horizontale ( $0^\circ$  d'inclinaison par rapport à la structure de base). Le siège ne dispose d'aucun support pour le dos, la tête ou les bras.



**Figure 3.1** Composants principaux du banc d'essais.

Afin de fournir un support pour les pieds, dans la partie frontale du banc, est placée une lame horizontale, d'acier nervurée, de dimensions 0.40 x 0.58 m, laquelle est attachée à la structure de base (support stationnaire).

Pour accéder au siège, il y a un petit escalier, lequel n'a aucun contact avec la structure du banc. En addition, une rambarde est attachée à la structure pour empêcher le basculement en arrière des sujets.

### **3.2.1 Génération du mouvement vibratoire**

Un excitateur électrodynamique (de marque LDS, modèle V650), est attaché à la structure mobile du banc d'essais, par une tige verticale réglable. L'excitateur, est capable de fonctionner normalement dans la gamme de fréquences de 5 à 5000 Hz, avec des signaux d'entrée sinusoïdal ou aléatoire.

L'excitateur électrodynamique, a une structure magnétique qui abrite et soutient les bobines d'induit et de champ. Ces bobines, sont refroidies par un ventilateur extérieur. Cet appareil, peut être verrouillé en position verticale ou horizontale, au moyen de boulons de serrage. L'excitateur utilise l'alimentation de puissance de type LDS FPS10L.

L'amplificateur linéaire PA1000L, est conçu pour conduire des charges réactives de l'excitateur V650. Cet amplificateur, est capable d'amplifier un signal de source externe, afin d'entraîner l'armature de l'excitateur. De même, il fournit l'alimentation du ventilateur de refroidissement et des composantes auxiliaires. Afin de détecter toute anomalie du système, l'amplificateur surveille le système de verrouillage et des signaux «d'arrêt».

### **3.2.2 Génération des signaux et d'acquisition de données**

Tous les signaux vibratoires ont été générés à partir d'un programme développé en Matlab®, en utilisant un ordinateur portable. Les signaux ont été générés à 8192 échantillons par seconde et transmis vers un appareil d'acquisition de données compacte, à 2 canaux (type Plug. n. DAQ, marque Roga).

Les mesures sont recueillies et analysées en temps réel par un multi-analyseur portable (marque OROS, modèle OR35), en utilisant le logiciel NVGate®, avec un taux de 51200 échantillons par seconde. La taille de l'échantillon de la Transformée Discrète de Fourier (TDF) pour l'analyse des données est 10240 échantillons.

Les accéléromètres utilisés pour l'acquisition des données, lors des expériences et des tests de vérification préliminaire sont indiqués ensuite : des accéléromètres triaxiaux (marque PCB Piezotronics, modèle 356B21), des accéléromètres uni-axiaux de marque PCB Piezotronics, modèle 333B32 et du marque Bruel & Kjaer, modèle 4508.

Lors des tests préliminaires et des vérifications rapides, il a été utilisé aussi un accéléromètre portable marque SVAN 954, type 1.

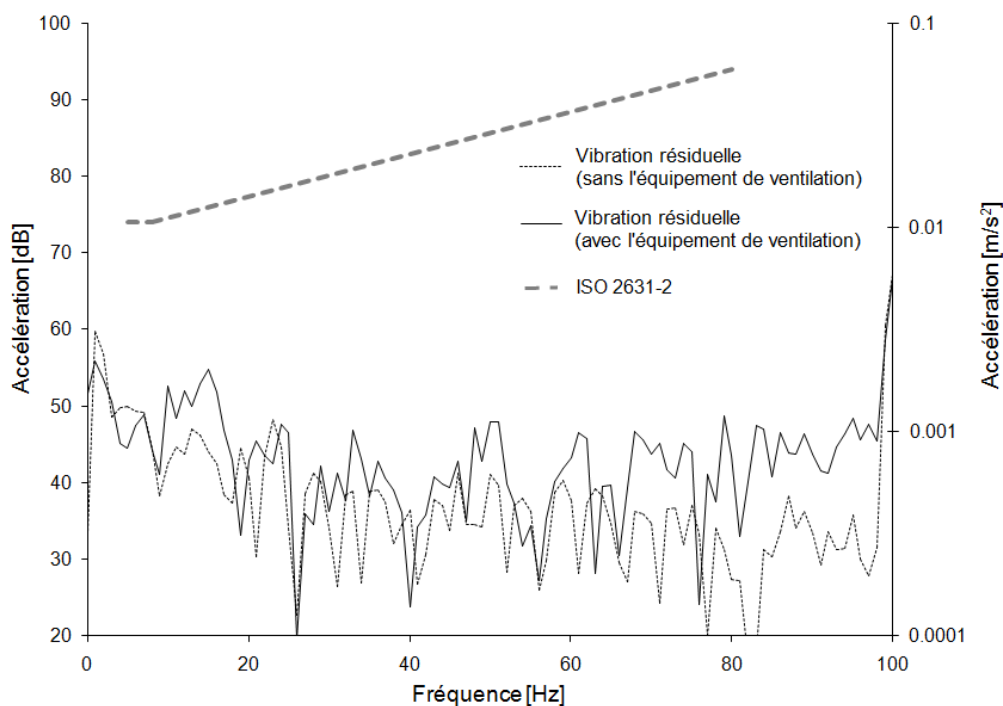
### **3.2.3 La vibration et le bruit de fond**

Les conditions de vibration et du bruit de fond ont été mesurées pour vérifier qu'il n'y ait pas d'effet sur les performances dynamiques du banc d'essais, ou sur les expériences psychophysiques.



La vibration résiduelle comprend celles qui peuvent être présents mais ne sont pas considérés comme faisant partie des essais. Ces vibrations peuvent être due à des différents équipements et dispositifs autour du banc d'essais. Le niveau de vibration résiduelle a été examiné en prenant en compte le fonctionnement normal du système de ventilation. La protection des composants électroniques de l'excitateur, exige l'utilisation de ce système de ventilation extérieur.

La vibration résiduelle a été mesurée en considérant la normale opération de l'excitateur (signal de test bruit blanc), du système de ventilation et de tous les équipements requis au cours des essais ; la Figure 3.2, montre le niveau de vibration résiduelle en fonction de la fréquence, dans les cas où l'équipement de ventilation est activé et désactivé.



**Figure 3.2** Niveau de vibration résiduelle du banc d'essais.

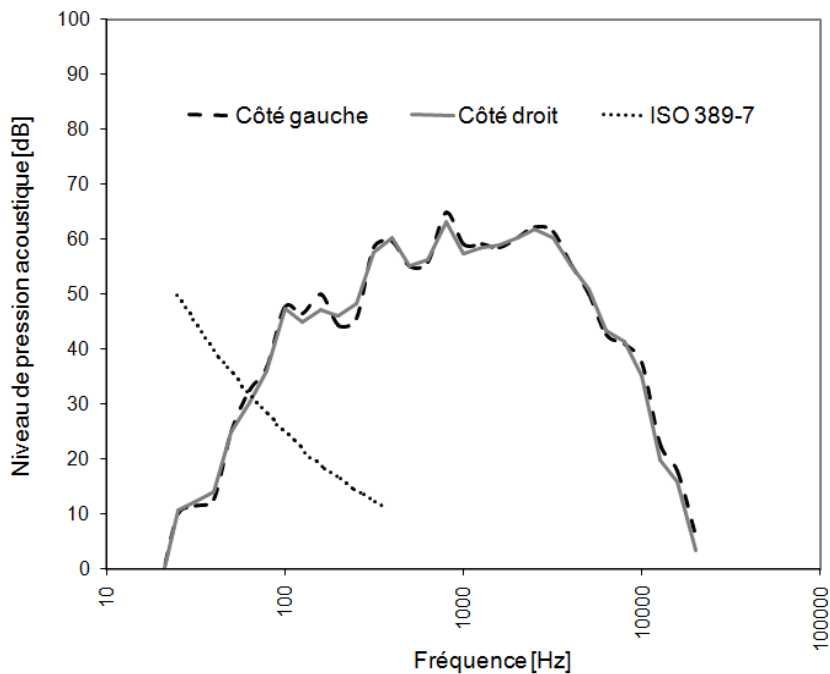
Dans cette figure, on peut voir que le niveau d'accélération résiduelle est toujours largement au-dessous du seuil de perception décrit dans la norme ISO 2631-2 [INT 89]. Cette condition permet de supposer que l'influence de la vibration résiduelle lors des mesures psychophysiques peut être négligée.

Le niveau de pression acoustique de l'environnement a été mesuré par un enregistreur de type binaural (modèle MK1 de Cortex Instruments), posé sur le siège de la plateforme. La mesure a été faite en considérant les mêmes conditions qui ont été prévues par l'analyse de la vibration résiduelle (la normale opération de l'excitateur, du système de ventilation et de tous les équipements requis au cours des essais).

Le niveau global de pression acoustique est de 73 dB (A) ; à manière de comparaison, les résultats de cette mesure et la norme de perception des sons ISO 389-7 [INT 95], sont présentés dans la Figure 3.3.

Les études de [MEL 91] et [BBMW 01] ont révélé que jusqu'à 69 dB (A), il n'existe aucune influence du niveau du son sur le seuil de perception vibratoire du corps entier dans le sens vertical. Au-dessus de ce niveau, une influence du son sur la perception de la vibration est-elle possible [MEL 91].

[BEL 02] a effectué quelques expériences pour étudier l'influence du son sur le seuil de perception vibratoire dans le cas des sujets assis. Les expériences ont été effectuées avec et sans stimuli sonores supplémentaires, sauf pour le bruit de fond dans le laboratoire (33 dB(A)) et l'équipement de génération de mouvement vibratoire.



**Figure 3.3** Niveau de pression acoustique de l'environnement.

Afin de masquer le son émis pour le simulateur vibratoire, les stimuli sonores sont présentés par casque aux sujets. Les différences entre les résultats avec et sans bruit de masquage sonore, ne sont pas significatives, sauf pour 63 Hz. Ce résultat souligne que les sujets sont probablement influencés par le son émis du système vibrant à 63 Hz, mais pas pour les autres fréquences. [BEL 02] a conclu que l'influence du bruit émis par le simulateur sur la perception vibratoire, peut être exclue si des stimuli sonore supplémentaire à 69 dB(A) sont présentés simultanément.

Dans cette étude, le niveau acoustique est très faiblement affecté par les conditions de fonctionnement de l'excitateur et de l'ensemble des équipements du banc d'essais (entre 5 et 100 Hz). Donc, le bruit de fond peut être envisagé approximativement constante. A partir de cette réflexion, on considère que tous les essais sont dans le même condition et éventuellement

affectés de manière similaire. Par ailleurs, en sachant que le niveau acoustique est très proche au niveau limite signalé par [MEL 91] et [BBMW 01], on peut supposer que son influence sur le seuil de perception est faible.

### 3.2.4 Vibrations dans les axes $x$ , $y$ et $z$ .

Le système de coordonnées utilisé pour référencer la vibration sur la structure du banc de test, est représenté dans la Figure 3.4 ; ceci est basé sur le système de coordonnées indiqué par [INT 97], normalement utilisé pour l'évaluation de l'influence des vibrations mécaniques sur le corps humaine (voir Figure 2.5c).

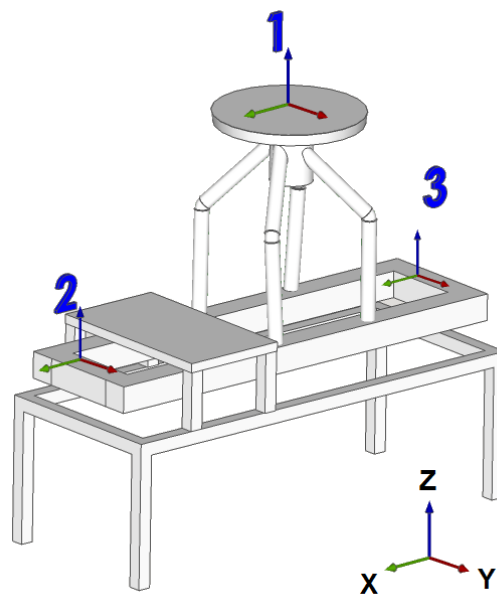
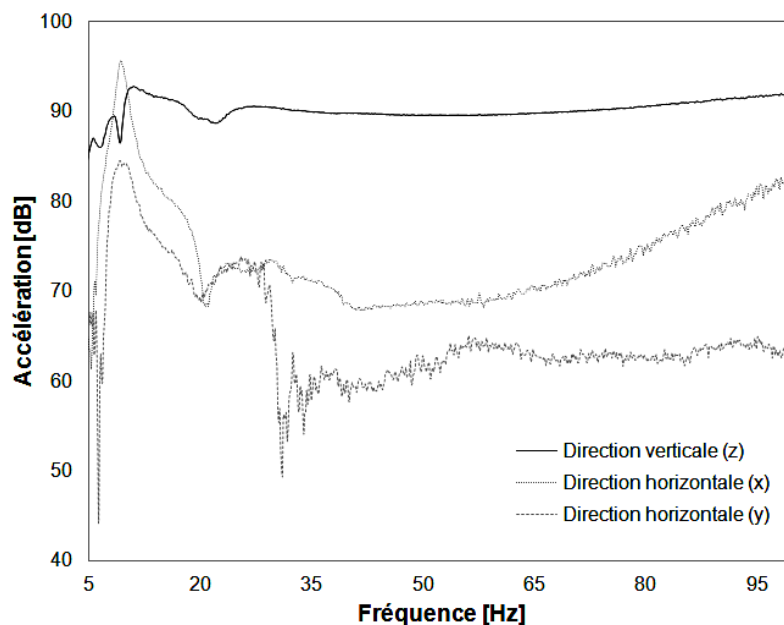


Figure 3.4 Système de coordonnées et positionnements des accéléromètres.

Cette figure, montre trois positions différentes sur la structure du banc ; dans le sens vertical (axe  $z$ ) les points 1, 2 et 3 et deux directions additionnelles

dans le siège (les axes  $x$  et  $y$ ) au point 1, lesquelles sont utilisées pour décrire les performances du système. La performance vibratoire est mesurée avec un bruit blanc.

La Figure 3.5, montre les niveaux de vibration vertical (axe  $z$ ) et horizontal (axes  $x$  et  $y$ ), mesurées aux positions 1 (Figure 3.4), avec l'accéléromètre triaxial (en considérant un sujet de test).



**Figure 3.5** Niveaux d'accélération en la direction verticale (axe  $z$ ) et horizontale (axes  $x,y$ ).

La comparaison des ces résultats a révélé qu'à partir d'environ 10 Hz le niveau de vibration dans le plan vertical (axe  $z$ ) est supérieur aux vibrations dans le plan horizontal (axes  $x$  et  $y$ ), au moins 10 dB.

À faibles amplitudes et autour de seuil de perception, le corps humain est plus sensible aux vibrations dans le sens vertical que dans le sens horizontal (axe  $x$  ou  $y$ ) [INT 89], [GRI 90], [BEL 02] ; par conséquent, l'influence des

vibrations horizontales sur les vibrations verticales (notamment pour le seuil de perception), devrait être négligeable.

En vue de minimiser l'influence des mouvements vibratoires provenant des directions  $x$  et  $y$ , la plage de fréquences a été limitée entre 10 et 80 Hz,

La Figure 3.6, montre un schéma de la vue inférieure de la surface du siège du banc d'essais. Cette image met en évidence les points I à IV, dans lesquels ont été placés les quatre accéléromètres pour la mesure simultanée des niveaux de vibration dans la direction verticale ; ces positions, sont les plus proches du centre géométrique de la base inférieure du siège.

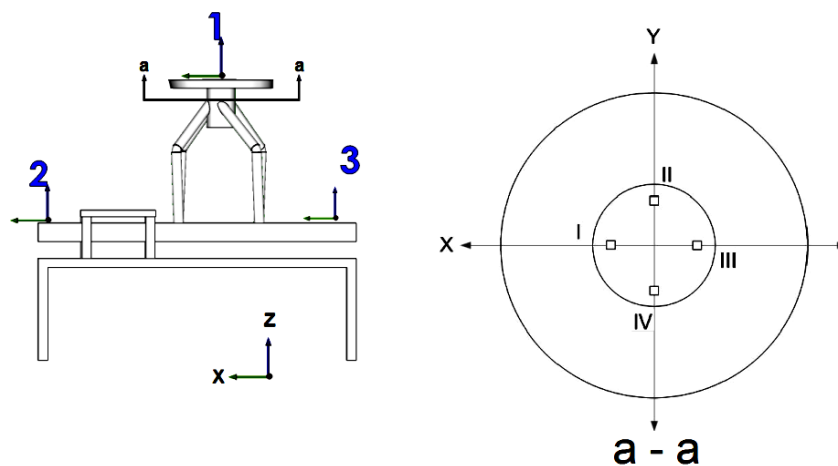
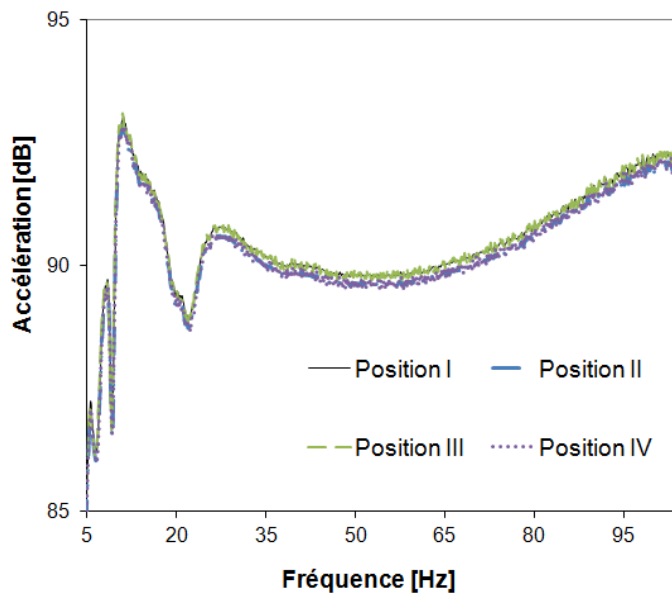


Figure 3.6 Vue inférieure de la surface du siège du banc d'essais.

Les courbes du niveau de vibration aux positions I à IV, sont affichées dans la Figure 3.7. Les niveaux d'accélération dans la direction verticale (axe  $z$ ), ne montrent aucune différence remarquable dans le spectre aux points I-IV.

Ces valeurs sont très semblables aussi à celles obtenues avec des accéléromètres placés à la position supérieure (les valeurs ne sont pas affichées sur la figure).

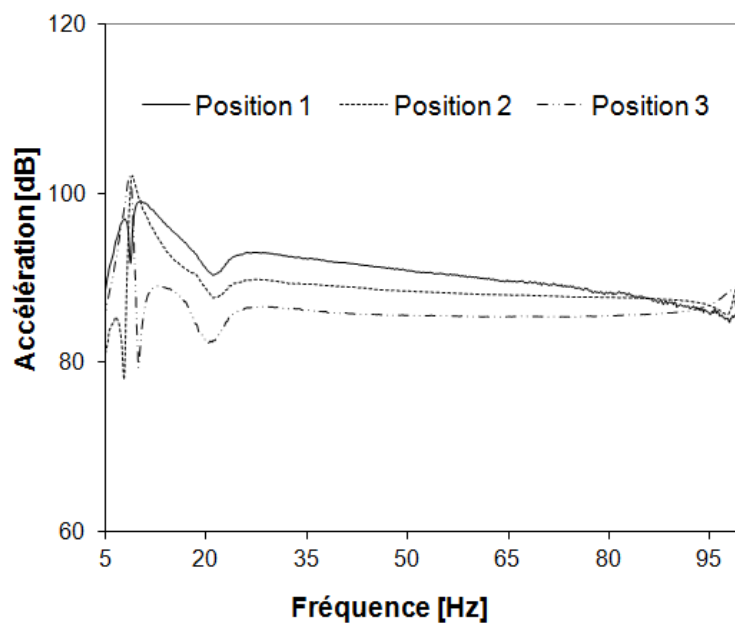


**Figure 3.7** Niveaux d'accélération en direction verticale aux positions I-IV.

Sur la base de ces résultats et pour des raisons pratiques, toutes les mesures pendant les essais ont été effectuées avec l'accéléromètre placé en la position III.

La fonction de transfert dans la direction verticale a été analysée (position 1, Figure 3.4). Le profil de vibration (Figure 3.5, courbe correspondant à la direction verticale ( $z$ )), montre la forme typique d'un système électrodynamique [BEL 02]. Entre 5 et 100 Hz, la seule fréquence de résonance identifiée est proche à 8 Hz

La Figure 3.8, présente l'accélération verticale mesurée aux positions 1, 2 et 3 (voir Figure 3.4) en considérant un sujet de test.



**Figure 3.8** Niveaux d'accélération en direction verticale aux positions 1, 2 et 3.

A partir d'environ 8 Hz et jusqu'à 80 Hz, les courbes montrent une tendance similaire. Le décalage observé peut être lié à la conception du banc de test. On prévoit que cette condition, n'a aucune influence sur les mesures, car les surfaces situées dans les points 2 et 3 ne sont pas en contact avec le corps des sujets lors des tests.



### 3.2.5 Procédure d'acquisition et traitement des données.

La séquence d'activités conduisant à l'acquisition et le traitement des données, sont simplifiées et représentées dans la Figure 3.9 grâce aux dispositifs utilisés à chaque étape. Lors des sections 3.2.1 et 3.2.2, la description plus précise de ces dispositifs a été présentée.

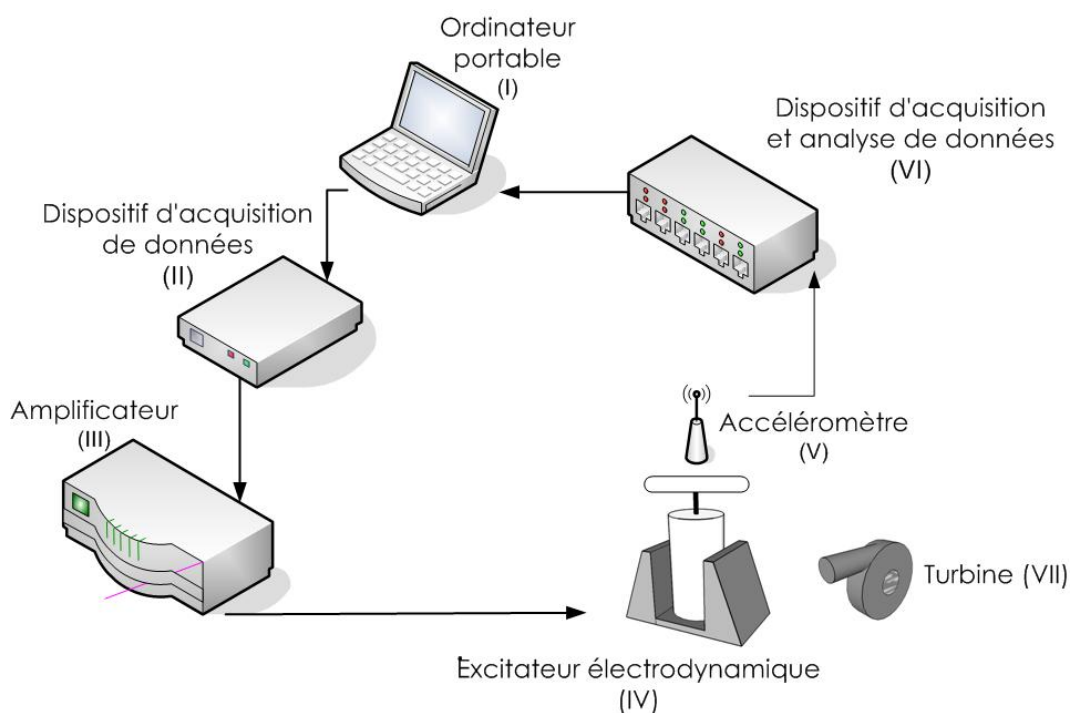


Figure 3.9 Dispositifs d'acquisition et de traitement des données.

En utilisant l'ordinateur portable dénommé (I) dans la Figure 3.9, tous les signaux ont été initialement transmis (les stimuli), puis reçus (l'accélération mesurée) et finalement traités. Chaque une de ces étapes ont été contrôlées à partir d'un programme développé en Matlab®. Grâce au dispositif

d'acquisition des données (II), le stimulus est transmis vers l'amplificateur (III), où l'amplitude du signal est réglée selon la procédure psychophysique mis en œuvre. En suite, le signal est transmis vers l'excitateur électrodynamique (IV) ; grâce à ce dispositif le signal électrique peut être transformé en mouvement vibratoire. Ce processus de transformation demande l'intervention des composants électriques, qui doivent être à une température préétablie. Afin d'éviter l'échauffement des composants électriques, la turbine de refroidissement (VII) est activée au long des essais.

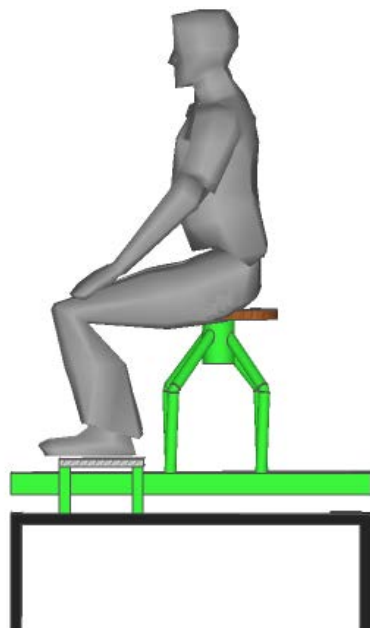
Le mouvement vibratoire transmis par l'excitateur est mesuré (moyennant l'accéléromètre (V)) en temps réel, plus précisément sur le siège du banc d'essais. La mesure est faite en termes de l'accélération, d'après la méthode d'amplitude de vibration moyennée (r.m.s.) : l'spectre du signal est intégré autour de la fréquence de test (ou plage de fréquences, selon le cas). Ce calcul est développé grâce au multi-analyseur portable (dispositif d'acquisition et analyses de données (VI)), qui est contrôlé par l'ordinateur portable (I). Le multi-analyseur est contrôlé à partir de la bibliothèque de commandes qui sont disponibles et peuvent être exécutées à partir de Matlab®. Après chaque mesure, les données recueillies sont stockées dans un fichier. L'arrêt des essais et le post-traitement des données sont déterminés par la procédure psychophysique mis en œuvre.

### **3.2.6 Position des sujets lors des tests.**

Tous les essais développés dans le cadre de la présente étude, ont été réalisés au même banc d'essai. Les stimuli sont uniquement de type vibratoire, dans la direction verticale (axe z, Figure 2.5c) et transmis seulement par la surface

de support du siège du banc d'essais. La description précise des stimuli, sera exposée à la section 4.2 du Chapitre 4.

La posture des sujets lors de tous les tests est la même, correspondant à celle qui est montrée à la Figure 3.10.



**Figure 3.10** Position des sujets lors des essais.

Avant chaque test, a été priée aux sujets de garder la même position pendant l'expérience. Le sujet, doit-il rester assis, ses mains posées sur ses jambes, avec la partie haute de son corps le plus droit possible, mais pas tendue, de préférence confortable.

Les pieds sont posés sur une surface stationnaire. L'écart entre les pies, reste normalement à la même largeur des hanches. Un écran est placé juste devant du banc d'essais (à environ 0.8 m) a fin de faciliter au sujet les instructions ; cela oblige le sujet de voir toujours dans le même sens.

Lors des tests, les sujets portaient des vêtements normaux (sans vestes ou manteaux). Les tests ne sont pas surveillés par des caméras ou des dispositifs similaires.

Par des limitations pratiques, les vibrations ne sont pas mesurées précisément à la surface de contact avec le corps du sujet de test. En conséquence, les effets des résonances du corps et ceux causés par l'interaction entre le corps humain et la surface en mouvement, ne sont pas pris en compte.

### **3.3. Procédures psychophysiques**

Lors de ce travail, deux procédures psychophysiques ont été employées. En fonction de l'ordre dans le quel elles sont utilisées, elles ont été identifiées comme Procédure I et Procédure II. La mise en œuvre des procédures a été faite à l'aide d'un ordinateur portable, en utilisant les logiciels MATLAB® et NVGate®. Les spécificités de chacune des procédures sont décrites ci-dessous.

#### **3.3.1 Procédure psychophysique I**

Cette procédure utilise le paradigme oui/non avec la méthode PEST. Dans le paradigme oui/non, la tâche du sujet consiste à répondre «oui», si au moment de l'application du stimulus, il est clairement perçu, et «non» si il n'est pas perçu.

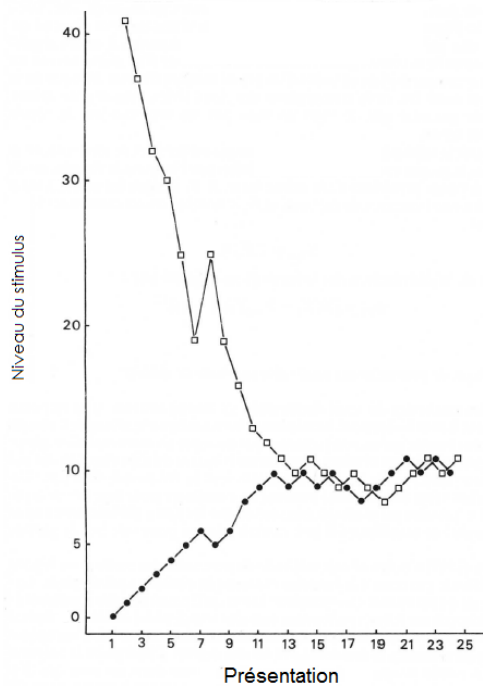
L'algorithme de la méthode PEST est conçu pour placer des essais dans les endroits les plus efficaces, c'est-à-dire au plus près du seuil. Cette efficacité est liée à la précision de la mesure et aussi au nombre d'essais requis pour estimer le seuil.

Il y a deux caractéristiques remarquables de la méthode PEST : la première concerne le changement de la taille du pas tout au long du test. En raison des changements, le pas est raffiné progressivement lorsque la valeur de convergence est proche.

La deuxième caractéristique est liée à l'estimation finale du seuil. Cette estimation est faite à partir de la valeur finale de l'épreuve, sans tenir compte les valeurs précédents. Le test s'arrête lorsque l'estimation a été bien définie.

Les règles de mise en œuvre du PEST ont été initialement décrites par [TC 67] cependant, des nombreux auteurs ont proposé des modifications permettant une convergence plus rapide.

Une de ces propositions est la variante de double série d'alternances simples [BON 86] : tous les essais impairs apparaissent dans la série ascendante, et tous les essais pairs apparaissent dans la série descendante. Au cours des tests, le sujet ne peut plus distinguer les deux séries lorsqu'elles ont convergé. La Figure 3.11 illustre un développement typique d'une double série d'alternances simples.



**Figure 3.11** Développement typique avec la méthode PEST (escalier double). Adaptée de [BON 86].

Les règles pour l'application des stimuli concernant la méthode PEST de l'escalier simple peuvent être appliquées à la variante double. Les règles de l'escalier simple sont détaillées ci-dessous. Afin de mieux comprendre, on commence par définir la notation utilisée :

$x_n$  : valeur du stimulus à la présentation  $n$ ,  $n \geq 1$ .

$d_n$  : pas appliqué (pour passer de  $x_{n-1}$  à  $x_n$ ),  $n \geq 1$ .

**Règle a :** Choisir un niveau de départ du stimulus ( $x_0$ ) et la valeur initiale du pas ( $d_1$ ). Ce point de départ peut être arbitraire, ou bien déjà dans la zone du seuil.

**Règle b :** Cette règle, définit les conditions qui amènent à présenter un niveau différent du stimulus, c'est-à-dire pour passer de  $x_{n-1}$  à  $x_n$ .

$$x_n = x_{n-1} \pm d_n \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Les règles c, définissent le niveau du stimulus à présenter à l'essai  $n$ .

**Règle c1 :** Si le stimulus  $x_n$  est déplacé dans le sens opposé au cours des essais  $n-1$  et  $n-2$ , la valeur du pas ( $d_n$ ) à ajouter ou à retrancher sera la moitié de celle qui avait conduit au stimulus  $x_{n-1}$ . Autrement dit :

$$\text{Si, } x_{n-1} < x_{n-2} \quad \text{et} \quad x_n > x_{n-1}$$

$$\text{ou } x_{n-1} > x_{n-2} \quad \text{et} \quad x_n < x_{n-1}$$

$$d_n = \frac{d_{n-1}}{2} \quad (\text{Eq. 3.2})$$

**Règle c2 :** Si le stimulus  $x_n$  se déplace une seconde fois dans le même sens qu'au cours des essais  $n-2$  et  $n-1$ , la valeur du pas à ajouter ou à retrancher sera identique à celle qui avait conduit au stimulus  $x_{n-1}$ .

$$\text{Par exemple si: } x_n > x_{n-1} > x_{n-2} < x_{n-3}$$

$$d_n = d_{n-1} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

**Règle c3 :** Si  $n > 4$  et le stimulus  $x_n$  se déplace dans le même sens, la valeur du pas à ajouter ou à retrancher sera double de celle qui avait conduit au stimulus  $x_{n-1}$ .

$$\text{Si, } x_n < x_{n-1} < x_{n-2} < x_{n-3} < x_{n-4}$$

$$d_n = 2d_{n-1} \quad (\text{Eq. 3.4})$$

**Règle c4 :** Si  $n > 4$  et le stimulus  $x_n$  se déplace dans le même sens, la valeur du pas à ajouter ou à retrancher au stimulus  $x_{n-1}$  sera soit égal au pas précédant immédiatement l'inversion, soit à deux fois ce pas. Deux possibilités se trouvent pour ce cas ; si le pas précédant immédiatement l'inversion résultait du doublement du pas précédent :

$$\text{Si, } x_n > x_{n-1} > x_{n-2} > x_{n-3} < x_{n-4}$$

$$\text{et } d_{n-3} = 2d_{n-4} \quad (\text{Eq. 3.5})$$

on arrive à (Eq. 3.3)

La deuxième possibilité se trouve si le pas précédant immédiatement l'inversion ne résultait pas du doublement du pas précédent :

$$\text{Si, } x_n > x_{n-1} > x_{n-2} > x_{n-3} < x_{n-4}$$

$$\text{et } d_{n-3} = d_{n-4} \quad (\text{Eq. 3.6})$$

tenant (Eq. 3.4)

$$d_{n-1} = d_{n-2} \quad (\text{Eq. 3.7})$$



**Règle d** : c'est une règle d'arrêt. Dans la procédure initialement proposée par [TC 67], la présentation des stimuli est arrêtée lorsque la valeur du pas ( $d_n$ ) atteint une valeur minime prédéterminée. Cependant, il est possible d'incorporer d'autres restrictions telles que un nombre maximum d'essais ou d'inversions. Dans ce dernier cas, 10 inversions (en excluant les deux premières) ont été souvent considérées [BON 86]. Le calcul du seuil est fait à partir de la moyenne des quatre dernières inversions.

### **3.3.2 Procédure psychophysique II**

Cette procédure, utilise le paradigme de trois alternatives de sélection forcée (acronyme anglais, 3AFC) avec la méthode de 1Up-3Down. Certaines études ([KGS 88], [SS 84]) suggèrent qu'en général, cette procédure fournit des résultats précis et très peu affectés par la variabilité (intra et inter individuelle) par rapport à d'autres procédures (telles que 2AFC et la procédure de maximale probabilité). La probabilité de réponses correctes fournie par la méthode 1Up-3Down (79.4%), est plus élevée que la probabilité fournie par d'autres méthodes telles que Up-Down (50%) et 2Down-1Up (70.7%). La probabilité de réponses correctes est liée à la sensibilité de la méthode et par conséquent à la stabilité du critère du sujet. C'est-à-dire, la méthode 1Up-3Down est moins sensible que la méthode Up-Down.

Dans un paradigme 3AFC, 3 signaux sont successivement présentés au sujet. Deux d'entre eux sont composés du stimulus de référence et l'autre est composé du stimulus de test.

La tâche du sujet est d'identifier l'intervalle qui comprend le stimulus de test. Par exemple, pour une mesure du seuil absolu, les stimuli de référence sont nuls (ne comprennent aucun signal), le stimulus de test est un signal avec une fréquence fixe et avec un niveau variable. Par conséquent, le sujet doit identifier l'intervalle dans lequel il est capable de détecter (percevoir) un stimulus. S'il ne peut pas détecter le stimulus, il doit choisir nécessairement un intervalle (alternative de sélection forcée). La réponse est forcée, le sujet choisira donc au hasard l'un des trois intervalles s'il ne détecte pas le stimulus.

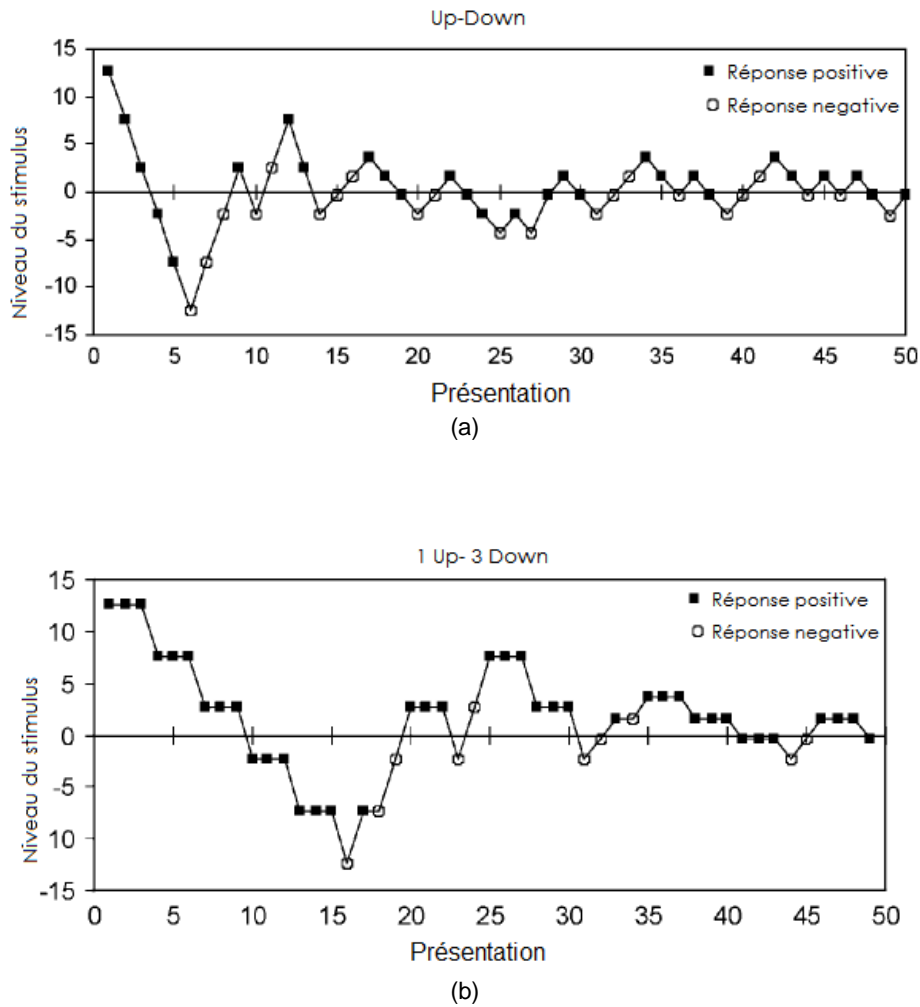
Les présentations des stimuli sont claires, ceux-ci peuvent être indiqués grâce à diodes lumineuses allumés successivement.

La méthode adaptative Up-Down utilise les réponses précédentes (une ou plus) pour sélectionner le niveau du stimulus de présentation suivant. Au cours du simple Up-Down, lorsque la réponse du sujet est correct (il a bien détecté le signal), le niveau de présentation est réduit et il augmente après une réponse erronée.

En utilisant cette méthode, aucune forme de la fonction psychométrique n'est supposée, elle n'est pas nécessaire pour les calculs. Le niveau de l'essai, la taille du pas et le critère d'arrêt, sont tous relativement simples et directs. La seule hypothèse nécessaire est une relation monotone entre les niveaux de stimulation et les niveaux de performance.

Lors de la méthode transformé 1Up-3Down, le niveau augmente après chaque mauvaise réponse (séquence «Up») et diminue après trois bonnes réponse consécutives (séquence «Down»).

La Figure 3.12 illustre les développements typique avec la méthode Up-Down et la méthode transformé 1Up-3Down.



**Figure 3.12** Développement typique avec les méthodes Up-Down et 1Up-3Down. Adaptée de [LEE 01].

La stratégie Up-Down tend à converger vers ce niveau de stimulus à laquelle la probabilité d'une séquence de réponse «Down» est égale à la probabilité d'une séquence de réponse «Up» [LEV 71]. Pour la méthode 1Up-3Down, la probabilité de réponse correcte à la convergence est 79.4 %.

Pour cette méthode, il n'existe pas règle afin de choisir le point de départ ; il n'est pas nécessaire connaissance préalable de l'endroit où le seuil est situé. Un point départ loin du seuil implique uniquement plus présentations et donc plus de temps.

La condition adaptative de cette méthode signifie que la taille initiale du pas est divisée par deux après chaque inversion ascendante, jusqu'à une taille de pas d'arrêt. Habituellement, une grande taille de pas initiale est utilisée et ensuite, la taille de ce pas devient plus petite lorsque, la convergence du seuil s'approche.

La méthode s'arrête, lorsque le pas atteint une valeur minime prédéterminée et après un nombre fixe d'inversions. Le seuil est calculé à partir de la moyenne des quatre dernières inversions.

En général, la sélection d'une procédure psychophysique, plus précisément ses composants (le paradigme et la méthode), influent directement sur certains aspects tels que la mise en œuvre et la précision des résultats. En comparant globalement les procédures I et II, il est possible souligner quelques caractéristiques précises :

- La mise œuvre du paradigme oui/non est plus simple par rapport au paradigme 3AFC.
- La tâche du sujet lors le paradigme oui/non est plus facile à comprendre que la tâche lors du paradigme 3AFC.
- Le paradigme oui/non est plus sensible à la stabilité du critère du sujet que le 3AFC. Conséquemment les résultats avec ce dernier sont moins influencés par la variabilité intra et inter individuelle.

- Dû au nombre de réponses corrects requises afin de diminuer le niveau du stimulus, la convergence de la méthode PEST est plus rapide par rapport à la méthode 1Up-3Down.

De façon générale, dans cette étude la sélection des paramètres tels que le point de départ des essais, le pas initial et de arrêt et le nombre d'inversions requises par l'arrêt a été basé sur les plus récents travaux liés au seuil de perception vibratoire de corps entier qui utilisent procédures psychophysique similaires ([BEL 02], [MG 08], [FOR 09]). Les valeurs précises sont indiqués aux sessions 4.2.2 et 4.2.3 du chapitre 4. Cependant, à titre de référence on peut mentionner certaines données : dans le domaine de l'acoustique [HAR 82] et [SS 84], utilisent 2 dB et 4 dB respectivement comme pas initial ; dans le domaine de la perception vibratoire [BEL 02] utilise 8 dB et 1 dB comme pas initial et d'arrêt, respectivement ; [MG 08] utilise 3 dB comme pas initial et 6 inversions comme consigne d'arrêt.

Dans des procédures psychophysiques utilisées lors de cette étude, n'a été pas prévu d'informer au sujet de test du caractère correct ou incorrect de sa réponse. Dans une expérience de mesure des seuils absolus réalisée avec des sujets initialement naïfs, c'est-à-dire non familiers avec la tâche, on observera des seuils relativement élevés. Avec la répétition des sessions, sans que le sujet soit informé sur la qualité de sa performance, les seuils auront tendance à s'abaisser.

Le feedback peut être utilisé afin d'accélérer l'entraînement des sujets [BON 86]. Par sujets entraînés, on entendra des sujets qui ont participé à de très nombreuses sessions expérimentales et avec une variabilité intra-individuelle extrêmement réduite. Malgré ce n'est pas le cas considéré dans

la présente étude, l'influence du feedback sur la performance du sujet ne peut être ignoré. Finalement, afin de minimiser cette influence le feedback n'est pas considéré.

### **3.4. Analyse statistique des données**

En raison des légères différences des conditions expérimentales susceptibles de se produire, occasionnellement il y a de valeurs écartées par rapport au reste des données, surtout lorsque la taille de la population est réduite. Dans ces cas, la moyenne n'est pas représentative comme la valeur finale du paramètre estimé, car elle est affectée par les valeurs extrêmes. Dans ces situations la médiane constitue un indicateur plus fiable.

Certains résultats ont été évalués en fonction d'identifier l'influence d'un paramètre particulier sur l'expérience. Les tests statistiques paramétriques peuvent être appliqués dans les cas où les données sont issues d'une population gaussiennes ou les échantillons sont de grande taille ( $\geq 30$ ). Dans cette étude, la population est de petite taille, donc il n'est pas possible de prendre la décision que les données sont issues d'une population gaussiennes. En conséquence, l'analyse statistique a été menée en utilisant le test des rangs signés de Wilcoxon [WIL 50].

Le test de Wilcoxon [WIL 50], est un test non-paramétrique, car on ne fait plus d'hypothèse sur la nature de l'échantillon. Ceci, est un test pour la taille relative des scores des échantillons du même type (ou appariées) dans deux conditions expérimentales différentes, en comparant la distribution des différences positives et négatives des rangs de leurs valeurs absolues. Dans

le cadre de cette investigation, le seuil de probabilité pour les échantillons appariés a été fixé à 0.05.

### **3.5. Conclusions du chapitre**

Le système global de génération de mouvement ainsi que tous les aspects concernant la mesure sensorielle utilisés lors de ce travail, sont basés sur des méthodologies expérimentales présentées dans la littérature, en considérant les normes internationales pour l'évaluation de l'exposition vibratoire.

La sélection des procédures psychophysiques à été basé sur les aspects les plus pertinents : la mise en œuvre et la précision des résultats. Globalement la procédure (I) entraîne une mise en œuvre et une tâche relativement simple, par ailleurs la rapidité de convergence constitue un atout. Cependant, cette procédure est sensible à la stabilité du critère du sujet. Par contre, la mise en œuvre et la tâche de la procédure (II) sont moins simples, et le temps requis par les essais peut être plus élevé. Néanmoins, les résultats avec cette procédure sont moins influencés par la variabilité intra et inter individuelle.

# Chapitre 4.

## Seuil absolu de perception vibratoire

4.1.	Introduction.....	77
4.2.	Mesure du seuil absolu de perception. Description des expériences .....	78
4.2.1	Description des stimuli.....	79
4.2.2	Procédure psychophysique I.....	84
4.2.3	Procédure psychophysique II.....	86
4.3.	Présentation des résultats .....	88
4.3.1	Procédure psychophysique I.....	88
4.3.2	Procédure psychophysique II.....	93
4.4.	Discussion des résultats.....	100
4.4.1	Influence de la modulation.....	102
4.4.2	Influence de la procédure psychophysique.....	102
4.4.3	Seuil absolu de perception : Procédure I.....	104
4.4.4	Seuil absolu de perception ; Procédure II.....	105
4.5.	Conclusions du chapitre .....	105

### **4.1. Introduction**

Dans ce chapitre, on expose la description des tests consacrés à la mesure du seuil absolu de perception vibratoire de sujets en position assise, soumis à des mouvements dans le sens vertical.

Tout d’abord, les stimuli, les procédures psychophysiques ainsi que tous les aspects liés aux expériences seront décrits. Ensuite, on présentera l’analyse des données obtenues lors des essais, la discussion des résultats et finalement, quelques conclusions du chapitre.



## **4.2. Mesure du seuil absolu de perception. Description des expériences**

Afin d'examiner l'effet de masquage, la différence entre le seuil absolu et masqué est requise, donc les deux seuils ont été estimés.

Dans tous les tests, les stimuli sont de type vibratoire, dans la direction verticale (axe z, Figure 2.5c) et transmis seulement grâce à la surface de support du siège du banc d'essais.

Le paramètre physique utilisé pour évaluer le niveau d'exposition aux stimuli vibratoires est l'accélération en termes de la mesure moyenne r.m.s. (la racine de la moyenne du carré, en dénomination anglaise). La mesure moyenne r.m.s. est la méthode conseillée pour la quantification de l'exposition humaine aux vibrations conformément à la norme internationale [INT 97]. L'accélération est exprimée en  $[m/s^2]$  et aussi en décibels [dB] avec la référence de  $10^{-6} m/s^2$  :

$$\text{accélération [dB]} = 20\text{Log}_{10}(\text{accélération [r.m.s.]} / 10^{-6})$$

La plage de variation des fréquences utilisées a été entre 10 et 80 Hz ; dans cette gamme (voir Figure 3.5), l'influence des mouvements autres que dans la direction verticale, peut être négligée.

### **4.2.1 Description des stimuli.**

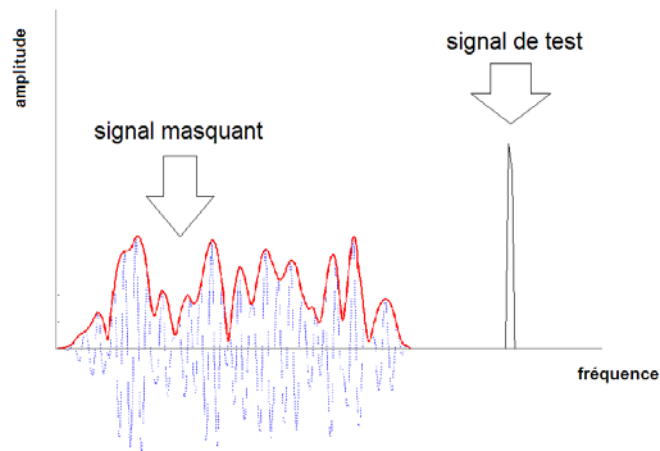
Lors des expériences, deux types de stimuli ont été considérés : celui de test et celui de masquage.

Le signal de test ou le stimulus à détecter, c'est un signal mono-fréquentiel. Les fréquences de test sont : 30, 35, 40, 50, 60 et 80 Hz.

La sélection du stimulus de masque a été fondée sur le modèle de masquage qui a été largement étudié dans les domaines tels que le vibrotactile, la communication visuelle et l'acoustique ([BB 66], [ZF 81], [GVV 82], [HVZ 83], [HES 86], [GBV 89], [SS 06]). Gescheider et al. [GBV 89] et Hamer et al. [HVZ 83] ont rapporté que l'effet de masquage est plus importante en utilisant un masque de type bruit par rapport à l'effet d'un masque de type sinusoïdal.

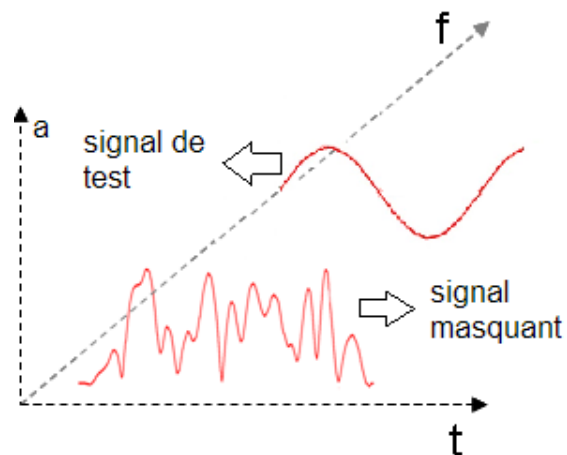
Dans le cas de cette étude, un signal masquant de type sinusoïdal aurait conduit à une modulation d'amplitude de l'ensemble (masquant+signal de test), donc à une détection. Pour éviter cela, on utilise un masque de type bruit de bande étroite.

La Figure 4.1 illustre un exemple du spectre du signal masquant et de test, qui ont été délibérément exagérés afin de souligner les caractéristiques de chacun.



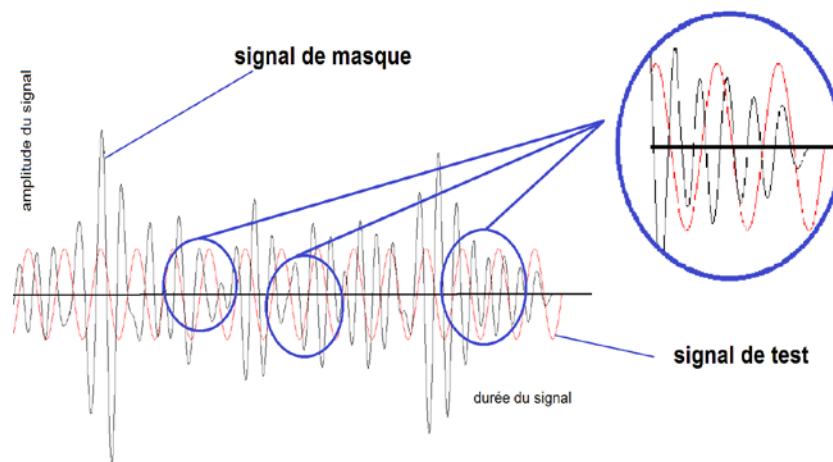
**Figure 4.1** Exemple du spectre des signaux masquant et de test.

Dans la Figure 4.2 ces signaux sont encore illustrés dans l'espace fréquentiel (f) et temporel (t).



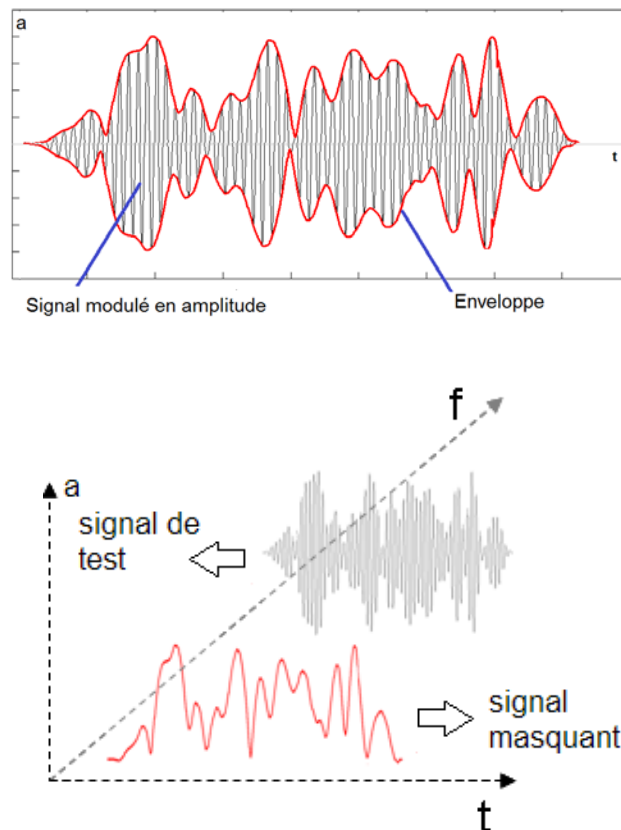
**Figure 4.2** Représentation des signaux de masque et de test dans l'espace temporel.

La Figure 4.3 montre un exemple de la superposition (dans l'espace temporel) des signaux de test et de masque.



**Figure 4.3** Exemple de la superposition (dans l'espace temporel) des signaux de test et de masque.

Afin d'éviter le risque de détection dû le creux des signaux (illustré dans la Figure 4.3) et la largeur de bande du signal de masque (bande étroite), le signal de test (sinus d'amplitude stationnaire) a été multiplié par le contour ou l'enveloppe du signal masquant (ligne rouge dans la Figure 4.1). Par conséquent, le stimulus de test est un signal sinusoïdal modulé en amplitude, d'où l'étape de mesure du seuil de ce sinus modulé (les données disponibles à la bibliographie concernent sinus d'amplitude stationnaire). La Figure 4.4 illustre l'effet de cette modulation.



**Figure 4.4** Exemple du signal de test modulé en amplitude.

Le contour du signal de masquage qui a été utilisé par la modulation, est toujours exactement le même, c'est-à-dire tous les signaux de test ont été modulé par le même contour.

Le signal de masque a été généré avec une distribution normale et pseudo-aléatoire entre 10 et 20 Hz ; la sélection de la largeur de bande ainsi que les fréquences limites a été arbitraire.

La modulation du signal de test offre deux aspects d'avantages : d'une coté, minimise le risque de «démasker» le stimulus de test. De l'autre coté,

permet d'établir une relation entre les niveaux des signaux, laquelle facilite le réglage des paramètres d'initiation de façon identique pour tous les sujets lors des tests.

La durée des stimuli de test et de masque est 2.0 secondes (y compris 0.05 secondes de fading sinusoïdal). L'amplitude de départ, est préréglée au début en fonction du but du test.

Le seuil absolu de perception vibratoire de sujets en position assise, soumis à des mouvements dans le sens vertical, a été estimé en utilisant deux procédures psychophysiques. La procédure I comprend le paradigme oui/non avec la méthode PEST. La description précise des règles et tous les aspects concernant cette procédure sont exposés au Chapitre 3, section 3.3.1.

En utilisant la procédure I la tâche impliquée limite son application aux expériences où la réponse du sujet est uniquement "oui" ou "non". Avec cette caractéristique, le seuil absolu peut être certainement estimé mais le seuil masqué pas forcément.

Afin d'estimer le seuil absolu et masqué avec les mêmes conditions, y compris la procédure, a été sélectionnée la procédure II. Celle-ci comporte le paradigme de trois alternatives de sélection forcée (acronyme anglais, 3AFC) avec la méthode 1Up-3Down.

Dans cette procédure, la tâche convient mieux pour tous les deux expériences de mesure du seuil : l'absolu et le masqué. Au Chapitre 3, section 3.3.2., l'exposition détaillée des éléments qui encadrent cette procédure ont été présentés.

Lors de toutes les expériences décrites dans ce chapitre, aucune information en relation aux réponses "correcte" (feedback) des tests n'a été fournie aux sujets.

#### **4.2.2 Procédure psychophysique I**

En utilisant la procédure I, le seuil absolu de perception vibratoire a été estimé avec la participation de 11 sujets (4 féminins et 7 masculins). Tous les sujets étaient étudiants ou personnel au laboratoire, en bonne santé et sans expérience préalable de test psychophysique vibratoire. Chaque sujet a suivi trois répétitions à chaque fréquence (totale 9 sessions), pendant différents jours ; l'ordre des tests a été randomisé pour minimiser l'influence de la séquence de présentation. Le Tableau 4.1 présente quelques caractéristiques anthropométriques des participants :

<b>Caractéristiques</b>	<b>Range</b>
Poids (min ; max) [Kg]	(51 ; 85)
Taille (min ; max) [m]	(1.53 ; 1.87)
Âge (min ; max) [ans]	(21 ; 46)

**Tableau 4.1** Caractéristiques anthropométriques des participants

Dans le paradigme oui/non, la tâche du sujet consiste à répondre «oui», si au moment de l'application du stimulus, il est clairement perçu ; et «non», si le stimulus n'est pas perçu.

À l'écran d'interface visuelle, laquelle est montré dans la Figure 4.5, on présente un indicateur de présentation du stimulus (bouton signal), ce qui change de couleur une fois que le stimulus est passé.

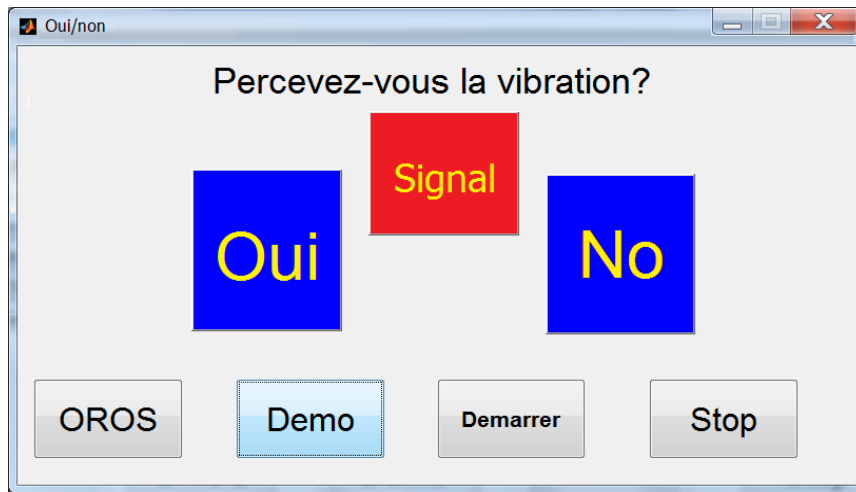


Figure 4.5 Interface visuelle de la Procédure I.

Le bouton oros facilite la calibration du signal au début de chaque essai. Un signal sinusoïdal est exercé ; à partir du niveau mesuré l'amplitude du signal peut être réglée grâce au potentiomètre de l'amplificateur.

Le bouton demo facilite l'explication de la tâche du test. Moyennant ce bouton un signal de test (à un niveau clairement perceptible) est envoyé, puis les consignes de test sont indiquées.

Les boutons démarrer et stop, sont utilisés afin de lancer et d'arrêter le test, respectivement.

Le stimulus de test est un signal sinusoïdal, d'amplitude stationnaire et de fréquence 30, 35 ou 40 Hz. La durée du stimulus est de 2 secondes. Les niveaux de départ des stimuli ont été fixes à 75 dB ( $0.005 \text{ m/s}^2$ ) pour la série ascendante et à 100 dB ( $0.1 \text{ m/s}^2$ ) pour la série descendante. Le pas de départ a été fixé à 1 dB, et le changement de niveau suit la méthode PEST (exposée au Chapitre 3, section 3.3.1). La sélection du pas, à été basé sur la différence



de niveau à peine perceptible pour un signal sinus (environ 1.5 dB [BEL 02] et 1 dB [MG 00], [FOR 09]).

Pour chaque test, le seuil individuel a été estimé avec la moyenne des quatre dernières valeurs pour lesquelles la réponse est différente de la réponse à l'essai précédent de la même série après 10 inversions (pour chacune des séries). Les résultats individuels des sujets ont été calculés avec la médiane des trois répétitions à chaque fréquence. Finalement, le seuil absolu a été déterminé avec la médiane des résultats individuels correspondant à chaque fréquence.

#### **4.2.3 Procédure psychophysique II**

En utilisant cette deuxième procédure psychophysique, le seuil absolu de perception vibratoire a été estimé. Dans ces expériences, 10 sujets (3 féminins et 7 masculins) ont participé, dont sept faisaient partie du groupe des sujets de l'expérience décrite dans la section 4.2.2. Le groupe de sujets, étaient étudiants ou personnel au laboratoire, en bonne santé (trois d'entre eux sans expérience préalable de test psychophysique vibratoire). Les valeurs minimales et maximales du poids, de la taille et de l'âge des participants, sont les mêmes qui ont été résumés dans le Tableau 4.1.

Dans le paradigme 3AFC, trois intervalles séquentiels sont présentés aux sujets lors d'un essai : deux de ces intervalles sont nuls (pas signal) et le troisième intervalle, comprend le stimulus de test.

L'apparition de l'intervalle qui comprend le stimulus de test est totalement aléatoire. La tâche des sujets est d'identifier l'intervalle qui comprend le stimulus de test. Chaque intervalle est accompagné d'un indicateur visuel de

sa présentation (voir la Figure 4.6), la couleur change une fois que l'stimulus est passé. Les boutons oros, demo, demarrer et stop exécutent la même fonction que dans la procédure I (plus précisément expliqué dans la section 4.2.2). En utilisant une souris placée très proche au sujet, celui-ci peut indiquer sa réponse.

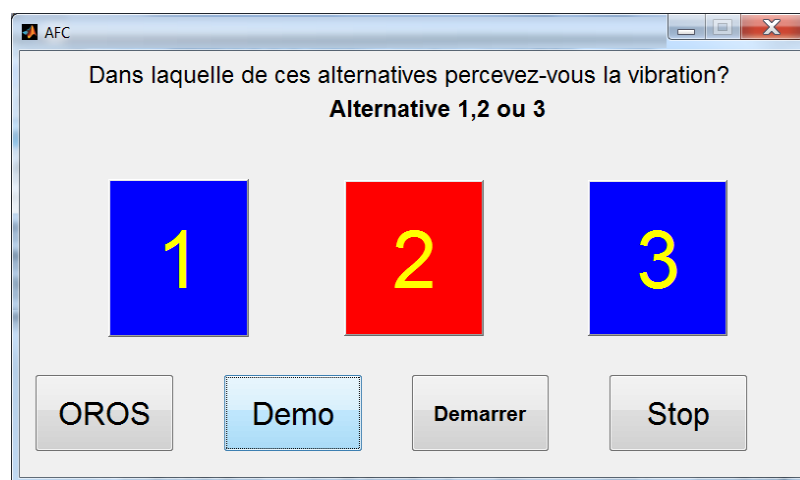


Figure 4.6 Interface visuel de la Procédure II.

En utilisant la procédure II, les expériences ont été développées en deux parties : lors de la première, le stimulus de test est un signal sinusoïdal, d'amplitude constante et aux fréquences 30, 35, 40, 50, 60 ou 80 Hz.

Lors de la deuxième partie, afin d'analyser l'effet de la modulation, le stimulus de test est également un signal sinusoïdal, mais modulé en amplitude aux fréquences 35 et 60 Hz. La sélection des fréquences du signal ne répond à aucun critère particulier. Au cours de toutes les expériences avec la procédure II, la durée du stimulus est de 2 secondes et la durée entre chaque alternative, est de 0.5 secondes.

Le niveau de départ du stimulus, a été fixé à 100 dB ( $0.1 \text{ m/s}^2$ ). Le pas de départ est 4 dB (jusqu'à la dixième présentation), et le changement de niveau suite la méthode 1Up-3Down, décrite plus précisément au Chapitre 3, section 3.3.2.

La procédure s'arrête après 10 inversions (excluant les deux premiers) puisque le pas d'arrêt prend la valeur de 1 dB. La valeur individuelle du seuil a été estimée avec la moyenne des quatre dernières inversions. Le seuil absolu a été déterminé avec la médiane des résultats individuels par chaque fréquence.

Afin de minimiser l'influence de la séquence de présentation, l'ordre des tests a été aléatoire. Chaque sujet, a suivi un test par jour. Six sessions ont été consacrées à la première partie (mesure du seuil), deux à la deuxième partie (l'effet de la modulation).

### **4.3. Présentation des résultats**

#### **4.3.1 Procédure psychophysique I.**

Le développement typique des expériences décrites dans la section 4.2.2 est illustré à la Figure 4.7. En général, la durée de chaque mesure est d'environ 8 minutes (50 présentations approximativement).

Dans tous les tests, on observe qu'après un certain nombre de présentations, les séries ascendantes et descendantes convergent vers une zone qui contient la valeur de seuil estimé.

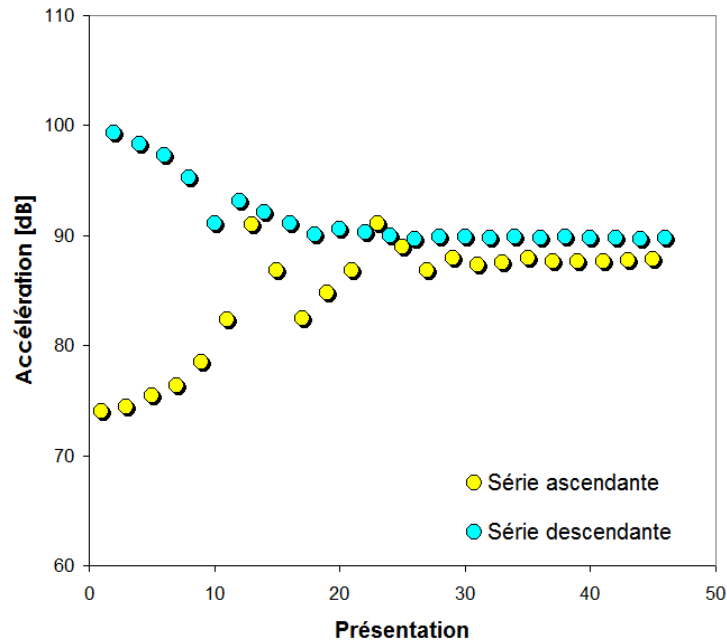
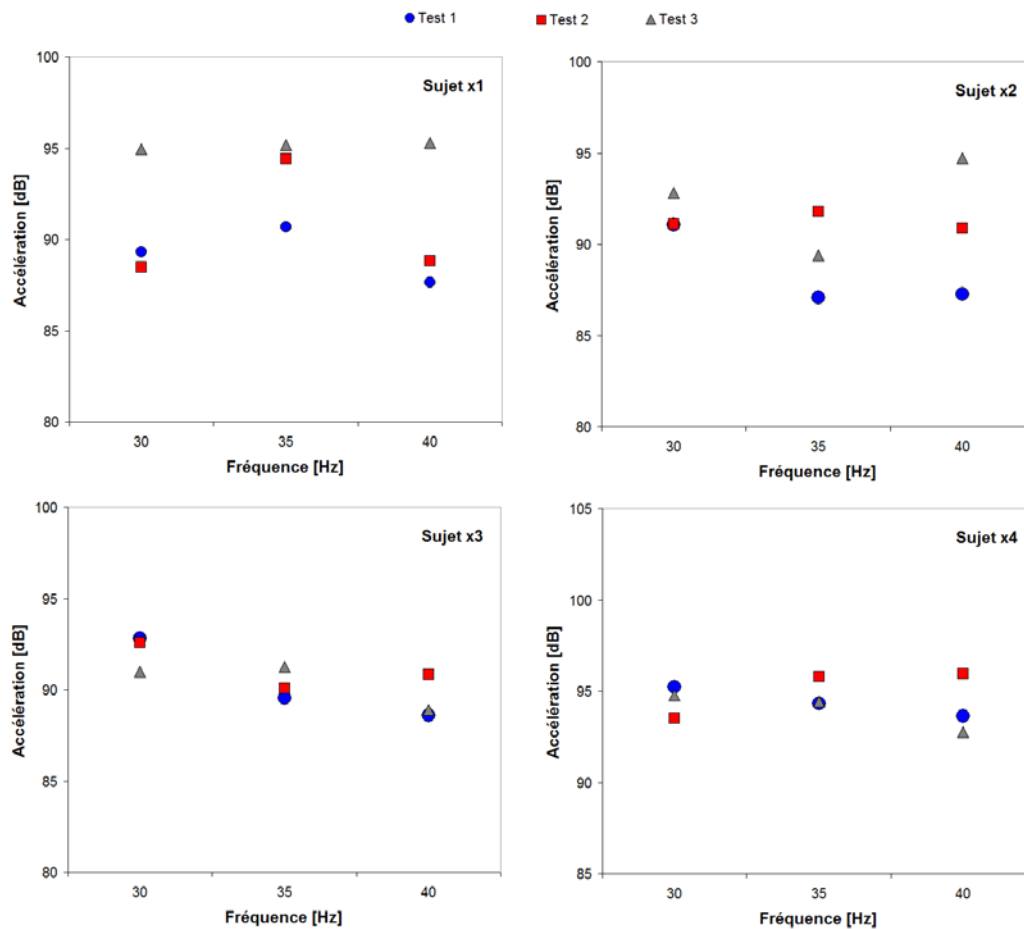


Figure 4.7 Développement typique des expériences en utilisant la procédure I.

Tous les sujets qui ont participé aux expériences de mesure, ont effectués trois répétitions (dénommées test 1, 2 et 3) pour chacune des fréquences. Le seuil estimé pour certains sont affichés dans la Figure 4.8.

On remarque que la plus part des valeurs des seuils estimés pour le même sujet au cours des trois tests, ne sont pas identiques ; cette condition est similaire pour les 11 sujets.

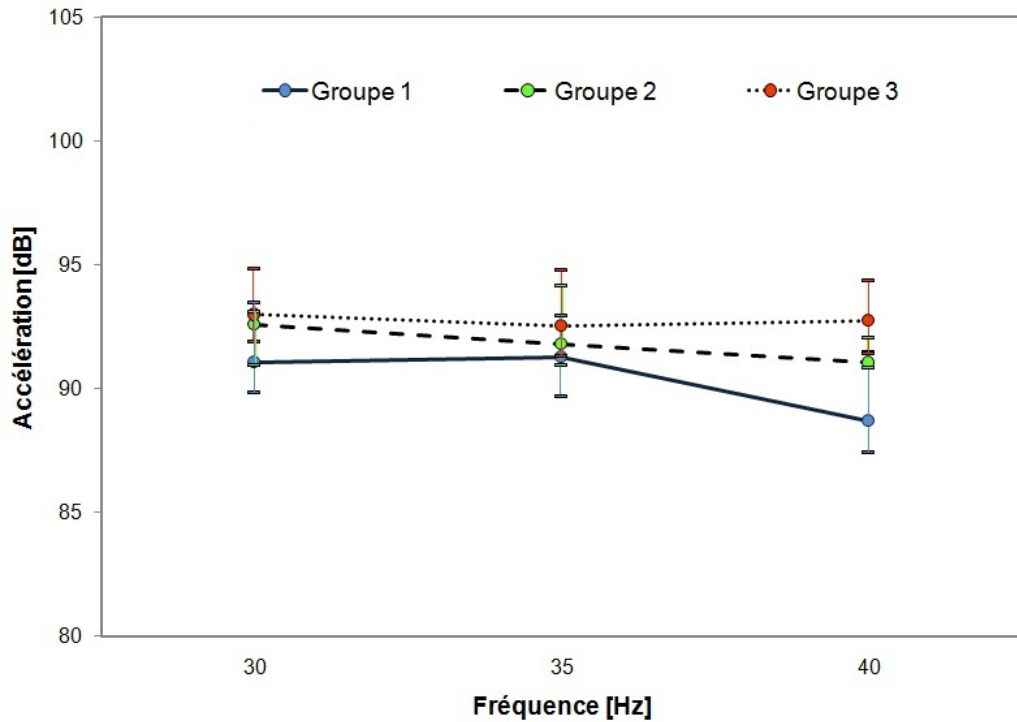


**Figure 4.8** Seuil absolu de perception estimé pour des sujets sélectionnés.

Il est difficile pour les sujets de conserver une même posture par toute la durée de l'expérience (certains l'ont exprimé directement), malgré la consigne qui lui est donné. Il est possible que ces petites variations entraînent une variabilité de détection intra individuelle.

L'ensemble de tests conduisant à une courbe de seuil a été dénommé "groupe". En vue d'éviter quelque influence de l'ordre de passage sur la réponse, l'ordre a été délibérément réglé pour empêcher toute répétition de la séquence de test.

Trois groupes ont été considérés ; dans la Figure 4.9 la médiane et l'intervalle interquartile (25-75 percentiles) des seuils estimés concernent les groupes 1, 2 et 3 sont affichés.



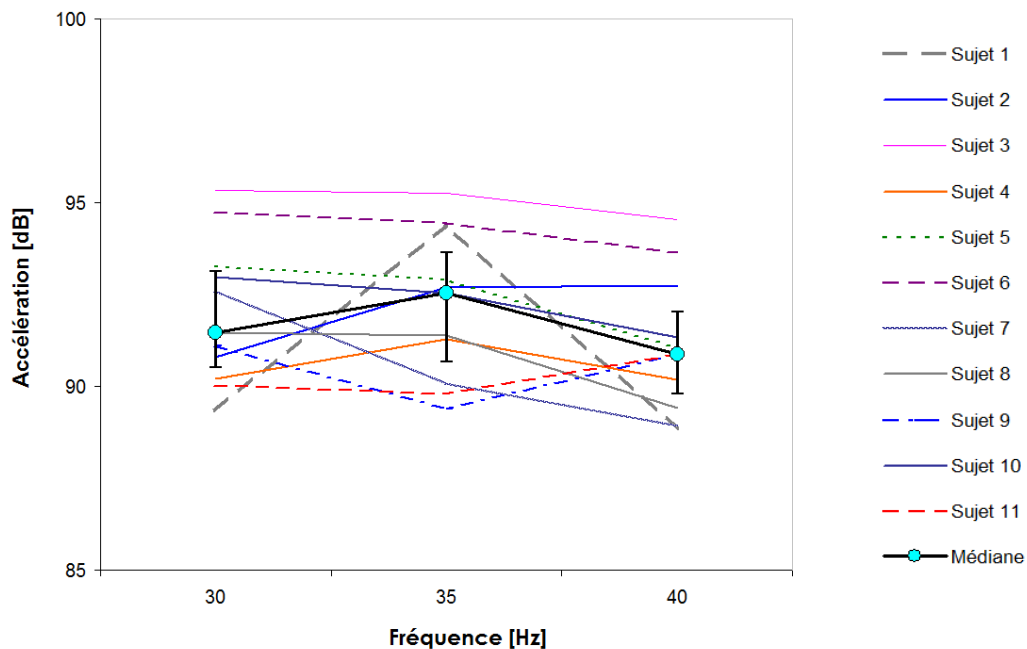
**Figure 4.9** Seuil absolu de perception (la médiane et l'intervalle interquartile (25-75 percentiles)) estimé pour les trois groupes de test.

On n'a pas détecté un effet de l'ordre de passage (apprentissage). Dans le cas où l'apprentissage influe sur le test, la réponse sera anticipée, donc la tendance sera à la baisse du seuil. En revanche, les résultats obtenus ne montrent pas ce type de tendance.

Dans les résultats montrés à la Figure 4.9 on observe une légère dispersion à 40 Hz. On n'a pas pu mettre en évidence des différences significatives sauf entre le test 1 et 3 à 35 Hz (environ 1 dB), 1 et 2 et 1 et 3 à 40 Hz (environ 2

dB et 4 dB respectivement). Ces résultats suggèrent que la variabilité intra-individuelle peut influencer la valeur finale du seuil individuelle, si celui est calculé à partir de trois répétitions.

Les valeurs estimées par chacun des sujets, la médiane et l'intervalle interquartile (25-75 percentiles) du seuil absolu de perception, sont présentés à la Figure 4.10.



**Figure 4.10** Les valeurs individuelles, médiane et l'intervalle interquartile (25-75 percentiles) du seuil absolu de perception.

On remarque en général, qu'ils existent certaines différences entre les valeurs des seuils individuels à toutes les fréquences. Quelques sujets montrent différents niveaux de sensibilité à la même fréquence (par exemple les sujets 1 et 6 à 30 et 40 Hz) et cependant, une sensibilité très proche à d'autres fréquences (sujets 1 et 6 à 35 Hz). On n'observe pas une tendance particulière des seuils individuels par rapport à la fréquence.

En raison des résultats de [PAR 81], toute influence du genre du sujet a été exclu. Pourtant, la variabilité interindividuelle peut être liée à la biomécanique du corps de chaque sujet : les légères différences de taille, de poids ou de posture peuvent affecter la réponse aux vibrations ([FG 89], [HLL 00]).

A partir de la médiane du seuil, on observe une légère diminution de la sensibilité à 35 Hz, cependant on n'a pas trouvé évidence de changement significatif (Wilcoxon,  $p > 0.05$ ). L'influence de la fréquence à 30, 35 et 40 Hz est très faible ; le même effet a été observé par d'autres auteurs ([MCK 72], [PG 88], [BEL 02], [MG 08]).

#### ***4.3.2 Procédure psychophysique II.***

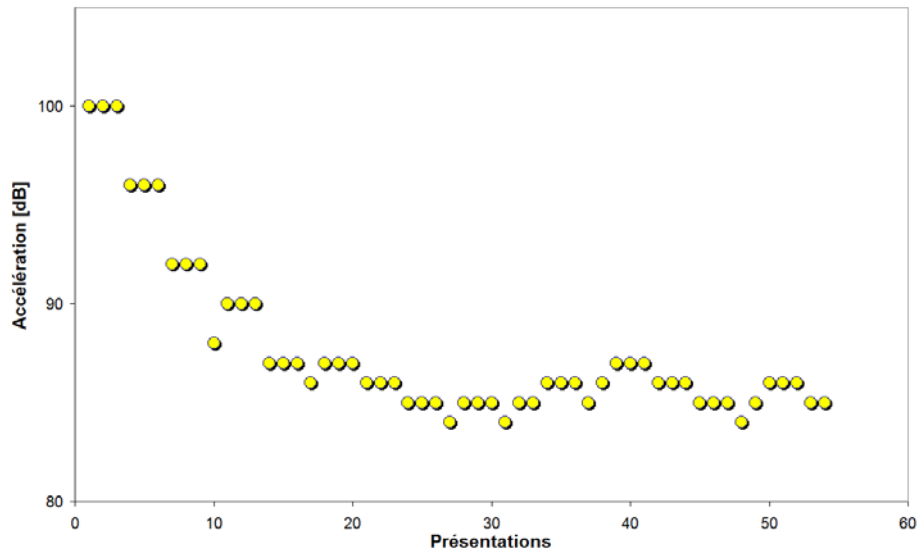
##### **Première partie : stimulus d'amplitude stationnaire.**

La Figure 4.11 montre le développement typique des expériences décrites dans la section 4.2.3 (première partie). La durée de chaque mesure est d'environ 15 minutes ou 70 présentations.

Les dix premières présentations, sont considérées comme une période de familiarisation avec la procédure ; cette période a été délibérément incluse, laquelle vise à assurer la compréhension de la tâche lors du test.

Après la période de familiarisation, on observe que les valeurs d'amplitude se concentrent dans un intervalle large d'environ 5 dB. L'analyse attentive du développement des mesures offre information précieuse concernant la compréhension, la concentration et l'attente des sujets lors du test.





**Figure 4.11** Développement typique des expériences en utilisant la procédure II (premier partie).

Pour la plupart des sujets, on observe que la diminution du niveau du signal de test s'effectue progressivement jusqu'à la zone la plus probable d'emplacement du seuil. La Figure 4.12a) affiche un exemple des tests avec cette évolution ; ce type de développement peut être associé à une claire compréhension de la tâche ainsi qu'à un état de concentration élevée. La durée de ces mesures est plutôt prolongée.

On a observé une deuxième tendance lors des analyses, un exemple est montré à la Figure 4.12b). En général, dans ce type de test, il y a des présentations où l'alternative sélectionnée ne correspond pas à la réponse correcte (comme exemple, voir la septième présentation à la Figure 4.12b), mais cette «erreur» est immédiatement corrigée dans les présentations ultérieures.

La correction est mise en évidence par la diminution immédiate (progressive) du niveau du signal de test, jusqu'à la zone du seuil. Cette tendance suggère une claire compréhension de la tâche et d'un état de concentration élevé mais, ponctuellement affecté par certains éléments de distraction. La durée, est prolongée en raison de présentations additionnelles après la correction.

Par ailleurs, on a détecté un développement atypique, ce qui se répète dans la plupart des résultats d'un sujet précis (genre masculin) ; la Figure 4.12c) montre ce type de développement. Lors des tests, il y a un comportement erratique dans lequel les réponses du sujet est très variable pour un même niveau de stimulus. De plus, il n'existe pas une zone claire de convergence du seuil ; cependant, le test s'arrête grâce aux conditions imposées par la méthode. La durée de ces mesures est généralement inférieure à la durée des séries décrites précédemment. Généralement, ce type de tendance erratique conduit à de valeurs des seuils plus élevées, en raison des activités distrayantes ou un manque de conscience du mouvement [GRI 90].

Les autres causes de fluctuation sont liées aux variations d'attitude du sujet face à la tâche ainsi qu'à un probable processus mnémorique [BON 86]. Si on considère une très faible sensibilité aux stimuli présentés, cela n'explique pas la forte variabilité des réponses lors des tests.

En fonction de cette analyse, les données du sujet qui a montré ce développement erratique ne sont pas prises en considération pour le calcul final du seuil de perception avec la procédure II. L'estimation se fera donc à partir des réponses de neuf (9) sujets.

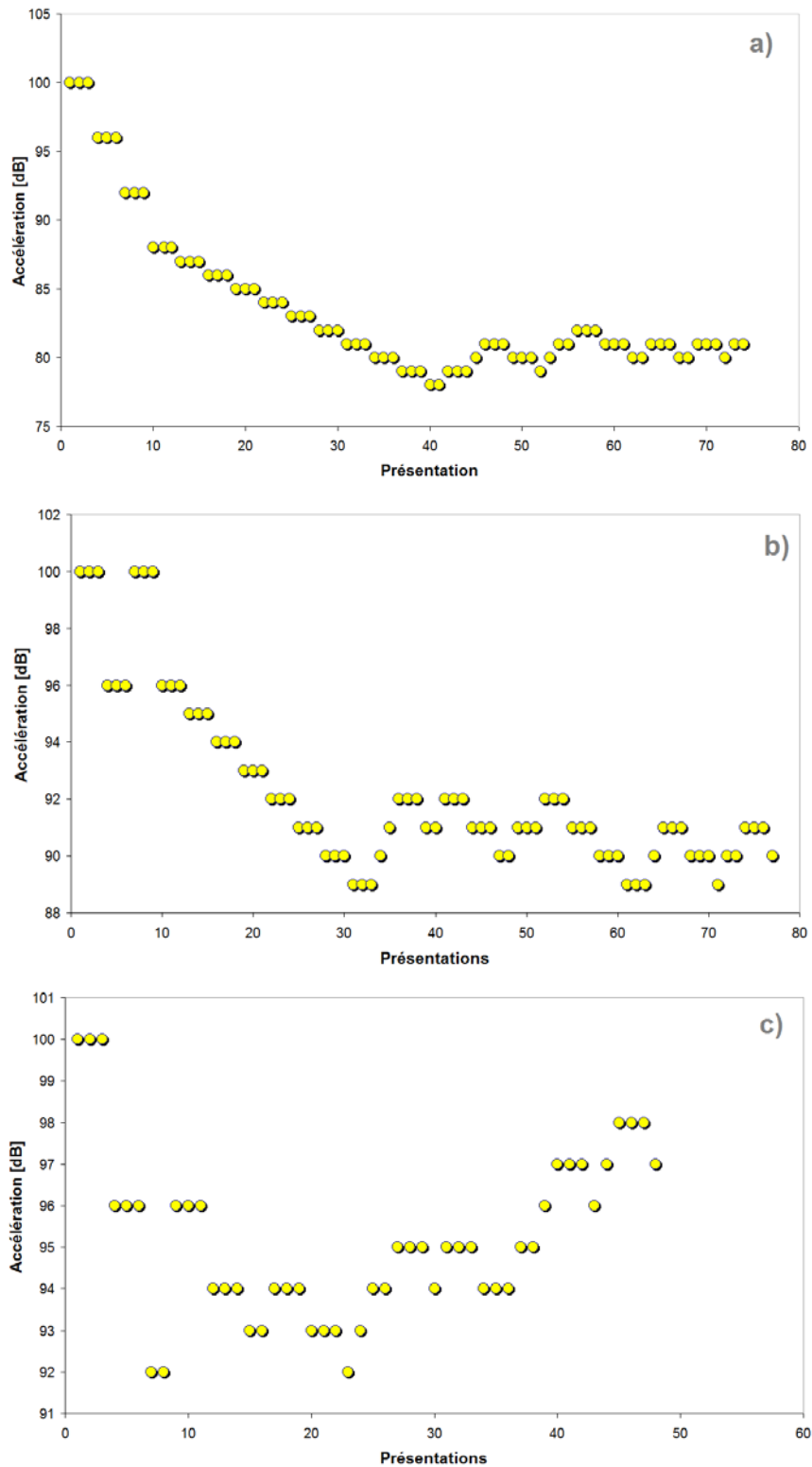
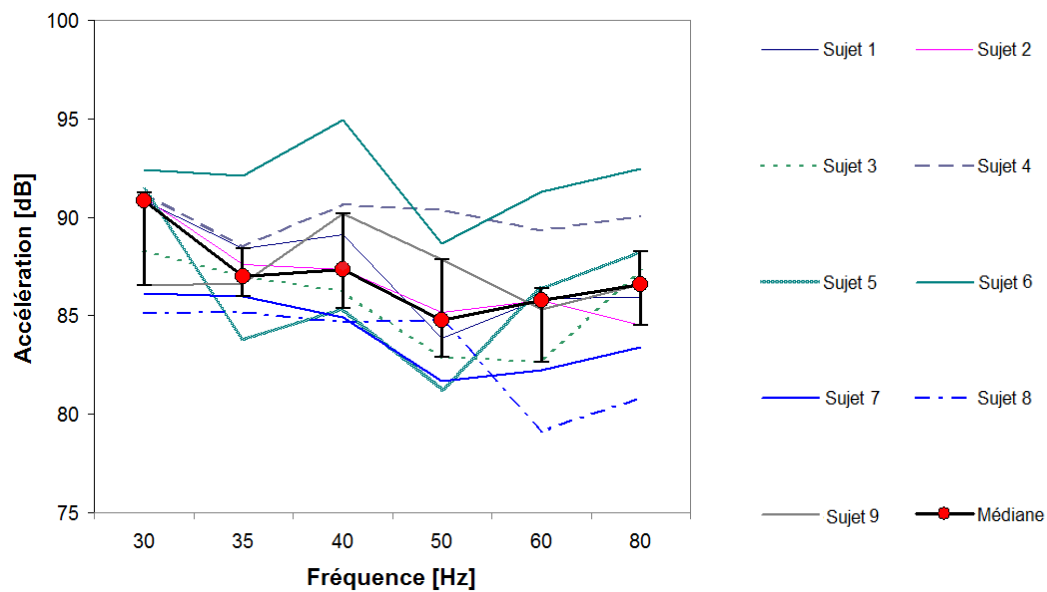


Figure 4.12 Tendances des tests en utilisant la procédure II (premier partie).

Finalement, le seuil absolu a été déterminé avec la médiane des résultats individuels de neuf (9) sujets (3 féminins et 6 masculins) à chaque fréquence. Le seuil absolu de perception, la médiane et l'intervalle interquartile (25-75 percentiles) sont présentés à la Figure 4.13.



**Figure 4.13** Les valeurs individuelles, médiane et l'intervalle interquartile (25-75 percentiles) du seuil absolu de perception en utilisant la procédure II, premier partie.

On constate certaines différences entre les valeurs des seuils individuels, dans tout le rang des fréquences. Quelques sujets montrent des sensibilités très différents à certaines fréquences et très proche à d'autres (exemple les sujets 5 et 6). L'influence du genre du sujet n'a pas été considérée, en raison des observations de [PAR 81].

Aucune tendance particulière par rapport à la fréquence n'est mise en évidence dans les résultats individuels.

Tout au long de gamme de fréquences, on observe certaines variations de sensibilité. Les différences (en dB) les plus importantes avec un niveau significatif de 0.05 (\*) et 0.01 (\*\*) sont indiquées au Tableau 4.2.

	30	35	40	50	60	80
30						
35	(*) 3.86					
40						
50	(*) 6.09	(*) 2.23	(*) (**) 2.61			
60	(*) (**) 5.05		(*) (**) 1.57			
80	(*) 4.26					

**Tableau 4.2** Différences de seuil absolu [dB] en utilisant la procédure II, niveau significatif 0.05 (\*) et 0.01 (\*\*).

Le changement de sensibilité le plus significatif a été trouvé entre 30 et 50 Hz. Globalement dans la plage de fréquences étudiées le seuil absolu est d'environ 85 dB.

## Deuxième partie : stimulus modulé en amplitude.

Le seuil absolu de perception a été également estimé en utilisant un signal de test de type sinusoïdal modulé en amplitude à 35 et 60 Hz. Le développement typique de ces expériences est similaire à celui indiqué dans la Figure 4.11.

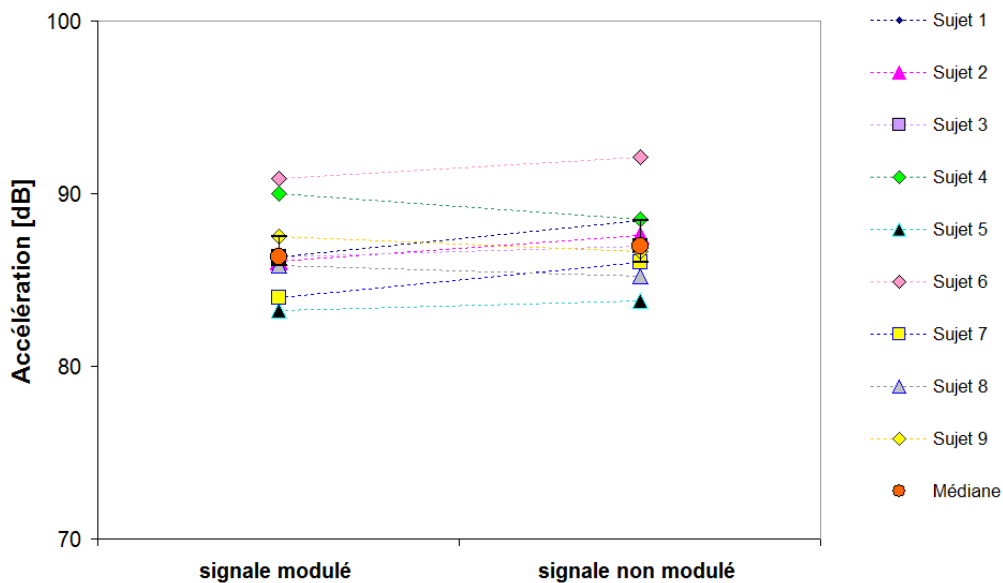
En général, la durée est d'environ 15 minutes ou 70 présentations pour chaque mesure. La période de familiarisation avec la procédure II a été limitée aux dix premières présentations ; cette période permet au sujet de bien comprendre sa tâche.

Globalement, on observe les mêmes types d'évolution des réponses qui sont similaires à celles présentées dans la Figure 4.12.

Finalement, le seuil absolu de perception correspondant à la deuxième partie des expériences a été déterminé avec la médiane des résultats individuels de neuf (9) sujets ; les données du sujet qui a montré un développement erratique ne sont pas prises en considération.

Les seuils individuels, la médiane et l'intervalle interquartile (25-75 percentiles) estimés à 35 Hz sont présentés à la Figure 4.14 ; ceux qui correspondent à 60 Hz ne sont pas affichés, mais la variabilité interindividuelle est similaire.

A manière de comparaison, les seuils absolus individuels estimés lors de la première partie de cette section, sont affichés dans la même figure.



**Figure 4.14** Les valeurs individuelles, médiane et l'intervalle interquartile (25-75 percentiles) du seuil absolu de perception (35 Hz), en utilisant la procédure II, deuxième partie.

À partir des résultats on n'observe presque aucune différence entre les valeurs des seuils individuels : aucune tendance particulière par rapport à la modulation du signal de test n'a été détectée. Il n'existe pas évidence de différence significative (Wilcoxon,  $p > 0.05$ ) entre le seuil estimé avec un signal stationnaire et ceux avec le même signal modulé en amplitude à 35 et 60 Hz.

#### 4.4. Discussion des résultats

Afin de faciliter la visualisation et l'analyse des données, l'ensemble des courbes des seuils absolus de perception déterminés dans le présent chapitre ainsi que d'autres études sont superposées dans la Figure 4.15.

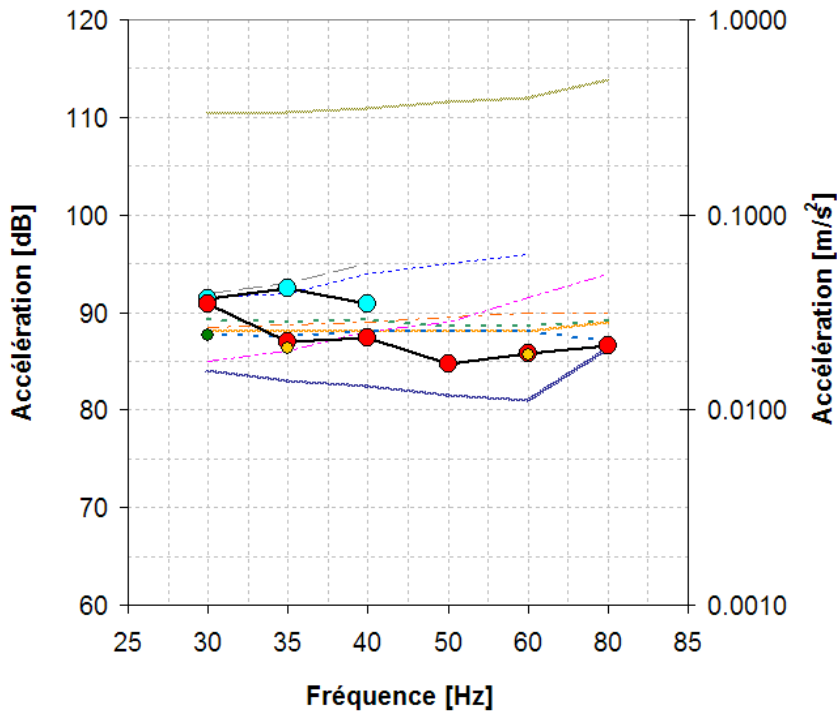
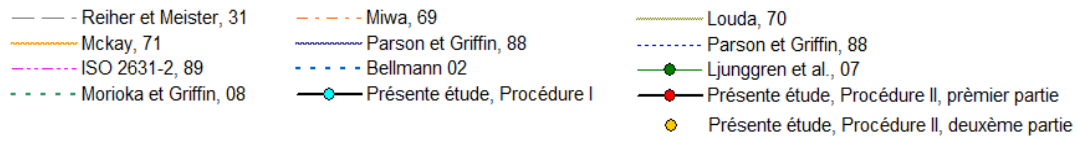


Figure 4.15 La médiane du seuil absolu de perception estimé avec les procédures I et II.

La comparaison explicite des données pourrait conduire à des conclusions erronées, car elles ont été déterminées en utilisant différentes conditions : procédures psychophysiques, stimuli (système de génération du mouvement, type de stimulus, durée), surfaces d'appui pour le corps (appuis pour les bras, la tête, le dos), surface d'appui pour les pieds (stationnaire ou en mouvement), nombre et caractéristiques morphologiques des sujets de test, etc.



La discussion suivante se base sur l'analyse des différences ainsi que similitudes des conditions expérimentaux entre la présente étude et celles qui ont été incluses dans la Figure 4.15. Chaque travail de référence est certainement différent de tous les autres, mais probablement, la contribution précise de chacun peut aider à mieux comprendre les résultats obtenus.

#### **4.4.1 Influence de la modulation.**

En relation à l'effet de la modulation du signal sur le seuil de perception absolu, on remarque que dans la littérature, il n'existe aucune référence à ce sujet.

Afin de vérifier cet effet, dans la deuxième partie des expériences le seuil absolu a été estimé avec un stimulus modulé en amplitude à 35 et 60 Hz. La tendance de données est presque symétrique (voir Figure 4.14). On observe que la reproductibilité du seuil est faiblement affectée par des légères variations des conditions.

L'analyse statistique ne montre pas évidence de différence significative entre le seuil stationnaire et modulé, on peut donc considérer que dans les conditions de cette étude l'effet de la modulation est très faible.

#### **4.4.2 Influence de la procédure psychophysique.**

On observe que le seuil estimé avec la procédure I et II ne sont pas identiques. De façon globale, le seuil obtenu en utilisant le paradigme oui/non avec la méthode PEST, est plus élevés (sauf à 30 Hz) que ce qui a été obtenu en utilisant le paradigme 3AFC avec la méthode 1Up-3Down.

L'influence de la procédure psychophysique sur le seuil a été remarqué par d'autres études : [HES 86] a observé une diminution significative du seuil d'audition masqué obtenu en utilisant la procédure d'alternative de sélection forcé et le oui/non. Cette réduction provient de la possibilité de comparer les intervalles avec le signal de test, ce qui est possible dans la sélection forcée et non pas dans le oui/non.

En relation à l'influence de la procédure, [MG 02c] ont trouvé qu'il existe une variation de 3 à 6 dB dans le seuil de perception vibrotactile due à la procédure psychophysique : le seuil obtenu en utilisant la méthode d'alternative de sélection forcée a été inférieur à ce qui a été estimé avec la méthode oui/non.

On remarque que l'effet de la procédure psychophysique ne peut pas être évalué directement à partir des résultats obtenus, car chaque procédure se base sur une probabilité de réponse correcte différente. La procédure I est basée sur 50 % de réponses correcte, conséquemment est très sensible à la stabilité du critère du sujet.

Par ailleurs on a trouvé que le calcul du seuil individuel à partir de 3 mesures pour chaque fréquence, est nettement affecté par la variabilité intra-individuelle.

L'estimation du seuil en utilisant la procédure II a requis plus de temps par rapport à la procédure I.

Afin d'estimer le seuil absolu de perception [PG 88] on utilisé la théorie de la détection du signal (Figure 4.15, courbe inférieure) et la méthode de

réglage (Figure 4.15, courbe supérieure). L'écart entre les seuils probablement est lié à la probabilité de réponse de chaque procédure psychophysique.

[BEL 02] a souligné que la différence attendue entre deux procédures basées sur 50% et 70.7% de probabilité de réponse correcte, peut être environ 1.5 dB. Dans cette étude la différence la plus importante est d'environ 5 dB à 35 Hz.

#### **4.4.3 Seuil absolu de perception : Procédure I**

En relation à la distribution des données concernant la procédure I, on observe une distribution symétrique à 40 Hz. A 30 et 35 Hz la distribution est légèrement déplacé à l'extrémité inférieure et supérieure, respectivement.

Le seuil absolu de perception déterminé en utilisant la procédure I, semble très proche à la courbe présentée par [RM 31] et à la courbe supérieure exposée par [PG 88] ; cependant, un écart important à 40 Hz approche le seuil à la valeur présenté par [MG 08].

[PG 88] ont déterminé le seuil de perception en utilisant conditions similaires à ceux qui ont été considérées dans cette étude (un support stationnaire pour les pieds et sans appui pour le dos). Le changement de la sensibilité à 40 Hz a probablement un lien avec la variabilité intra-individuel trouvée à cette fréquence.

Les données de la présente étude sont spécialement écartés des courbes présentées par [LOU 70] et [PG 88] (courbe inférieure). C'écart peut être lié à les différences de la posture et de la méthode psychophysique utilisées.

De façon générale, le seuil absolu est faiblement affecté par la fréquence, ce qui semble cohérent avec d'autres études ([MCK 72], [PG 88], [BEL 02], [MG 08]).

#### **4.4.4 Seuil absolu de perception ; Procédure II.**

La distribution des données est variable dans la plage de fréquences. À 30 et 60 Hz, les valeurs se déplacent vers l'extrémité supérieure, cependant dans les autres fréquences la distribution est approximativement symétrique.

Le seuil absolu à 30 Hz est très proche au seuil estimé par [RM 31] et [PG 88] (courbe supérieure). Puis, le seuil est plus proche à l'ensemble des courbes présentées par d'autres études, sauf [LOU 70] et [PG 88] (courbe inférieure). Globalement, le seuil absolu est d'environ 85 dB.

### **4.5. Conclusions du chapitre**

Le seuil absolu de perception a été estimé en utilisant deux procédures psychophysiques : le paradigme oui/non avec la méthode PEST (procédure I) et le paradigme 3AFC avec la méthode 1Up-3Down (procédure II). Globalement, les courbes exposent des valeurs cohérentes avec d'autres études.

Le seuil de perception estimé avec la procédure I en général, montre une faible dépendance de la fréquence. La sensibilité du paradigme oui/non à la variabilité intra-individuelle peut influencer sur l'estimation du seuil.

Le seuil déterminé en utilisant la procédure II, de façon générale est plus basse que ce qu'a été estimé avec la première procédure. Globalement, très faible influence de la fréquence a été observée, la valeur du seuil reste à peu près 85 dB.

La procédure psychophysique a probablement affecté l'estimation du seuil absolu ; cependant, cette influence ne peut pas être évaluée directement à partir des résultats, car chaque procédure se base sur une probabilité de réponse correcte différente.

Malgré la sensibilité de la procédure I, celle-ci offre une mise en œuvre relativement simple et rapide.

La procédure II présente un coût élevé en termes de durée et de complexité d'exécution.

Dans les conditions de cette étude, la modulation de l'amplitude affecte très faiblement le seuil de perception.

# Chapitre 5.

## Seuil masqué de perception

5.1	Introduction .....	107
5.2	Masquage : Influence de la fréquence du signal de test.....	109
5.2.1	Procédure expérimentale.....	109
5.2.2	Résultats .....	112
5.3	Masquage : Influence du niveau du signal masquant.....	117
5.3.1	Procédure Expérimentale. ....	117
5.3.2	Résultats. ....	118
5.4	Différence de niveau à peine perceptible.....	120
5.4.1	Procédure expérimentale.....	121
5.4.2	Résultats. ....	123
5.5	Discussion des résultats. ....	125
5.5.1	Différence à peine perceptible. ....	126
5.5.2	Influence de la fréquence.....	134
5.5.3	Influence du niveau du signal de masquage. ....	138
5.6	Conclusions du chapitre .....	140

### 5.1 Introduction

Au cours de ce chapitre, on décrit les tests conduisant à la mesure du seuil masqué de perception vibratoire pour des sujets en position assise, soumis à des mouvements verticaux.

Toutes les conditions expérimentales telles que le banc d'essai, la procédure psychophysique, les stimuli, le groupe de sujets, etc., sont décrites. Les données sont ensuite étudiées et l'effet de certains paramètres est analysé.

Avant de passer aux descriptions des expériences, il est essentiel d'établir clairement ce qui a été désigné dans ce chapitre comme seuil masqué de perception vibratoire.

Le masquage est défini comme le phénomène dans lequel la perception d'un stimulus « normalement détectable », est empêchée par un « deuxième stimulus » [GRI 90]. Dans le cadre de ce travail, tous les stimuli sont de type vibratoire : le stimulus «normalement détectable» ainsi que le « deuxième stimulus ». Par ailleurs, tous les deux sont appliqués sur le même système sensoriel.

À partir des expériences décrites au Chapitre 4 le seuil absolu de perception vibratoire a été estimé, c'est-à-dire que l'on connaît la valeur limite qui peut être « normalement détectée » dans les conditions précises de l'expérience.

Afin d'évaluer l'effet du stimulus de masquage, le seuil masqué doit être estimé dans les mêmes conditions expérimentales qui ont été prises pour estimer le seuil absolu ; de cette manière, on s'attend à minimiser l'influence de légères différences entre les deux expériences.

En vue d'analyser l'influence de certains paramètres des stimuli sur le seuil, les expériences de mesure sensorielle ont été organisées au cours de trois études. Lors de l'étude I, l'objectif principal porte sur l'influence de la fréquence du signal de test sur le seuil masqué, donc l'amplitude du stimulus de masque reste constante.

Au cours de l'étude II, l'intérêt se concentre sur l'effet du niveau du signal de masque ; en vue d'analyser l'incidence sur le seuil masqué, trois niveaux d'amplitudes sont considérés.

Le niveau global d'énergie au moment de la détection peut être déterminé et analysé en comparant avec le niveau d'énergie attendu. Afin de déterminer ce dernier, il faut connaître la valeur minimale perceptible de changement du signal masquant. En vue d'analyser le phénomène de masquage au moment de la détection, l'étude III porte sur l'estimation de la différence de niveau juste perceptible du signal de masque.

## **5.2 Masquage : Influence de la fréquence du signal de test.**

### **5.2.1 Procédure expérimentale.**

L'objectif principal de cette étude, porte sur l'influence de la fréquence du signal de test sur le seuil masqué. Toutes les expériences incluses dans la présente étude ont été développées en utilisant le paradigme de trois alternatives à choix forcé (acronyme anglais, 3AFC) avec la méthode 1Up-3Down (information au Chapitre 3).

Dans le paradigme 3AFC, trois intervalles séquentiels sont présentés aux sujets lors d'un essai : le stimulus de référence est présent dans les trois, cependant un seul possède en plus le stimulus de test. L'apparition de l'intervalle qui comprend le stimulus de test, est totalement aléatoire. La durée des stimuli de test et de référence, est de 2 secondes et la durée entre deux stimuli est de 0.5 secondes. La tâche des sujets est d'identifier l'intervalle qui est différent des deux autres.



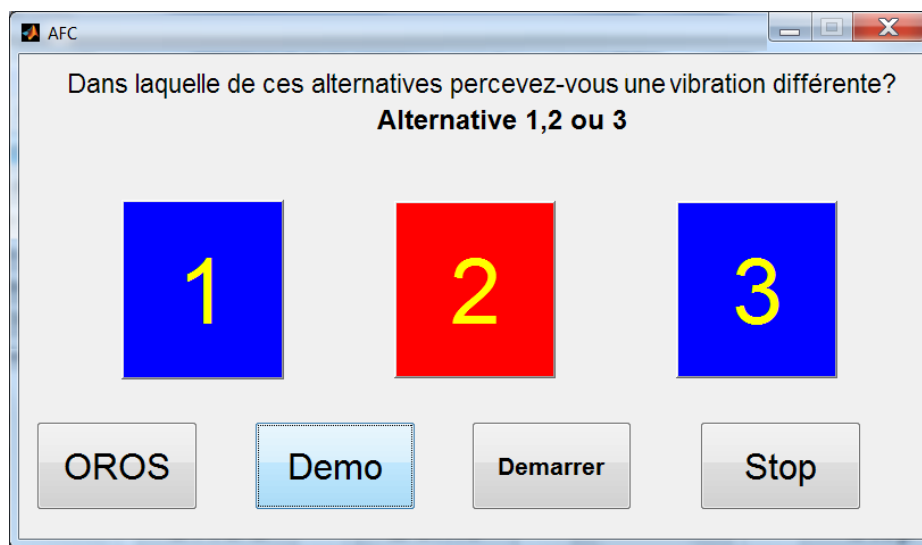
Le stimulus de référence correspond au signal de masquage, lequel est un signal de type bande étroite de bruit, compris entre 10 et 20 Hz, de distribution normale et pseudo-aléatoire. Le niveau du stimulus de référence a été fixé à 110 dB ( $0.31 \text{ m/s}^2$ ), il reste constant lors de tout l'essai. Grâce aux tests préliminaires, il a été vérifié que le niveau sélectionné (110 dB), est clairement perçu.

Le stimulus de test, correspond au même signal de test considéré pour l'estimation du seuil absolu (Chapitre 4, section 4.3.2, deuxième partie). Le signal sinusoïdal, aux fréquences 30, 35, 40, 50, 60 et 80 Hz, a été modulé en amplitude selon ce qui a été exposé au Chapitre 4.

Le niveau de départ du stimulus de test a été fixé à 115 dB ( $0.56 \text{ m/s}^2$ ). Ce niveau, est considérablement plus élevé que le seuil absolu de perception. Cette différence permet une claire identification du signal de test et par conséquent la compréhension de la tâche du test. L'amplitude du signal de test, change au long des essais ; le pas de départ, est de 4 dB (jusqu'à la dixième présentation), le changement de niveau suit les règles imposées par la méthode 1Up-3Down.

Afin d'atteindre le but de cette étude, la question posée aux sujets était : «Dans laquelle de ces alternatives percevez-vous une vibration différente ?». Trois boutons indicateurs de la présentation du stimulus, sont montrés à l'écran d'interface visuelle (voir Figure 5.1) : la couleur des indicateurs change lorsque le stimulus est passé. D'autres boutons liés à la mise en œuvre des essais sont aussi montrés. Grâce à une souris placée très proche, le sujet peut indiquer sa réponse.

La procédure s'arrête après 10 inversions (excluant les deux premiers) puisque le pas d'arrêt prend la valeur de 1 dB. La valeur individuelle du seuil masqué a été estimée à partir de la moyenne des quatre dernières inversions. Le seuil masqué a été déterminé à partir de la médiane des résultats individuels.



**Figure 5.1** Interface visuelle des études I, II et III.

Le seuil masqué de perception vibratoire a été estimé avec la participation de 9 sujets (3 féminins et 6 masculins), ayant participé aux essais exposés au Chapitre 4, section 4.2.3. Tous ces sujets, sont étudiants ou personnel du laboratoire en bonne santé et sans antécédent de maladies dues à l'exposition vibratoire du corps entier. Les catégories de poids, taille et âge, sont identiques à celles présentées au tableau 4.1 du Chapitre 4.

Chaque sujet a effectué un passage pour chaque fréquence (total 6 sessions). Cependant, afin d'analyser la variabilité intra-individuelle, 6 des sujets ont

pris part à une deuxième session (un mois après la première) uniquement à la fréquence 60 Hz.

Tous les essais se sont déroulés des jours différents avec un ordre de passage des tests aléatoire. L'ordre a été rendu aléatoire pour minimiser l'influence de la séquence de présentation. Aucune information sur les bonnes réponses (feedback) n'a été fournie aux sujets.

### 5.2.2 Résultats

Le développement typique des expériences menées lors de l'étude I se présente à la Figure 5.2. En général, la durée de chaque mesure est d'environ 15 minutes (environ 70 présentations).

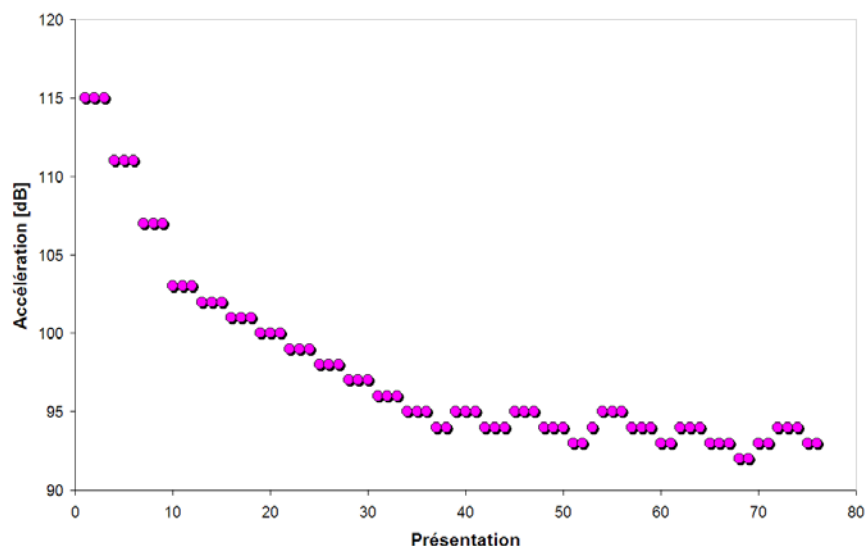


Figure 5.2 Développement typique des expériences, étude I.

Une période de familiarisation avec la procédure a été délibérément incluse (les dix premières présentations). Cette période vise à assurer la compréhension de la tâche lors du test.

Globalement, on observe qu'après la période de familiarisation le test tourne autour d'une bande de valeurs convergeant finalement vers le seuil.

En général, la diminution du niveau du signal de test s'effectue progressivement jusqu'à la zone la plus probable d'emplacement du seuil masqué.

Afin d'analyser la variabilité intra-individuelle, 6 sujets ont pris part à une deuxième session à la fréquence 60 Hz (un mois après la première) ; le seuil masqué individuel ainsi que la médiane de chacune des sessions sont affichés à la Figure 5.3.

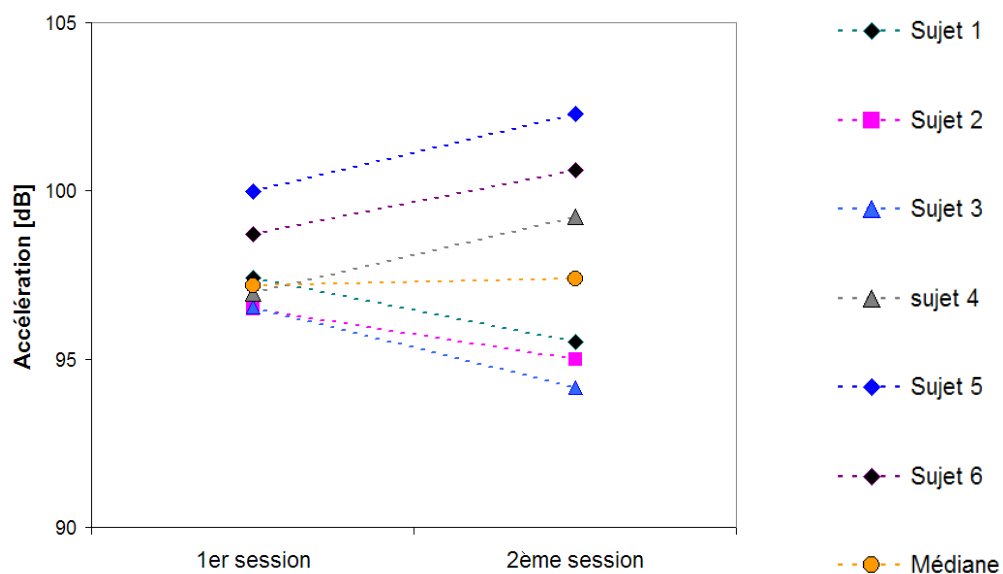
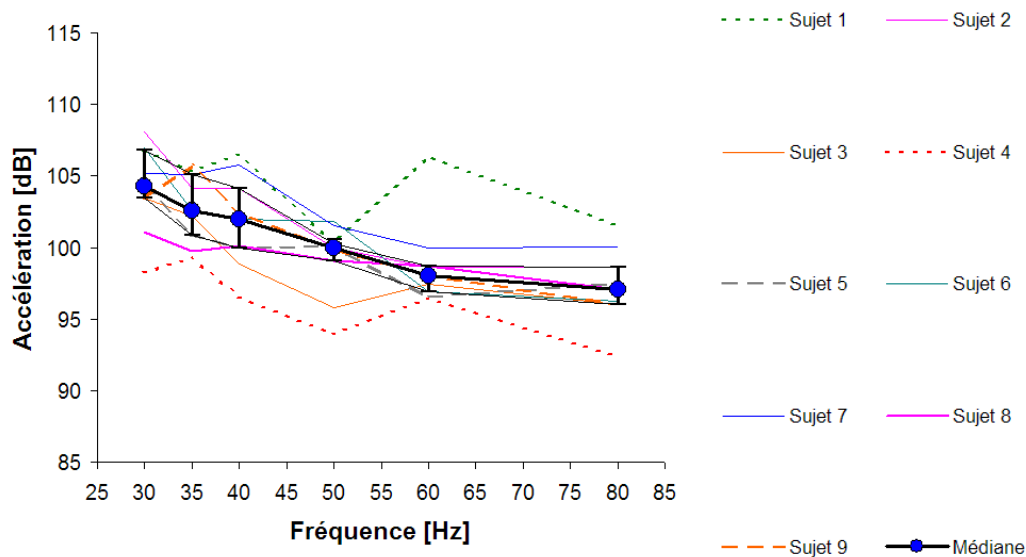


Figure 5.3 Les valeurs individuelles et la médiane du seuil masqué de perception, étude I.

Les résultats n'exposent aucune tendance particulière. Cependant, lors de la deuxième session les valeurs des seuils masqués individuels sont plus dispersés que dans la première session. À partir de l'analyse statistique des données avec un seuil de probabilité de 0.05, on n'a pas trouvé d'évidence de différence significative (Wilcoxon,  $p > 0.05$ ) entre les seuils estimés lors des sessions. On peut donc considérer que l'expérience est suffisamment répétable.

La Figure 5.4 expose le seuil masqué des fréquences de chaque sujet qui a participé à des mesures de l'étude I ; la médiane et l'intervalle interquartile (25-75 percentiles) sont aussi affichés.



**Figure 5.4** Les valeurs individuelles, médiane et intervalle interquartile (25-75 percentiles) du seuil masqué de perception, étude I.

Sur toute la gamme de fréquences, certaines différences entre les valeurs des seuils masqués individuels ont été observées. Bien qu'entre les sujets il existe différents niveaux de sensibilité à la même fréquence, on remarque quelque similarité par rapport à la tendance générale du seuil.

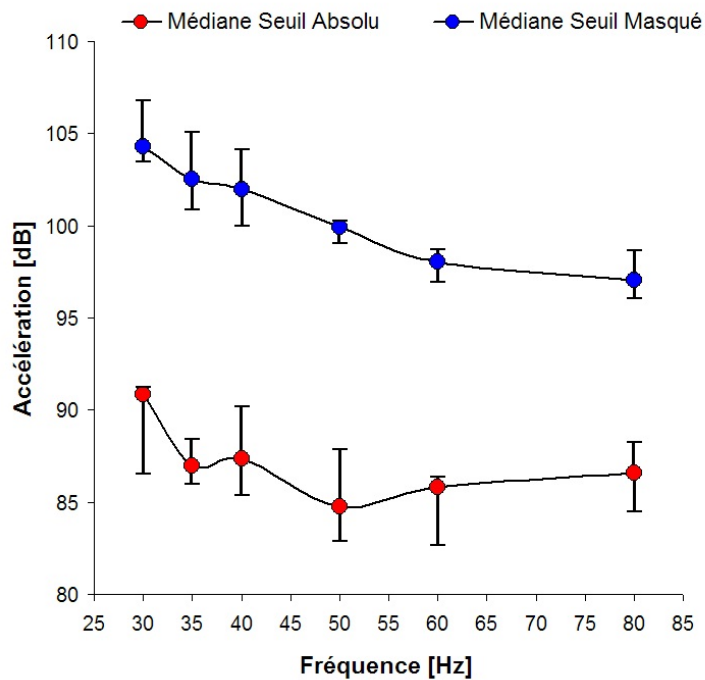
Par exemple, les sujets 1 et 4 exposent les valeurs les plus élevées et les plus faibles, pour toutes les fréquences. Malgré cette évidente différence, les deux courbes du seuil masqué individuel suivent une tendance très similaire.

En raison de la faible taille de la population, l'influence du genre du sujet sur le seuil n'a été pas analysée. Cependant, aucune tendance particulière n'a été observée.

[FG 89], [HLL 00] ont constaté que les différences entre les sujets (la taille, le poids ou la posture) peuvent affecter la réponse aux vibrations, et plus précisément le seuil absolu de perception. Cependant, aucune référence en relation à l'effet sur le seuil masqué n'a été trouvée.

La médiane et l'intervalle interquartile (25-75 percentiles) du seuil masqué estimé lors des expériences décrites dans cette étude sont présentés à la Figure 5.5. Afin de faciliter l'analyse, le seuil absolu de perception estimé au Chapitre 4 a également été affiché.

On a observé que le seuil masqué expose une tendance décroissante. La différence la plus importante (environ 7 dB) a été trouvée entre les valeurs aux extrémités, c'est-à-dire entre 30 et 80 Hz (seuil de probabilité de 0.05, Wilcoxon,  $p < 0.05$ ).



**Figure 5.5** La médiane et l'intervalle interquartile (25-75 percentiles) du seuil masqué, étude I.

Pour chaque fréquence, la différence entre le seuil absolu et masqué est significative (seuil de probabilité de 0.05, Wilcoxon,  $p < 0.05$ ).

En général, le seuil masqué expose des valeurs considérablement supérieures à celles qui correspondent au seuil absolu à la même fréquence ; on a observé que la détection du signal de test en présence du signal de masquage au niveau d'amplitude de 110 dB a été affectée.

### **5.3 Masquage : Influence du niveau du signal masquant.**

#### **5.3.1 Procédure Expérimentale.**

L'intérêt de cette étude s'oriente vers l'effet du niveau du stimulus de masquage sur le seuil masqué. Les expériences ont été développées en utilisant le paradigme de trois alternatives de sélection forcée (3AFC) avec la méthode 1Up-3Down (information au Chapitre 3).

En vue d'analyser l'influence du niveau du signal de masquage (ce qui a été considéré à l'étude I), trois niveaux d'intensité ont été sélectionnés : 100 dB ( $0.1 \text{ m/s}^2$ ), 105 dB ( $0.17 \text{ m/s}^2$ ) et 110 dB ( $0.31 \text{ m/s}^2$ ). A partir des tests préliminaires, il a été vérifié que ces niveaux sont clairement perçus par les sujets.

Le stimulus de test correspond au signal sinusoïdal utilisé à l'étude I de ce chapitre, mais seulement à 35 Hz. Le seuil masqué correspondant à 35 Hz et 110 dB n'est pas encore estimé, celui-ci a été estimé dans les expériences précédentes.

De façon similaire à l'étude I, dans l'étude II le niveau de départ du stimulus de test a été fixé à 115 dB ( $0.6 \text{ m/s}^2$ ). Le pas de départ est également fixé à 4 dB (jusqu'à la dixième présentation), le changement de niveau suit toujours les règles imposées par la méthode 1Up-3Down.



La tâche des sujets est d'identifier l'intervalle qui comprend le stimulus de test, donc la question posée était : « Dans laquelle de ces alternatives percevez-vous une vibration différente ? ». Grâce à l'écran d'interface visuelle, les sujets peuvent choisir l'intervalle de réponse ; l'écran montre une image similaire à celle utilisée lors de l'étude I (voir Figure 5.1).

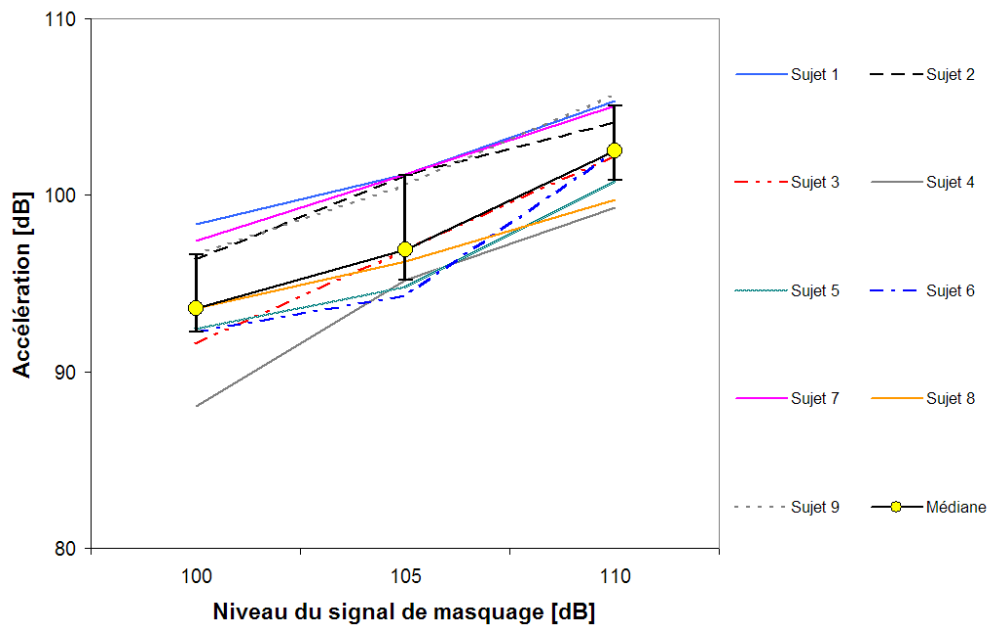
La valeur individuelle du seuil masqué a été estimée de façon similaire à celle décrite dans la section 5.2.1 pour l'étude I. Le seuil masqué, a été estimé avec la participation de 9 sujets (3 féminins et 6 masculins), les mêmes qui ont participé aux essais correspondant à l'étude I.

### **5.3.2 Résultats.**

Le développement typique des mesures lors des expériences menées à l'étude II a été analysé. De façon globale, chaque essai a eu une durée d'environ 70 présentations (ou 15 minutes). Les dix premières présentations concernant l'étape de familiarisation avec la procédure. En général, la performance du test est similaire à celle qui a été exposée dans la Figure 5.2.

Le seuil masqué individuel, la médiane et l'intervalle interquartile (25-75 percentiles) des neuf (9) sujets qui ont participé aux essais correspondant à l'étude II, sont affichés à la Figure 5.6.

On remarque que le seuil masqué individuel est divers, très proche entre certains sujets (par exemple entre les sujets 1, 2, 7 et 9) et très différent pour d'autres (par exemple les sujets 4 et 9). La variabilité inter-individuelle peut être liée à des différences entre les sujets : taille, poids ou posture.

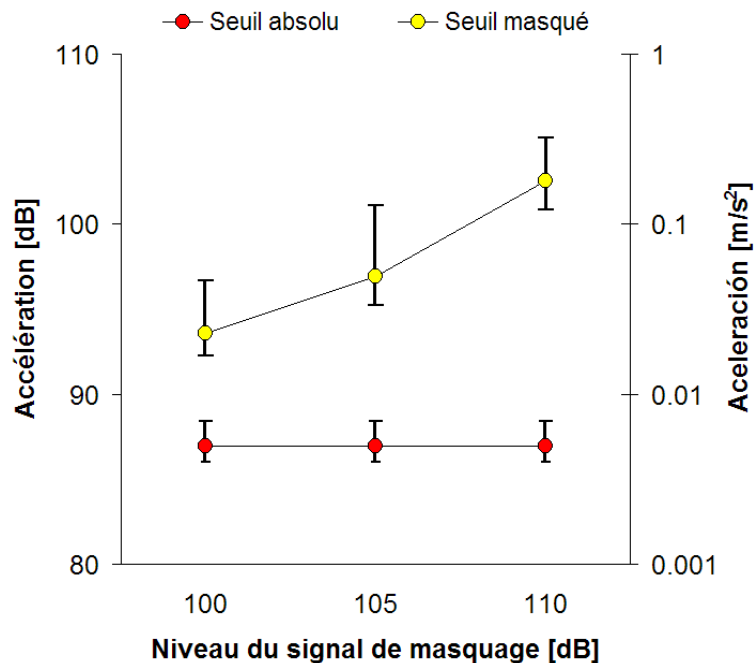


**Figure 5.6** Les valeurs individuelles, la médiane et l'intervalle interquartile (25-75 percentiles) du seuil masqué de perception, étude II.

Dans tous les cas, le seuil masqué expose une claire tendance ascendante, en fonction de l'augmentation du niveau du signal de masquage.

La Figure 5.7 montre la médiane et l'intervalle interquartile (25-75 percentiles) du seuil masqué. En vue de faciliter l'analyse des résultats, le seuil absolu estimé à 35 Hz est aussi affiché.

On observe que le seuil masqué est significativement plus élevé que le seuil absolu (plus de 10 dB) pour les trois niveaux de signal de masquage.



**Figure 5.7** La médiane et l'intervalle interquartile (25-75 percentiles) du seuil masqué, étude II.

En fonction des résultats, on a observé que le niveau du signal de masquage affecte la détection du signal de test à 35 Hz. L'évolution du seuil masqué montre une tendance d'augmentation.

#### **5.4 Différence de niveau à peine perceptible.**

Lors des expériences consacrées à l'estimation du seuil masqué on a implicitement considéré un processus de comparaison entre deux modèles de stimuli. Un des modèles correspond au signal de masquage (ou bruit) et l'autre à l'ensemble « masque + signal de test ». En relation au processus de

détection au moment de démasquage du signal test, une question émerge immédiatement. Est-ce que les sujets détectent la présence du signal test par l'augmentation de l'intensité globale du stimulus ou par une discrimination des deux signaux ?.

Pour répondre à cette question, on s'intéresse à la différence de niveau à peine perceptible du bruit masquant. Aucune référence à ce sujet n'a été trouvée dans la littérature, les données disponibles ne concernant que des signaux sinusoïdaux.

Afin d'estimer la différence de niveau à peine perceptible du bruit masquant, quelques expériences de mesure ont été menées et qui sont expliquées aussitôt.

#### **5.4.1 Procédure expérimentale.**

Afin de déterminer le niveau global d'énergie attendu au moment de la détection, il faut connaître la différence du niveau à peine perceptible du signal de masquage. La différence à peine perceptible est la plus faible variation du niveau du stimulus qui peut être détectée. L'objectif de cette étude porte sur la mesure de cette différence de niveau du signal masquant.

En vue d'estimer cette différence, le paradigme de trois alternatives de sélection forcée (3AFC) avec la méthode 1Up-3Down, a été utilisé (plus d'information au chapitre 3).

Lors du paradigme 3AFC, il y a trois intervalles séquentiels qui sont présentés aux sujets au cours d'un essai. Deux de ces intervalles

comprennent le stimulus de masque ou bruit à trois niveaux différents : 100, 105 ou 110 dB ( $0.1 \text{ m/s}^2$  ;  $0.17 \text{ m/s}^2$  ;  $0.31 \text{ m/s}^2$ , respectivement). Le troisième intervalle comprend le bruit mais à un niveau d'amplitude différent. Lors de l'essai cette amplitude change afin d'estimer la différence minimale perceptible. L'intervalle qui comprend le bruit à un niveau d'amplitude différent apparaît de manière aléatoire. La durée des stimuli est 2 secondes avec 0.5 seconde de pause entre chaque intervalle.

Le niveau de départ du stimulus a été fixé à 108 dB ( $0.25 \text{ m/s}^2$ ) pour le signal de référence de 100 dB, à 112 dB ( $0.39 \text{ m/s}^2$ ) pour le signal de 105 dB, et 115 ( $0.56 \text{ m/s}^2$ ) dB pour le stimulus de 110 dB. Ces niveaux de départ, ont été sélectionnés après vérification d'une claire perception. Le pas de départ a été fixé à 2 dB.

La tâche du sujet est d'identifier l'intervalle qui comprend le stimulus de test, la question posée aux sujets a été : « Dans laquelle de ces alternatives percevez-vous une vibration différente ? ». Le sujet doit choisir l'intervalle de réponse montré à l'écran d'interface visuelle ; la Figure 5.1 montre l'image présentée aux sujets.

La différence absolue à peine perceptible (*DAP*) a été déterminée à partir de la différence entre l'amplitude du stimulus de référence et celle du stimulus de test au point d'inversion :

$$DAP = \frac{\sum_{i=1}^{N=4} |St - Sr|}{N} \quad (\text{Eq. 5.1})$$

où  $N$  correspond au numéro d'inversions,  $St$  et  $Sr$  correspondent aux stimuli de test et de référence, respectivement.

La procédure s'arrête après 8 inversions (en excluant les deux premières) et le pas d'arrêt prend la valeur 0.25 dB. La valeur individuelle a été estimée à partir de la moyenne des quatre dernières inversions ( $N=4$ ). La différence absolue à peine perceptible a été calculée à partir de la médiane des résultats individuels pour chaque niveau du signal de masquage.

Les mesures ont été développées grâce à la participation de 12 sujets (2 féminins et 10 masculins), dont 9 faisaient partie du groupe des sujets qui ont participé aux essais correspondant aux études I et II. Tous les sujets étaient étudiants ou personnel du laboratoire. Les catégories de poids, taille et âge, sont identiques à celles présentées au tableau 4.1, du Chapitre 4). Chaque sujet a suivi un test pour chaque niveau de bruit (totale 3 sessions) dans différents jours. Afin de minimiser l'influence de la séquence de présentation, l'ordre des tests a été aléatoire.

#### **5.4.2 Résultats.**

Le développement typique des expériences effectuées lors de l'étude III, se présente à la Figure 5.8 (plus précisément pour le signal à 100 dB). La durée de chaque mesure, en général, est d'environ 10 minutes (environ 60 présentations).

Dans cette étude, la période de familiarisation a été également limitée aux dix premières présentations. On observe qu'en général, l'amplitude du stimulus de test diminue progressivement avant la convergence.

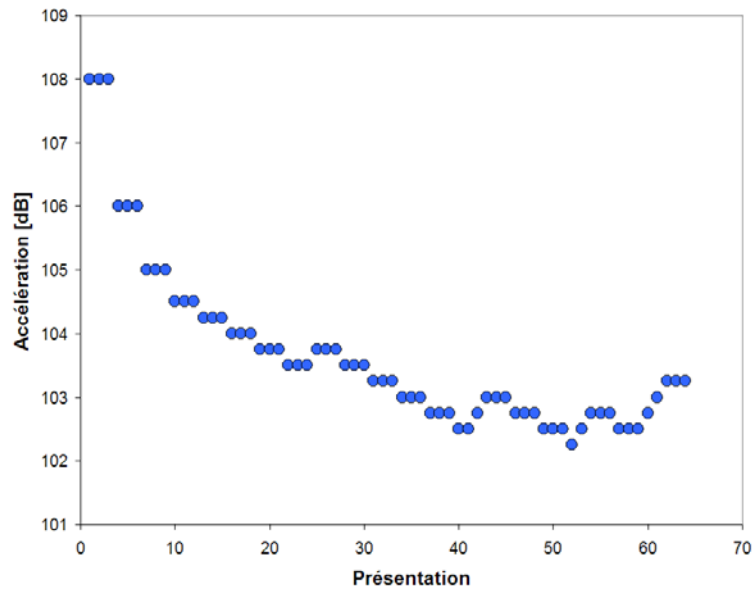


Figure 5.8 Développement typique des expériences, étude III (référence à 110 dB).

Afin d'analyser la variabilité interindividuelle, dans la Figure 5.9, sont affichées les données des douze sujets qui ont participé à des mesures ainsi que la médiane et l'intervalle interquartile (25-75 percentiles).

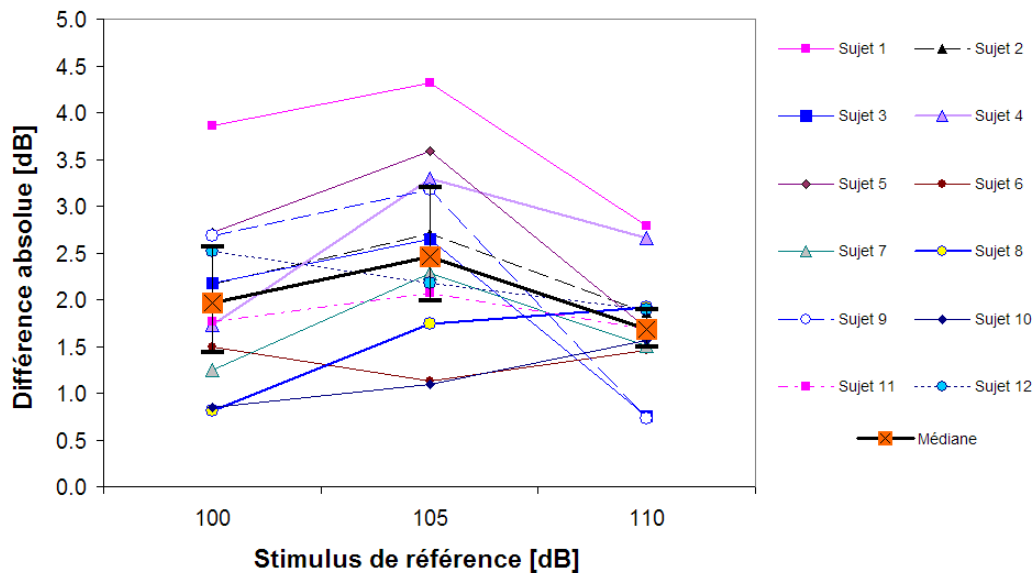


Figure 5.9 Les valeurs individuelles, médiane et l'intervalle interquartile (25-75 percentiles) de la différence absolue à peine perceptible, étude III.

Globalement, on observe que la variabilité inter-individuelle est plus importante aux deux premiers niveaux du stimulus de référence.

On n'observe aucune tendance particulière des données individuelles en fonction du niveau de stimulus. Les différences trouvées sont significatives, plus précisément entre 100 dB et 105 dB et entre 105 dB et 110 dB (seuil de probabilité de 0.05, Wilcoxon,  $p < 0.05$ ).

La médiane de la différence absolue à peine perceptible a été déterminée à partir des valeurs individuelles. Les résultats obtenus sont : 1.9 dB, 2.4 dB et 1.7 dB à 100 dB, 105 dB et 110 dB, respectivement.

La différence relative du seuil, a été déterminée par quelques auteurs ([MG 00], [BEL 02], [MMO 02], [FOR 09]) : les valeurs trouvées sont entre 0.52 et 1.5 dB. Cependant, ces valeurs ont été estimées en considérant des stimuli de type sinusoïdal et des conditions expérimentales différentes de celles considérées dans la présente étude, donc la comparaison explicite des données n'est pas possible.

## **5.5 Discussion des résultats.**

Dans les sections suivantes on présente la discussion des résultats en commençant par l'étude consacrée à la différence de niveau juste perceptible et l'analyses d'énergie globale, puis l'influence de la fréquence et finalement l'effet du niveau du signal masquant.



Le seuil masqué a été estimé dans les mêmes conditions qui ont été considérées lors des tests pour la mesure du seuil absolu. En considérant que les tests peuvent être faiblement influencés par des légères variations des conditions susceptibles de se produire, il est attendu que le seuil soit affecté par la présence du stimulus de masquage et très peu influencé par d'autres conditions.

En sachant que le phénomène de masquage peut se produire uniquement lorsque les stimuli de masque et de test sont présentés dans le même canal sensoriel ([GBV 89], [GRI 90]), il est attendu le phénomène. Il serait donc possible d'analyser l'effet de la fréquence du signal de test ainsi que l'influence du niveau du signal de masquage.

Deux références ont été trouvées par rapport au seuil masqué de perception vibratoire des sujets assis, soumis à des mouvements dans le sens vertical : [LOU 70] et [LWA 07]. Ces études n'ont pas été développées en vue d'analyser le phénomène de masquage, par ailleurs les conditions expérimentales considérées sont diverses. Pourtant, la comparaison explicite des données n'est pas possible.

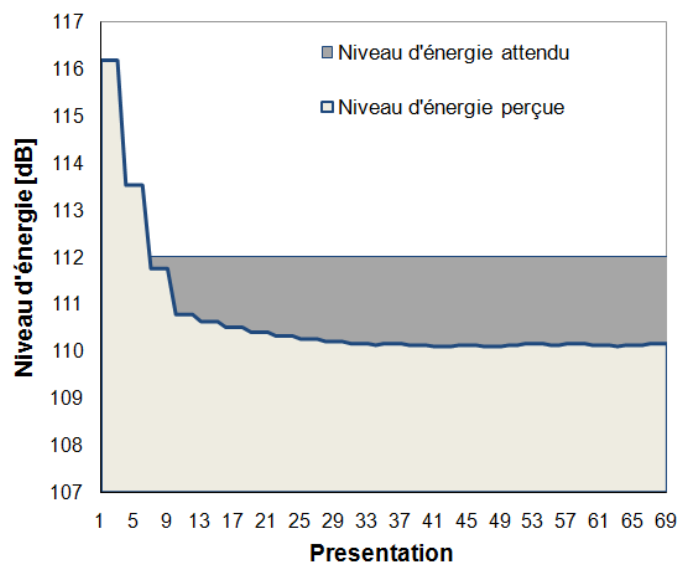
### **5.5.1 Différence à peine perceptible.**

Les résultats individuelles exposent une distribution des données approximativement symétrique (voir Figure 5.9). Cependant, la variabilité interindividuelle aux deux premiers stimuli de référence (100 et 105 dB) est plus importante qu'à 110 dB.

La relation entre la différence absolue de niveau et la valeur de référence est 0.019, 0.023 et 0.015 à 100, 105 et 110 dB, respectivement. Cette relation est similaire à celles qui ont été déterminées par [MG 00], [BEL 02], [MMO 02] et [FOR 09].

Afin d'analyser plus précisément le phénomène de masquage, on a déterminé le niveau d'énergie globale perçu juste au moment de la détection du signal de test. Cette énergie correspond à l'énergie apportée par le signal de masque plus l'énergie apportée par le signal de test.

Dans la Figure 5.10 est affichée l'énergie perçue au long d'un test typique de mesure du seuil masqué. Afin d'établir une comparaison, l'énergie attendue est aussi affichée ; cette dernière correspond à celle apportée par le signal de masque plus la différence à peine perceptible.



**Figure 5.10** Changement de niveau d'énergie au long de test de mesure du seuil masqué.

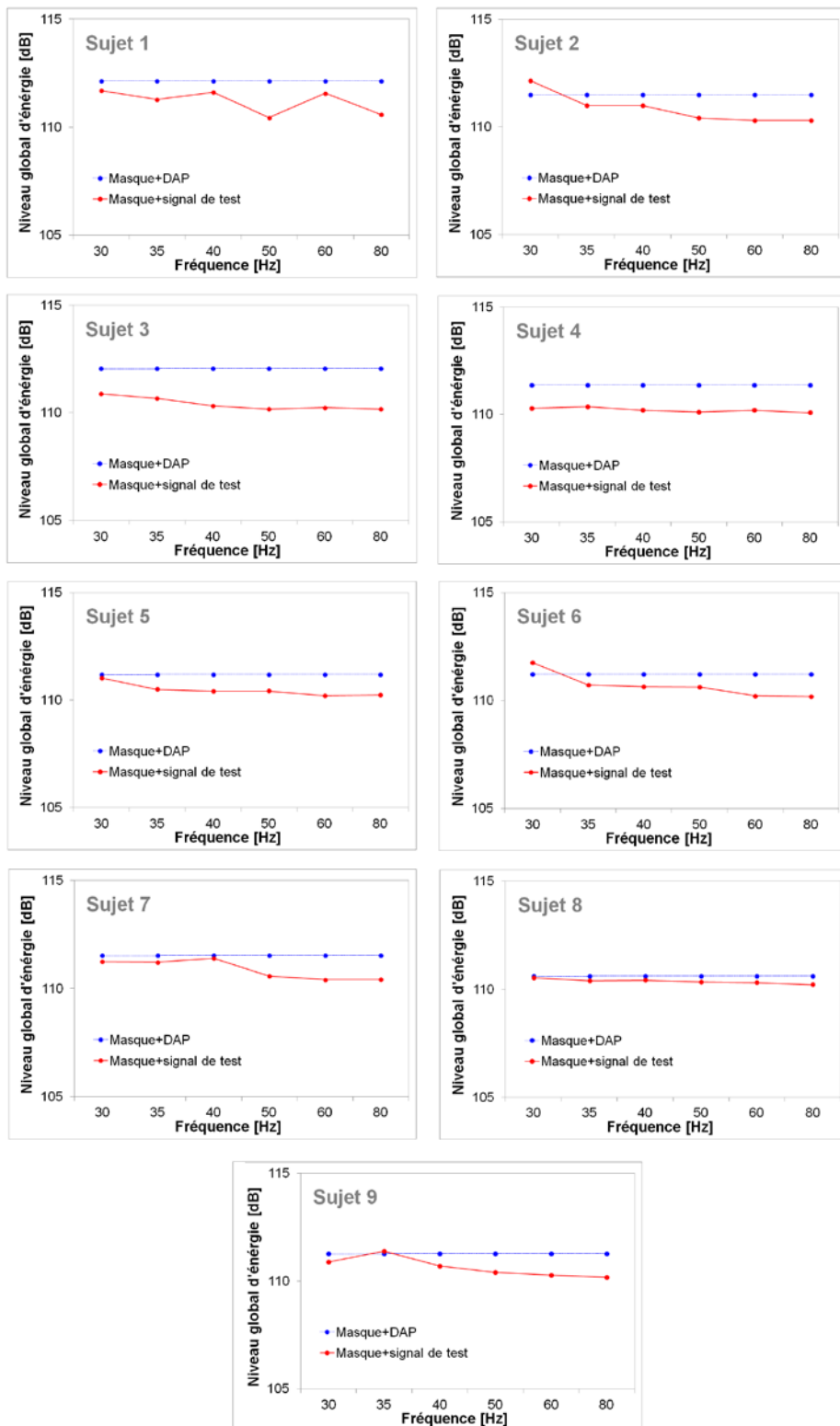
À partir de la dixième présentation, l'énergie perçue change très faiblement dû aux petites variations d'amplitude du signal de test.

Les résultats individuels (correspondant aux 9 sujets qui ont participé au seuil masqué), la médiane et l'intervalle interquartile (25-75 percentiles) des énergies (masque à 110 dB) sont affichées dans les Figure 5.11 et Figure 5.12, respectivement.

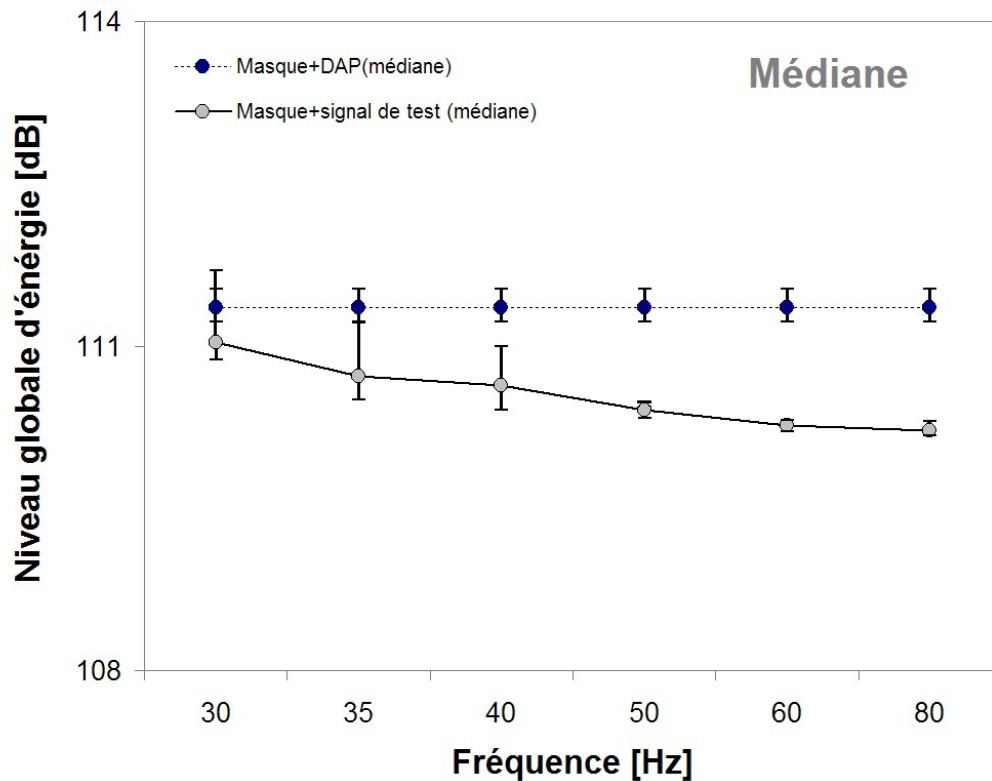
Dans la plupart des cas le niveau d'énergie au moment de la détection est plus faible que prévu (sauf les sujets 2 et 6 à 30 Hz).

La médiane présente une légère tendance à diminuer en fonction de la fréquence du signal de test.

À partir de 35 Hz, les différences trouvées sont significatives (Wilcoxon, seuil de probabilité de 0.05 et 0.01). La différence d'énergie est 0.64 dB, 0.71 dB, 0.94 dB, 1.09 dB et 1.14 dB à 35, 40, 50, 60 et 80 Hz, respectivement.

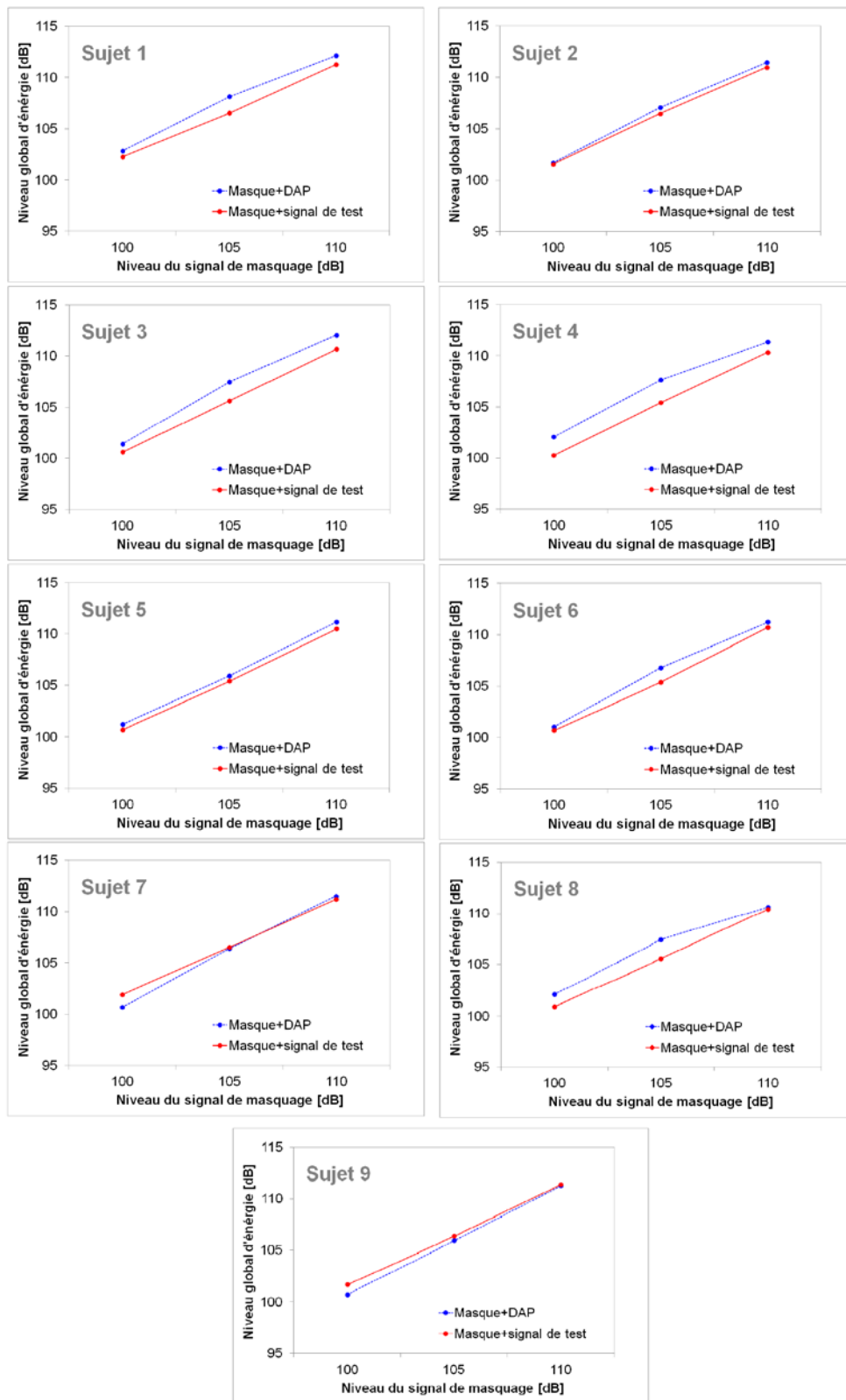


**Figure 5.11** Énergies perçues et attendues en fonction de la fréquence de test (résultats individuels, masque à 110 dB).

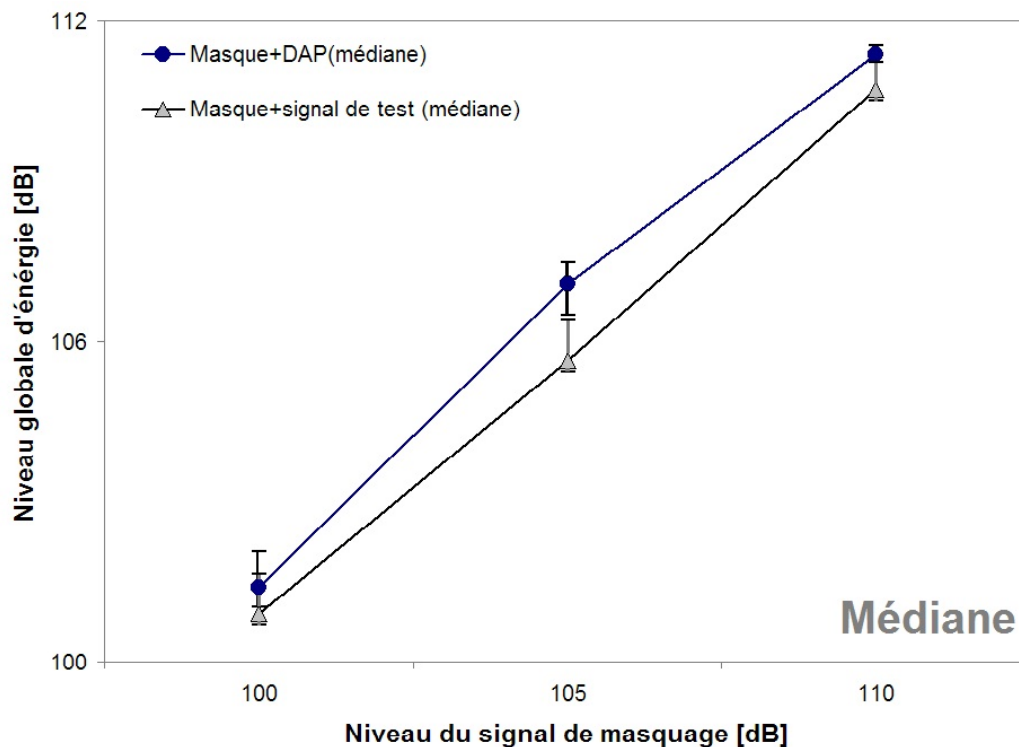


**Figure 5.12** Énergies perçues et attendues en fonction de la fréquence de test, masque à 110 dB (la médiane et l'intervalle interquartile (25-75 percentiles)).

Les niveaux d'énergie perçus et attendus ont été déterminés aussi en fonction du niveau du signal de masque (pour une fréquence du signal de test égale à 35 Hz), ils sont indiqués à la Figure 5.13 (résultats individuels) et la Figure 5.14 (la médiane et l'intervalle interquartile (25-75 percentiles)).



**Figure 5.13** Énergies perçues et attendues en fonction du niveau de masquage (résultats individuels, signal de test à 35 Hz).



**Figure 5.14** Énergies perçues et attendues en fonction du niveau de masquage, signal de test à 35 Hz (la médiane et l'intervalle interquartile (25-75 percentiles)).

Tel que le cas précédent, on observe un écart entre les énergies. Cette différence n'est pas significative pour un signal masquant de niveau 100 dB, mais l'est à 105 dB (1.45 dB) (Wilcoxon,  $p < 0.05$ ) et à 110 dB (0.64 dB) (Wilcoxon,  $p < 0.01$ ).

De manière générale, le niveau global d'énergie perçu au moment de la détection du signal de test (ou démasquage), est inférieur au niveau d'énergie attendu. Par ailleurs, celui là présente une tendance décroissant.

On a observé le démasquage anticipé à partir de 35 Hz. Cette anticipation peut être liée au processus de comparaison impliqué dans la procédure psychophysique.

Certaines études dans le domaine vibrotactile ont analysé l'influence de la procédure psychophysique sur le seuil masqué. Gescheider et al. [GHP 70], ont comparé les résultats obtenus en utilisant la procédure de suivi des signaux et avec la procédure de sélection forcée. Ils suggèrent que le masquage obtenu avec la procédure de suivi des signaux, reflète la capacité à détecter le stimulus de test. Tandis que le masquage obtenu avec la procédure de sélection forcée, reflète la capacité à détecter un changement dans le schéma global du stimulus.

Gilson [GIL 74], suggère que les différentes procédures psychophysiques utilisées dans les études de masquage, impliquent essentiellement deux tâches différentes. Avec la méthode des limites, le sujet doit identifier la présence du stimulus de test (appliqué sur une zone de stimulation précise). Puis, le stimulus de masque déplace la sensation produite par le stimulus de test. Avec la procédure de sélection forcée, [GIL 74] suggère qu'un tel déplacement possède un faible effet, car la tâche demandée par cette procédure implique la reconnaissance d'une différence entre le modèle du signal de masque et celui correspondant au modèle du signal de test et de masque ensemble. La procédure utilisée dans une évaluation de masquage peut donc être une cause déterminante de l'effet de masquage obtenu [SNY 77].

Lors des tests de la présente étude, les sujets doivent comparer trois stimuli (deux d'entre eux identiques). Conséquemment, la tâche du sujet correspond essentiellement à la reconnaissance du changement du modèle ou de la



structure du stimulus, indépendamment du paramètre qui entraîne cette modification.

La reconnaissance du changement, probablement implique certains mécanismes de codage et de décodage (la durée, l'amplitude, etc.), et ensuite la comparaison avec les informations des stimuli précédents encore en mémoire.

Apparemment, au moment de démasquage (jusqu'à 35 Hz) prévaut la reconnaissance de l'augmentation de l'intensité globale d'énergie du stimulus. Cependant que, aux fréquences plus élevées prédomine la discrimination des deux signaux. C'est-à dire, lorsque les fréquences des signaux (de masque et de test) sont plus éloignées, plus importante devienne la discrimination des signaux.

Globalement, le démasquage a été similaire par les trois niveaux de bruit qui ont été étudiés.

### **5.5.2 Influence de la fréquence**

En relation à l'influence de la fréquence du signal de test sur le seuil masqué, on a observé une certaine variabilité intra-individuelle qui coïncide avec les résultats obtenus par [HES 86]. Il a signalé que l'écart type et le rang interquartile sont larges en utilisant les méthodes de sélection forcée, tandis que d'autres méthodes (de suivi et d'ajustement) fournissent des valeurs plus faibles. [HES 86] a souligné que malgré une augmentation du nombre des mesures, la variabilité ne diminue pas.

Dans cette étude le rang interquartile présente une distribution des données approximativement symétrique, sauf à 30 Hz où les valeurs sont légèrement déplacées à l'extrémité inférieure.

Le seuil masqué a été estimé en considérant des stimuli de test à six fréquences différentes (30, 35, 40, 50, 60, et 80 Hz) et un signal de masquage à 110 dB d'amplitude. Puisque le stimulus de masque est un signal de type bande étroite de bruit comprise entre 10 et 20 Hz, l'écart relatif entre chaque fréquence du signal de test et la fréquence centrale du signal de masquage (15 Hz), n'est pas le même. Entre la première fréquence du signal de test (30 Hz) et la fréquence centrale du signal de masquage, il existe un écart de 15 Hz ; puis l'écart augmente.

Le seuil masqué montre une tendance décroissante. Cette tendance peut être expliquée par l'écartement entre les fréquences des stimuli ; on observe que tandis la différence entre les fréquences augmente, l'effet du signal de masque devient moins important.

Le seuil masqué expose des valeurs supérieures à celles qui correspondent au seuil absolu à la même fréquence ; l'augmentation la plus importante a été trouvée à 35 et 50 Hz (plus de 15 dB au-dessus du seuil absolu) et la moins significative à 80 Hz. L'écart entre le seuil absolu et masqué est quasiment constant jusqu'à 50 Hz, puis cette différence diminue. Le rapport de diminution du seuil masqué ne correspond pas au rapport d'augmentation de fréquence du signal de test.

Afin de prédire certains effets de l'exposition vibratoire sur la perception, le confort, la gêne, la santé ou l'interférence aux activités, les normes actuelles proposent l'utilisation des facteurs de pondération fréquentielle. Selon cette

approche, une valeur pondérée élevée à une certaine fréquence signifie une haute sensibilité par rapport à d'autres fréquences. Alors qu'une basse sensibilité est liée plutôt à des valeurs de pondérations faibles.

En ce qui concerne la prédiction de la perception vibratoire des personnes assises, la norme internationale [INT 97] stipule expressément : « *Fifty percent of alert, fit persons can just detect a  $Wk$  weighted vibration with a peak magnitude of  $0.015 \text{ m/s}^2$*  ». Lorsque la moyenne du seuil de perception est approximativement  $0.015 \text{ m/s}^2$ , l'intervalle interquartile des réponses peut s'étendre environ  $0.01 \text{ m/s}^2$  à  $0,02 \text{ m/s}^2$  (pic).

Si la norme fournit des prédictions appropriées, l'accélération déterminée expérimentalement multiplié par le facteur de pondération pertinente devrait produire des valeurs proches à  $0.015 \text{ m/s}^2$  au long toutes les fréquences.

L'accélération du signal masquant (Figure 5.15), l'énergie totale (masque (à 110 dB) + seuil masqué) (Figure 5.16) et le seuil masqué (Figure 5.17) ont été déterminés en considérant le facteur de pondération  $Wk$  indiqué par [INT 97]. Le seuil masqué non pondéré, le seuil absolu et le seuil absolu pondéré sont aussi montrés (Figure 5.17).

On observe que le signal de masquage est clairement perceptible aux trois niveaux considérés. L'ensemble « masque (à 110 dB) + seuil masqué » expose une légère tendance à diminuer. Par ailleurs le niveau d'énergie est nettement perceptible. Le seuil absolu (pondéré et non pondéré) est très faiblement affecté par la fréquence entre 30 et 80 Hz. La norme [INT 97] sous-estime le seuil absolu mesuré. Les seuils masqués pondérés et non pondérés montrent une haute dépendance de la fréquence. À partir de 50 Hz, le seuil masqué pondéré est très proche à celui de la prédiction.

Globalement, l'accélération pondérée est un indicateur qui peut sous-estimer les valeurs mesurées.

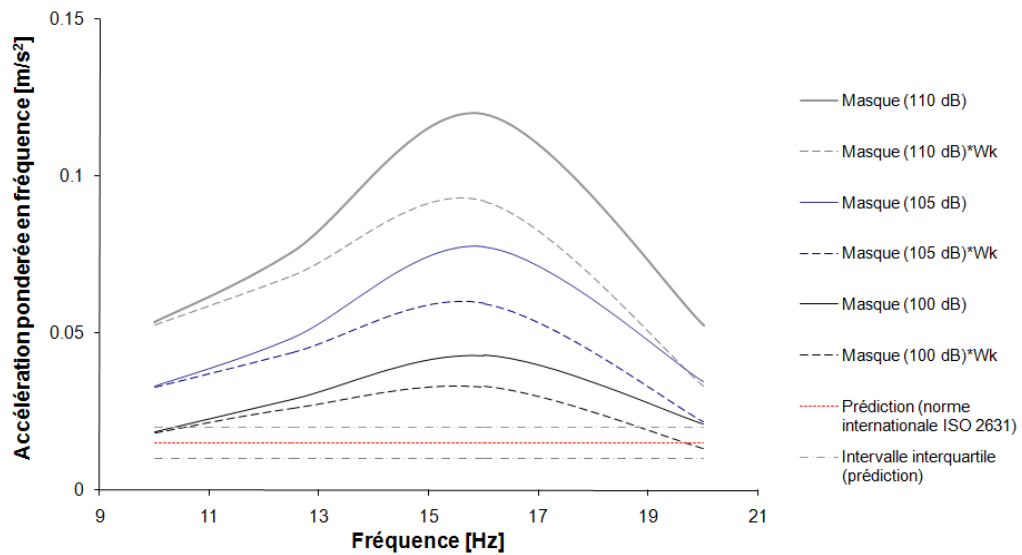


Figure 5.15 L'accélération pondérée du signal masquant.

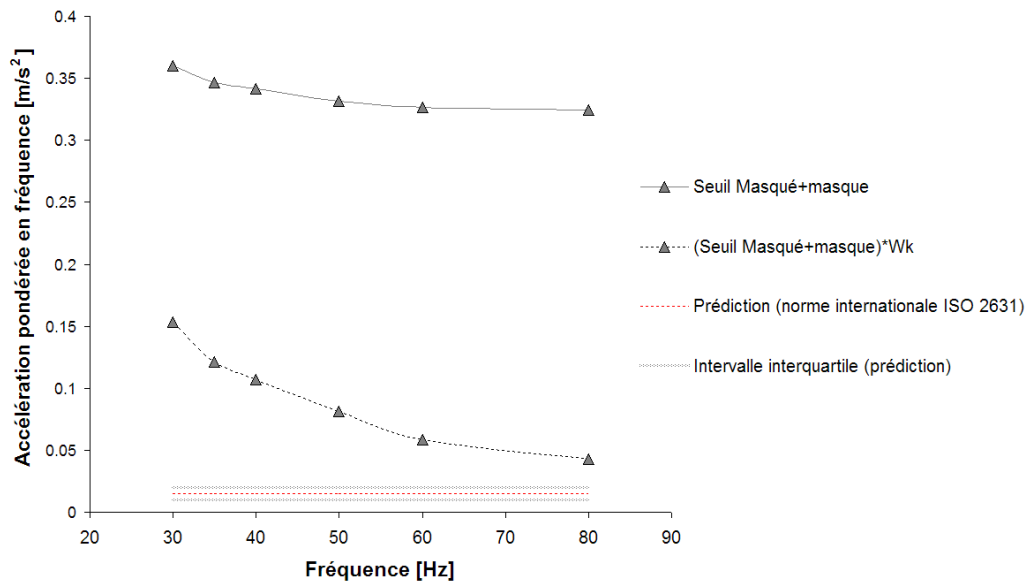


Figure 5.16 Energie totale (masque (à 110 dB)+seuil masqué) pondérée et non pondérée.

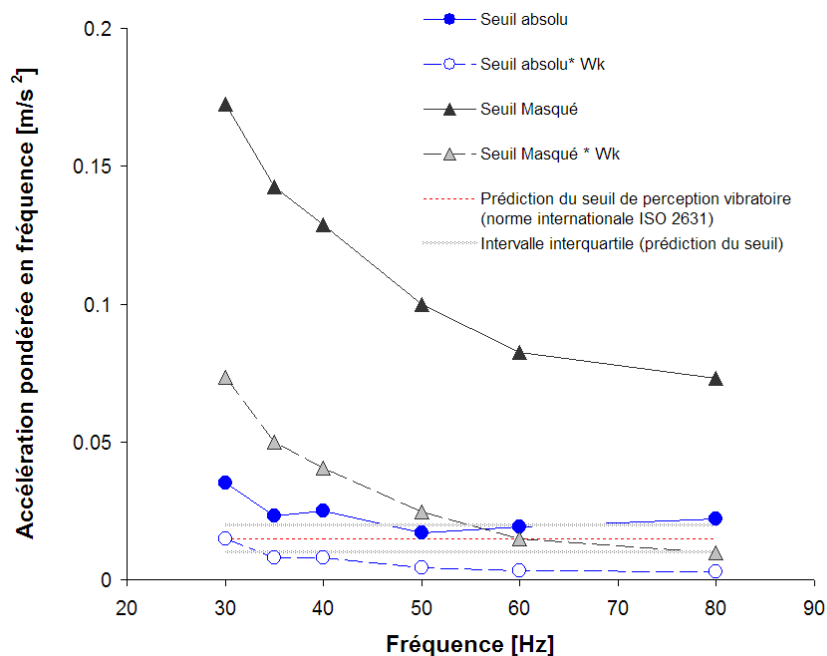


Figure 5.17 Seuils de perception pondérés et non pondérés.

### 5.5.3 Influence du niveau du signal de masquage.

On observe que la distribution des données à 100 et 105 dB (voir Figure 5.6) est légèrement déplacé à l'extrémité inférieure du range interquartile, tandis qu'à 110 dB la distribution est approximativement symétrique.

La courbe du seuil masqué expose une claire tendance ascendante avec l'augmentation du niveau du signal de masquage. Le rapport d'augmentation du seuil masqué ne correspond pas au rapport d'augmentation du signal de masquage ; la pente entre les deux premiers niveaux de masque (100 et 105 dB) est 0.7, cependant cette inclinaison augmente à 1.1 entre les niveaux suivants (105 et 110 dB).

L'effet du niveau d'amplitude du signal de masquage sur le seuil est plus important en fonction de son augmentation ; cependant, l'influence du rapport de cette augmentation n'est pas claire.

Dans le domaine de la détection vibrotactile, les résultats de [HAM 79] et [GVV 82] sont similaires à ceux indiqués dans la présente étude, plus précisément concernant l'effet du type de stimulus utilisé.

Hamer [HAM 79], a utilisé des stimuli type bruit (bande étroite) à basse fréquence, en vue de masquer la détection des stimuli de test (sinusoïdales) à basse fréquence ; la pente des fonctions de masquage a été de 1.0.

[GVV 82], ont utilisé un stimulus de type bruit à bande étroite, centrée à 275 Hz (largeur de bande 100 Hz) afin de masquer des stimuli de test type pouls sinusoïdale à 15, 50, 80 et 300 Hz. Ils ont trouvé que le seuil vibrotactile masqué augmente de façon linéaire (pente 1.0) avec de l'intensité du stimulus de masque.

Ces fonctions de masquage dans lequel le masque et le stimulus de test stimulent le même système récepteur vibrotactile, sont très semblables à celles de l'audition, où la tonalité de test et le bruit de masquage sont dans la même bande critique [HS 50].

## 5.6 Conclusions du chapitre

Le seuil masqué de perception vibratoire a été estimé en utilisant le paradigme 3AFC avec la méthode 1Up-3Down. La détection du stimulus de test a été empêchée dû à un autre stimulus. Donc, il est clair que le phénomène de masquage a eu lieu.

L'effet de la fréquence du signal de test sur le seuil masqué a été analysé. De façon globale, le seuil exhibe une tendance à diminuer en fonction de l'accroissement de la fréquence du signal de test. Il est possible que l'effet du signal de masque devienne moins efficace en tant que la fréquence du stimulus de test s'éloigne de la fréquence centrale du stimulus masquant. Le rapport de diminution du seuil, ne correspond pas au même rapport d'augmentation de la fréquence du signal de test.

En considérant le facteur de pondération de fréquence  $Wk$  (proposé par [INT 97]), les seuils absolu et masqué pondérés sont à certaines fréquences sous-estimés. Par conséquent, l'accélération non pondérée est un indicateur plus réaliste en ce qui concerne l'évaluation du seuil de perception.

En utilisant trois niveaux différents de masquage, l'influence sur le seuil masqué a été analysée. L'effet masquant devient plus importante lorsque l'intensité du stimulus de masque augmente.

Le rapport d'augmentation du seuil ne correspond pas au rapport d'augmentation du signal de masquage ; la pente entre les deux premiers niveaux de masque était inférieure au niveau suivant.

La différence absolue de niveau à peine perceptible du stimulus de masquage a été estimée. La relation entre la différence absolue et la valeur du niveau de référence change très faiblement.

À partir de la différence du niveau à peine perceptible, l'énergie attendue au démasquage a été déterminée. Également, à partir du seuil masqué le niveau d'énergie perçu a été calculé. Les résultats indiquent qu'il existe un écart entre les énergies attendues et perçues.

L'énergie perçue décroît avec l'augmentation de la fréquence de test.

Le démasquage est lié à l'écart entre les fréquences des signaux masquant et de test. Lorsque l'écart est faible, prévaut la reconnaissance de l'augmentation de l'intensité globale d'énergie. Si l'écart augmente, la discrimination des signaux prédomine.

Le démasquage a été similaire par les trois niveaux d'amplitude masquant qui ont été étudiés.





# Chapitre 6.

## Conclusions Générales

6.1	Introduction.....	143
6.2	Synthèse .....	143
6.3	Remarques de conclusion.....	146
	6.3.1 Seuil absolu de perception.....	147
	6.3.2 Seuil masqué de perception .....	149
	6.3.3 Différence à peine perceptible .....	150
	6.3.4 Phénomène de masquage.....	150
6.4	Perspectives.....	152

### **6.1 Introduction**

Ce chapitre conclut la présente thèse de doctorat en donnant une brève synthèse des principaux résultats obtenus dans cette investigation. Bien que l'objectif général ce travail porte sur l'effet de masquage, d'autres aspect liées à ce phénomène ont été analysés, tels que le seuil absolu de perception et la différence à peine perceptible. Fondés sur l'analyse et la discussion des résultats, les conclusions les plus importantes seront exposées. Certains aspects qui méritent une investigation plus approfondie sont remarqués.

### **6.2 Synthèse**

Une revue générale de la perception vibratoire a été exposée pour le cas de sujets en position assise soumis à des mouvements dans le sens vertical.

La première partie de cette revue est consacrée aux renseignements fondamentaux qui entraînent à la compréhension générale de la physiologie du processus perceptif et à la biodynamique du corps.

En relation à la physiologie, plus particulièrement pour le système visuel, vestibulaire et somatosensoriel, des aspects généraux ont été brièvement abordés. Également de façon très générale, quelques aspects relatifs à la biodynamique du corps et à l'influence des éléments de soutien sur la perception vibratoire ont été exposés.

L'évaluation sensorielle a été aussi légèrement adressée, plus précisément la notion de seuil et la généralité des procédures psychophysiques lesquelles sont habituellement utilisées.

La deuxième partie se concentre sur le seuil absolu et le seuil masqué de perception vibratoire, donc la revue de la littérature sur ces points a été plus exhaustive. En relation au seuil absolu de perception vibratoire du corps entier, trois cas ont été présentés selon la position du sujet : debout, couché ou assis.

Le seuil de perception de sujets en position assise a été spécialement examiné ; les plus récentes recherches encadrées sur des procédures psychophysiques établies ont été soulignées ainsi que sur des informations précises des conditions expérimentales.

À ce qui concerne au seuil de perception masqué, seulement deux références liées au cas de sujets en position assise, soumis à des mouvements dans le sens vertical, ont été trouvées. Les descriptions détaillées de ces études ont été également exposées.

Afin d'atteindre les principaux objectifs de cette thèse, quelques expériences de mesure sensorielle ont été planifiées. Toutes les expériences ont été effectuées dans le même banc d'essais. Les caractéristiques précises du banc, ainsi que les équipements liés à la génération et l'acquisition des données ont été décrites.

En vue d'identifier de façon claire la zone la plus stable de performance du banc d'essais, les résultats de certaines mesures préliminaires ont été inclus.

Les mesures sensorielles ont été réalisées en utilisant deux procédures psychophysiques. La première procédure utilise le paradigme oui/non avec la méthode PEST, la deuxième considère le paradigme de trois alternatives de sélection forcée avec la méthode de 1Up-3Down. Les règles qui régissent ces procédures ont été décrites.

Lors des essais, deux types de stimuli vibratoires ont été considérés : le stimulus de masquage et le stimulus de test. Le stimulus de masque est une bande étroite de bruit (pseudo-aléatoire de distribution normale) situé entre 10 et 20 Hz, à trois niveaux d'amplitude différents (100, 105 et 110 dB).

Afin d'éviter le risque de détection (risque de battement en utilisant deux sinus pur), l'amplitude du signal de test a été modulée par le contour du stimulus de masque.

Finalement, le stimulus de test est un signal sinusoïdal modulé en amplitude entre 30 et 80 Hz. La gamme de fréquence a été déterminée par les limites pratiques. Dans cette gamme, l'influence de la performance dynamique de banc d'essais peut être négligée.

Afin d'examiner l'effet de masquage, la différence entre les seuils absolus et masqué est requise, donc les deux seuils ont été estimés.

En vue d'analyser la variation du niveau d'énergie globale provenant de la présentation simultanée de deux stimuli (stimuli de test et de masque), la différence à peine perceptible du signal de masquage a été estimée à trois niveaux différents (100, 105 et 110 dB).

Finalement, les résultats obtenus à partir des mesures de seuil absolu, seuil masqué et la différence à peine perceptible, ont été analysés, ceci a conduit aux conclusions qui seront précisées à la section suivante.

### **6.3 Remarques de conclusion**

L'analyse des résultats obtenus conduit à certaines conclusions lesquelles seront présentées dans l'ordre suivant : tout d'abord celles qui concerne au seuil absolu et plus précisément celles qui correspondent à l'influence de la procédure psychophysique, la modulation du signal et la fréquence de test. En suite seront exposées les conclusions liées à l'effet de la fréquence de test et le niveau du stimulus de masquage sur le seuil masqué.

Certaines observations sur la différence à peine perceptible du signal de masque seront également incluses. Finalement, quelques conclusions plus précises sur le phénomène de masquage, seront soulignées.

### **6.3.1 Seuil absolu de perception**

À partir de la revue initiale de la littérature, on peut conclure que le seuil absolu de perception vibratoire des sujets assis, soumis aux mouvements dans le sens vertical, a été relativement bien examiné. Bien que les références ne soient pas très nombreuses, la contribution de chacune est précieuse. La diversité des conditions expérimentales fournissent des éléments sur l'influence de chacun des aspects sur le phénomène.

Le seuil absolu peut être influencé par des divers aspects tels que le support de pied (stationnaire ou mobile), le support pour le dos (inclinaison), la tête et les bras. La posture du sujet peut affecter aussi le seuil : soit si la position du corps est raide ou relâché.

Dans cet investigation, le seuil absolu de perception a été estimé en utilisant deux procédures psychophysiques : le paradigme oui/non avec la méthode PEST (procédure I) et le paradigme 3AFC avec la méthode 1Up-3Down (procédure II).

En relation au seuil absolu estimé avec la procédure I, on se permet de remarquer les conclusions suivantes :

- Il existe une certaine variabilité intra-individuelle, qui peut avoir une incidence importante sur le calcul final du seuil individuelle.
- La variabilité interindividuelle peut être liée aux différences entre les caractéristiques des sujets ainsi qu'aux légères différences des postures.

- Le seuil absolu en général, montre une faible dépendance de la fréquence.

Par rapport au seuil estimé avec la procédure II, on remarque :

- La variabilité interindividuelle peut influencer l'estimation finale du seuil.
- Globalement, le seuil absolu est très faiblement affecté par la fréquence.
- Dans les conditions expérimentales considérées, la modulation du signal n'a pas influé le seuil absolu.

En général, pour le seuil absolu on peut conclure que :

- Le seuil déterminé en utilisant la procédure II, conduit à des valeurs plus basses que celles qui ont été estimées avec la première procédure.
- L'influence de la procédure psychophysique ne peut pas être évaluée directement car chaque procédure présente une probabilité de bonne réponse différente.
- La procédure I est sensible à la stabilité du critère de la réponse du sujet en raison de la faible probabilité de réponse correcte de la méthode. Cependant, elle offre une mise en œuvre relativement simple et rapide.
- La mise en œuvre de la procédure II est plus élaborée par rapport à la procédure I. La stabilité de cette procédure implique un coût élevé en terme de durée.
- Globalement, les courbes de seuils estimés exposent des valeurs similaires à d'autres études.

### **6.3.2 Seuil masqué de perception**

Le seuil masqué de perception a été très peu examinée dans le cas de la vibration de corps entier.

Au cours de ce travail, le seuil masqué de perception a été estimé en utilisant le paradigme 3AFC avec la méthode 1Up-3Down. À partir des résultats, on peut signaler que :

- La variabilité intra-individuelle observée, peut être liée à des légères différences des postures et des critères des sujets.
- La variabilité interindividuelle a été moins importante par rapport à celle qui a été observée au seuil absolu.
- Le seuil exhibe une claire tendance à diminuer en fonction de la fréquence.
- L'effet du signal de masque devient moins important lorsque l'écart entre les fréquences des signaux (de masquage et de test) augmente.
- Lorsque l'amplitude du bruit ou masque augmente, l'effet masquant devienne plus significatif.
- Le rapport d'augmentation du seuil ne correspond pas au même rapport d'augmentation de l'amplitude du bruit.



### **6.3.3 Différence à peine perceptible**

Voici quelques remarques de conclusion concernant la différence à peine perceptible :

- Les données disponibles à la littérature concernant la différence à peine perceptible, ont été obtenues dans le cas de signaux de type sinusoïdal.
- En utilisant le paradigme 3AFC avec la méthode 1Up-3Down, la différence absolue de niveau à peine perceptible du signal de masquage a été estimée.
- Certaine variabilité interindividuelle a été observée.
- La relation entre la différence absolue et la valeur de niveau de référence change très faiblement.

### **6.3.4 Phénomène de masquage**

Finalement, concernant le phénomène de masquage, on indique les aspects suivants :

- À partir de seuil masqué, le niveau d'énergie perçu a été identifié. Cette énergie décroît avec l'augmentation de la fréquence de test.
- Le rapport d'augmentation de l'énergie est très proche au rapport d'augmentation du niveau du stimulus de masquage.
- À partir de la différence du niveau à peine perceptible, l'énergie attendue au démasquage a été déterminée.

- Il existe un écart entre les énergies attendues et perçues. Cette dernière a été plus basse que l'énergie attendue.
- Lorsque l'écart est faible, la reconnaissance de l'augmentation de l'intensité globale d'énergie prédomine lors de la détection.
- Par contre, si l'écart dévient plus significatif, la discrimination des signaux prévaut.
- La détection au démasquage est similaire est similaire par les trois amplitudes de bruit étudiées.

## 6.4 Perspectives

Les aspects impliqués au phénomène de masquage sont nombreux et assez complexes. Les résultats obtenus à cette étude fournissent une contribution minimale par rapport aux questions qui restent sans réponses.

Afin de vérifier les résultats et approfondir la compréhension du phénomène de masquage, des recherches supplémentaires certainement doivent être réalisées. Quelques aspects prioritaires pour des recherches futures, ont été identifiés, certains sont suggérés ci-dessous :

- Vérifier l'existence du processus de discrimination fréquentielle.
- Analyser l'effet de la méthode de mesure en utilisant d'autres procédures psychophysiques.
- Vérifier l'effet des différentes conditions expérimentales telles que les surfaces d'appui pour le dos, les bras, la tête ou les pieds (surface mobile en face avec le mouvement du corps).
- Évaluer le niveau minimal d'intensité du signal de masque requis pour atteindre l'effet masquant.
- Analyser l'effet de masquage dans un range de fréquence du stimulus de test plus vaste.
- Évaluer l'influence de la largeur de bande du signal de masquage.

# Références

- [BB 66] BOS C. et BOER E. Masking and Discrimination. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1966, vol 39, n° 4, p 708-715.
- [BBMW 01] BAUMANN I., BELLMANN M., MELLERT V. et WEBER R. Wahrnehmungs- und unterschiedsschwellen von vibrationen auf einem kraftfahrzeugsitz. In : Fortschritte der Akustik, DAGA 2001 on CD.
- [BD 81] BENSON A. et DILNOT S. Perception of whole body linear oscillation. *Presented at the 16<sup>th</sup> UK Group Meeting on Human Response to Vibration*, Edinburgh, 1981.
- [BEL 02] BELLMANN M. Perception of whole-body vibrations: From basic experiments to effects of seat and steering-wheel vibrations on the passenger's comfort inside vehicles. Ph.D. Thesis, University Oldenburg, 2002.
- [BIR 98] BIRNBAUM M. *Handbook of perception and cognition. Measurement, judgment, and decision making*. 2<sup>nd</sup> ed. California : Academic Press, 1998.
- [BON 86] BONNET C. *Manuel Pratique de Psychophysique*. Paris: Armand Colin Editeur, 1986.

- [BSK 08] BAZRGARI B., SHIRAZI-ADL A. et KASRA M. Seated whole body vibrations with high magnitude accelerations, relative roles of inertia and muscle forces. *Journal of Biomechanics*, 2008, vol 41, p 2639-2646.
- [BSS 86] BENSON A., SPENCER M. et STOTT J. Thresholds for the detection of the direction of whole body, linear movement in the horizontal plane. *Aviation, Space and Environmental Medicine*, 1986, vol 57, p 1088-1096.
- [CHA 64] CHANEY R. Subjective reaction to whole body vibration. *Human Factors, Technical Report D3-6474*. The Boeing Company, Wichita, Kansas, 1964.
- [CHA 65] CHANEY R. Whole body vibration of standing subjects. *Human Factors, Technical Report D3-6779*. The Boeing Company, Wichita, Kansas, 1964.
- [COE 62] COERMANN R. The mechanical impedance of the human body in sitting and standing position at low frequencies. *Human Factors*, 1962, vol 4, n° 10, p 227-253.
- [CR 72] CHEN P. et ROBERTSON L. Human perception thresholds of horizontal motion. *Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 1972, vol 98, p 1681-1695.
- [CRA 76] CRAIG J. Vibrotactile letter recognition: The effects of a masking stimulus. *Perception & Psychophysics*, 1976, vol 20, n° 5, p 317-326.

- [CRA 76a] CRAIG J. Attenuation of vibrotactile spatial summation. *Sensory Processes*, 1976, vol 1, p 40–56.
- [DB 83] DONATI P. et BONTHOUX C. Biodynamic response of the human body in the sitting position when subjected to vertical vibration. *Journal of Sound and Vibration*, 1983, vol 90, n° 3, p 423-442.
- [DEM 74] DEMPSEY T. A model and predictive scale of passenger ride discomfort. *National Aeronautics and Space Administration*, 1974, NASA TM X-72623.
- [DON 80] DONATI P. Effets à court terme sur l'homme assis des vibrations transmises à l'ensemble du corps (approches biomécanique et subjective). Thèse de Docteur Ingénieur, University Oldenburg, 1980.
- [FAL 86] FALMAGNE J. *Handbook of perception and human performance. Psychophysical measurement and theory*. New York : In Boff, K. R., Kaufman, L., & Thomas, J. P., eds. 1986.
- [FEC 860] FECHNER G. *Element der Psychophysik*. Leipzig: Breitkopf & Härterl. 1860.
- [FG 89] FAIRLEY T. et GRIFFIN M. The apparent mass of the seated human body: vertical vibration. *Journal of Biomechanics*, 1989, vol 22, n° 2, p 81-94.

- [FG 90] FAIRLEY T. et GRIFFIN M. The apparent mass of the seated human body in the fore and aft and lateral directions. *Journal of Sound and Vibration*, 1990, vol 139, p 299-306.
- [FNR 77] FERRINGTON D., NAIL B. et ROWE M. human tactile detection thresholds: modification by inputs from specific tactile receptor classes. *J. Physiol.*, 1977, vol 272, p 415-433.
- [FOR 09] FORTA N. Vibration intensity difference thresholds. Ph.D. Thesis, University of Southampton. 2009.
- [GAR 98] GARCIA M. Forced-choice staircases with fixed step sizes: asymptotic and small sample properties. *Vision Research*, 1998, vol 38, p 1861-1881.
- [GBV 89] GESCHEIDER G., BOLANOWSKI S. et VERRILLO R. Vibrotactile masking: Effects of stimulus onset asynchrony and stimulus frequency. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1989, vol 85, n° 5, p 2059-2064.
- [GBZHM 94] GESCHEIDER G., BOLANOWSKI S., ZWISLOCKI J., HALL L. et MASCIA C. The effects of masking on the growth of vibrotactile sensation magnitude and on the amplitude difference limen: A test of the equal sensation magnitude-equal difference limen hypothesis. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1994, vol 96, n° 3, p 1479-1488.
- [GEL 98] GELFAND S. *Hearing - An introduction to psychological and physiological acoustics*. 3<sup>era</sup> Ed. New York : Marcel Dekker Inc. 1998.

- [GES 76] GESCHEIDER G. Evidence in support of the duplex theory of mechanoreception. *Sensory Processes*, 1976, vol 1, p 68-76.
- [GES 97] GESCHEIDER G. *Psychophysics: the fundamentals*. 3<sup>era</sup> ed. London: Lawrence Erlbaum Associates Publishers, 1997.
- [GHP 70] GESCHEIDER G., HERMAN D. et PHILLIPS J. Criterion shifts in the measurement of tactile masking. *Perception & Psychophysics*, 1970, vol 8, p 433-436.
- [GIL 69] GILSON R. Vibrotactile masking: some spatial and temporal aspects. *Perception and Psychophysics*, 1969, vol 5, p 176-180.
- [GIL 69a] GILSON R. Vibrotactile masking: Some spatial and temporal aspects. *Percept. Psychophys.*, 1969a, vol 5, p 176-180.
- [GIL 69b] GILSON R. Vibrotactile masking: Effects of multiple maskers. *Percept. Psychophys.*, 1969a, vol 5, p 181-182.
- [GIL 74] GILSON R. Vibratory masking. *Cutaneous Communication Systems and Devices*, édité par F.A. Geldard (The Psychonomic Society), Austin, Texas, 1974, p 53-56.
- [GOL 02] GOLDSTEIN E. *Sensation and Perception*. 6<sup>th</sup> Ed. USA. Wadsworth. 2002.
- [GRE 75] GREEN B. Signal duration and vibrotactile sensitivity : Effects of vibration frequency and masking. Doctoral dissertation, Indiana University. Bloomington, Indiana, 1975.



- [GRE 90] GREEN D. Stimulus selection in adaptive psychophysical procedures. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1990, vol 87, n° 6, p 2662-2674.
- [GRE 93] GREEN D. A maximum-likelihood method for estimating thresholds in a yes-no task. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1993, vol 93, p 2096-2105.
- [GRI 76] GRIFFIN M. Subjective equivalence of sinusoidal and random whole body vibration. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1976, vol 60, n° 5, p 1140-1145.
- [GRI 90] GRIFFIN M. *Handbook of human Vibration*. New York : Academic Press. 1990.
- [GS 57] GORRILL R. et SNYDER F. Preliminary study of aircrew tolerance to low frequency vertical vibration. Document n° D3-1189. The Boeing Company, Wichita, Kansas, 1957.
- [GS 66] GREEN D. et SWETS J. *Signal detection theory and psychophysics*. Los Altos, Calif. : Peninsula. Reprinted 1988.
- [GUE 01] GUENARD H. *Physiologie humaine*. 3<sup>e</sup> Ed. Editions Pradel. 2001.
- [GUN 78a] GUNDRY A. Thresholds of perception for periodic linear motion. *Aviation, Space and Environmental Medicine*, 1978, vol 49, p 679-686.

- [GVV 82] GESCHEIDER G., VERRILLO R. et VANDOREN C. Prediction of vibrotactile masking functions. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1982, vol 72, n° 5, p 1421-1426.
- [GW 80] GRFFIN M. et WHITHAN E. Discomfort produced by impulsive whole body vibration. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1980, vol 68, n° 5, p 1277-1284.
- [GW 80] GRIFFIN M., WHITHAN E. Time dependency of whole body vibration discomfort. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1980, vol 68, n° 5, p 1522-1523.
- [HAL 81] HALL J. Hybrid adaptive procedure for estimation of psychometric functions. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1981, vol 69, n° 6, p 1763-1769.
- [HAL 81] HALL J. Hybrid adaptive procedure for estimation of psychometric functions. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1981, vol 69, p 1763-1769.
- [HAM 79] HAMER R. Vibrotactile masking : Evidence for a peripheral energy threshold. Ph.D. dissertation and special report, ISR S-18, Institute for Sensory Research, Syracuse University.Syracuse, NY, 1979.
- [HAN 70] HANES R. Human sensitivity to whole body vibration in urban transportation systems : a literature review. *Transportation Programs Report, APL/JHU TPR 004*. Applied Physics Laboratory, The Johns Hopkins University, Maryland, 1970.

- [HAR 82] HARTMANN W. On the detection of a tone masked by two tones. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1982, vol 71, n° 1, p 127-132.
- [HES 86] HESSE A. Comparison of several psychophysical procedures with respect to threshold estimates, reproducibility and efficiency. *Acustica*, 1986, vol 59, p 263–273.
- [HG 06] HUANG Y. et GRIFFIN M. Effect of voluntary periodic muscular activity on nonlinearity in the apparent mass of the seated human body during vertical random whole body vibration. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, vol 298, p 824-840.
- [HG 07] HACAAMBWA T. et GIACOMIN J. Subjective response to seated fore and aft direction whole body vibration. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2007, vol 37, p 61-72.
- [HG 98] HARAZIN B. et GRZESIK J. The transmission of vertical whole body vibration to the body segments of standing subjects. *Journal of Sound and Vibration*, 1998, vol 215, n° 4, p 775-787.
- [HH 03] HOSTENS I. et RAMON H. Descriptive analysis of combine cabin vibrations and their effect on the human body. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, vol 266, p 453-464.

- [HLL 00] HOLMLUND P., LUNDSTROM L. et LINDBERG L. Mechanical impedance of the human body in vertical direction. *Applied Ergonomics*, 2000, vol 31, p 415-422.
- [HOW 89] HOWARTH H. Annoyance caused by railway vibration and noise in buildings. Ph.D. Thesis, University of Southampton. 1989.
- [HS 50] HAWKINS J. et STEVENS S. The masking of pure tones and of speech by white noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1950, vol 22, p 6-13.
- [HV 75] HAMER R. et VERRILLO R. Effect of sinusoidal maskers on vibrotactile information processing channels. ISR Res. Rpt. ISR-20, Institute for Sensory Research, Syracuse University, Syracuse, NY, 1975, p 36-40.
- [HVZ 83] HAMER R., VERRILLO R. et ZWISLOCKI J. Vibrotactile masking of pacinian and non-pacinian channels. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1983, vol 73, n° 4, p 1293-1303.
- [HZC 78] HAMER R., ZWISLOCKI J. et CAPRARO A. Vibrotactile masking: Evidence for a peripheral threshold. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1978, Suppl. 1 63, S75.

- [INT 89] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Mechanical vibration and shock. *Evaluation of human exposure to whole-body vibration. Part 2: Continuous and shock-induced vibration in buildings (1 to 80 Hz).* ISO 2631-2 : 1989. Geneva: ISO.
- [INT 95] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Reference threshold of hearing under free-field and diffuse-field listening conditions.* ISO 389-7: 1995. Geneva: ISO.
- [INT 97] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Mechanical vibration and shock. *Evaluation of human exposure to whole-body vibration. Part 1: General requirements.* ISO 2631-1 : 1997. Geneva: ISO.
- [JG 00] JANG H. et GRIFFIN M. Effect of phase, frequency, magnitude and posture on discomfort associated with differential vertical vibration at the seat and feet. *Journal of Sound and Vibration*, 2000, vol 229, n° 2, p 273-286.
- [JG 99] JANG H. et GRIFFIN M. The effect of phase of differential vertical vibration at the seat and feet on discomfort. *Journal of Sound and Vibration*, 1999, vol 223, n° 5, p 785-794.
- [KG 98] KITAZAKI S. et GRIFFIN M. Resonance behaviour of the seated human body and effects of posture. *Journal of Biomechanics*, 1998, vol 31, p 143-149.

- [KGS 88] KOLLMEIER B., GILKEY R. et SIEBEN U. Adaptive staircase techniques in psychoacoustics: A comparison of human data and a mathematical model. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1988, vol 83, n° 5, p 1852-1862.
- [LA 76] LOOMIS J. et APKARIAN-STIELAU P. A lateral masking effect in tactile and blurred visual letter recognition. *Perception & Psychophysics*, 1976, vol 20, n° 4, p 221–226.
- [LEE 01] LEEK M. Adaptive procedures in psychophysical research. *Perception & Psychophysics*, 2001, vol 63, n° 8, p 1279–1292.
- [LEV 71] LEVITT H. Transformed Up-Down methods in psychoacoustics. *Journal of Sound and Vibration*, 1971, vol 49, n° 2 (part 2), p 467-477.
- [LK 88] LAMORE P. et KEEMINK C. Evidence for different types of mechanoreceptors from measurements of the psychophysical threshold for vibrations under different stimulation conditions. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1988, vol 83, n° 6, p 2339-2351.
- [LLS 83a] LANDSTRÖM U., LUNDSTRÖM R. et STRANDBERG U-K. Perceptionförhållanden avseende helkroppsvibrationer i stående ställning (Perception of whole body vibration in standing posture). Undersökningsrapport 1983:17. Stockholm: Arbetskyddsstyrelsen. ISSN 0347-2248.

- [LLS 83b] LANDSTRÖM U., LUNDSTRÖM R. et STRANDBERG U-K. Perceptionför horisontella vibrationer i staende ställning (Perception of horizontal vibration in standing posture). Undersökningsrapport 1983:40. Umea: Arbetarskyddsstyrelsen.
- [LOU 70] LOUDA L. Perception and effect of the mixture of two vertical sinusoidal vibrations on sitting man. *Work Environment Health*, 1970, vol 7, n°1, p 62-66.
- [LUC 59] LUCE R. *Individual choice behavior*. New York, Wiley, 1959.
- [LUC 63] LUCE R. *Handbook of mathematical psychology*. vol 1. New York : In Luce, R. D., Bush, R. R., & Galanter, E., eds. 1963, p 103-189.
- [LUR 08] LAPID E., ULRICH R. et RAMMSAYER T. On estimating the difference limen in duration discrimination tasks: A comparison of the 2AFC and the reminder task. *Perception & Psychophysics*, 2008, vol 70, n° 2, p 291–305.
- [LWA 07] LJUNGGREN F., WANG J. et AGREN A. Human vibration perception from single and dual frequency components. *Journal of Sound and Vibration*, 2007, vol 300, p 13-24.
- [MC 91] MACMILLAN N. et CREELMAN D. *Detection theory: a user's guide*. Cambridge: Cambridge University Press. 1991.
- [MCK 71] MCKAY J. Human perception of whole body vibration. Memorandum n° 435. Institute of Sound and Vibration Research, University of Southampton, 1971.

- [MCK 72] MCKAY J. Human Response to Vibration: Some Studies of Perception and Startle. Ph.D. Thesis, University of Southampton, 1972.
- [MD 95] MEH D. et DENISLIC M. Influence of age, temperature, sex, height and diazepam on vibration perception. *Journal of the Neurological Sciences*, 1995, vol 134, p 136-142.
- [MEL 91] MELONI T. Wahrnehmung und Empfindung von komplexen, kombinierten Belastungen durch Vibration und Schall. Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 1991.
- [MFB 03] MARVIT P., FLORENTINE M. et BUUS S. A comparison of psychophysical procedures for level discrimination thresholds. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2003, vol 113, n° 6, p 3348-3361.
- [MG 00] MATSUMOTO Y. et GRIFFIN M. Comparison of biodynamic responses in standing and seated human bodies. *Journal of Sound and Vibration*, 2000, vol 238, n° 4, p 691-704.
- [MG 00] MORIOKA M. et GRIFFIN M. Difference thresholds for intensity perception of whole body vertical vibration: Effect of frequency and magnitude. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2000, vol 107, n° 1, p 620-624.



- [MG 01] MATSUMOTO Y. et GRIFFIN M. Modelling the dynamics mechanisms associated with the principal resonance of the seated human body. *Clinical Biomechanics*, 2001, vol 16, n° 1, p S31-S44.
- [MG 02a] MATSUMOTO Y. et GRIFFIN M. Effect of muscle tension on non linearities in the apparent masses of seated subjects exposed to vertical whole body vibration. *Journal of Sound and Vibration*, 2002, vol 253, p 77-92.
- [MG 02b] MANSFIELD N. et GRIFFIN M. Effects of posture and vibration magnitude on apparent mass and pelvis rotation during exposure to whole body vertical vibration. *Journal of Sound and Vibration*, 2002, vol 253, n° 1, p 93-107.
- [MG 02c] MORIOKA M. et GRIFFIN M. Dependence of vibrotactile thresholds on the psychophysical measurement method. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 2002, n°75, p 78–84.
- [MG 05] MATSUMOTO Y. et GRIFFIN M. Nonlinear subjective and biodynamic responses to continuous and transient whole body vibration in the vertical direction. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, vol 287, p 919-937.
- [MG 06] MORIOKA M. et GRIFFIN M. Magnitude dependence of equivalent comfort contours for fore and aft, lateral and vertical whole body vibration. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, vol 298, p 755-772.

- [MG 08] MORIOKA M. et GRIFFIN M. Absolute thresholds for the perception of fore and aft, lateral, and vertical vibration at the hand, the seat, and the foot. *Journal of Sound and Vibration*, 2008, vol 314, p 357-370.
- [MG 11] TOWARD M. et GRIFFIN M. Apparent mass of the human body in the vertical direction: Inter-subject variability. *Journal of Sound and Vibration*, 2011, vol 330, p 827-841.
- [MHLLN 06] MANSFIELD N., HOLMLUND P., LUNDSTRÖM R., LENZUNI P. et NATALETTI P. Effect of vibration magnitude, vibration spectrum and muscle tension on apparent mass and cross axis transfer functions during whole body vibration exposure. *Journal of Biomechanics*, 2006, vol 39, n° 2, p 3062-3070.
- [MIW 67a] MIWA T. Evaluation methods for vibration effect, part 1: Measurements of threshold and equal sensation contours of whole body for vertical and horizontal vibrations. *Industrial Health*, 1967, n°5, p 183–205.
- [MIW 67b] MIWA T. Evaluation methods for vibration effect, part 2: Measurements of equal sensation level for whole body between vertical and horizontal sinusoidal vibrations. *Industrial Health*, 1967, n°5, p 206–212.

- [MIW 68a] MIWA T. Evaluation methods for vibration effect, part 4: Measurements of vibration greatness for whole body and hand in vertical and horizontal vibrations. *Industrial Health*, 1968, n°6, p 1–10.
- [MIW 68b] MIWA T. Evaluation methods for vibration effect, part 5: Calculation methods for vibration greatness level on compound vibrations. *Industrial Health*, 1968, n°6, p 11–17.
- [MKT 85] McKEE S., KLEIN S. et TELLER D. Statistical properties of forced choice psychometric functions : Implications of probit analysis. *Perception & Psychophysics*, 1985, vol 37, n° 4, p 286–298.
- [MM 07] MANSFIELD N. et MAEDA S. The apparent mass of the seated human exposed to single axis and multi axis whole body vibration. *Journal of Biomechanics*, 2007, vol 40, p 2543-2551.
- [MMO 02] MATSUMOTO Y., MAEDA S. et OJI Y. Influence of frequency on difference thresholds for magnitude of vertical sinusoidal whole body vibration. *Industrial Health*, 2002, n°40, p 313–319.
- [MPRH 93] MAGNUSSON M., POPE M., ROSTEDT M. et HANSSON T. Effect of backrest inclination on the transmission of vertical vibrations through the lumbar spine. *Clinical Biomechanics*, 1993, vol 8, p 5-12.

- [MY 69] MIWA T. et YONEKAWA Y. Evaluation methods for vibration effect, part 9: Response to sinusoidal vibration at lying posture. *Industrial Health*, 1969, n°7, p 116–126.
- [MYK 84] MIWA T., YONEKAWA Y. et KANADA K. Thresholds of perception of vibration in recumbent men. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1984, vol 75, p 849-854.
- [NAW 02] NAWAYSEH N. Modelling the vertical and fore and aft forces caused by whole body vertical vibration. *United Kingdom Conference on Human Responce to Vibration*, Department of Human Sciences, Loughborough University, UK, 18-20 September, 2002.
- [NG 03] NAWAYSEH N. et GRIFFIN M. Non linear dual axis biodynamic response to vertical whole body vibration. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, vol 268, p 503-523.
- [NG 04] NAWAYSEH N. et GRIFFIN M. Triaxial forces at the seat and backrest during whole body vertical vibration. *Journal of Sound and Vibration*, 2004, vol 277, p 309-326.
- [NG 05] NAWAYSEH N. et GRIFFIN M. Non linear dual axis biodynamic response to fore and aft whole body vibration. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, vol 282, p 831-862.
- [NG 05] NAWAYSEH N. et GRIFFIN M. Triaxial forces at the seat and backrest during whole body fore and aft vibration. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, vol 281, p 921-942.

- [NG 05] NAWAYSEH N. et GRIFFIN M. Effect of seat surface angle on forces at the seat surface during whole body vertical vibration. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, vol 284, p 613-634.
- [PA 07] PARIZET E. et AMARI M. Vibro-acoustical comfort in cars at idle: human perception of simulated sounds and vibrations from 3 and 4 cylinder diesel engines. *Int. J. Vehicle Noise and Vibration*, 2007, vol 3, n° 2, p 143-156.
- [PAR 81] PARSONS K. Vibration perception thresholds and their application to building vibration. *Presented at the Meeting of the United Kingdom Informal Group on Human Response to Vibration*, Edinburgh, 1981.
- [PBP 04] PARIZET E., BROCARD J. et PIQUET B. Influence of noise and vibration to comfort in diesel engine cars running at idle. *Acta Acustica United with Acustica*, 2004, vol 90, p 987-993.
- [PG 88] PADDAN G. et GRIFFIN M. The transmission of translational seated vibration to the head. I. Vertical seat vibrations. *Journal of Biomechanics*, 1988, vol 21, p 191-197.
- [PG 88] PARSONS K. et GRIFFIN M. Whole body vibration perception thresholds. *Journal of Sound and Vibration*, 1988, vol 121, n° 2, p 237-258.
- [PR 04] POCOCK G. et RICHARDS C. *Physiologie humaine. Les fondements de la médecine*. Paris, Masson. 2004.

- [RM 31] REIHER H. et MEISTER F. The effect of vibration on people, *Forschun; auf dem Gebiete des Ingenieurwesens*, 1931, 2, 11. pp. 381–386. Translation: Rep.F-TS-616-RE. Air Material Command, Wright Field. OH, 1946.
- [SAT 61] SATO M. Response of pacinian corpuscles to sinusoidal vibration. *J. Physiol.* 1961, vol 159, p 391-409.
- [SD 01] SILBERNAGL S. et Despopoulos A. *Atlas de poche de Physiologie*. 3<sup>e</sup> Ed. France. Flammarion. 2001.
- [SHE 64] SHERRICK C. Effect of double simultaneous stimulation of the skin. *Am. J. Psychol.*, 1964, vol 77, p 42-53.
- [SIM 88] SIMPSON W. The method of constant stimuli is efficient. *Perception & Psychophysics*, 1988, vol 44, n<sup>o</sup> 5, pp. 433-436.
- [SMG 06] SUBASHI G., MATSUMOTO Y. et GRIFFIN M. Apparent mass and cross axis apparent mass of standing subjects during exposure to vertical whole body vibration. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, vol 293, p 78-95.
- [SNY 73] SNYDER R. Vibrotactile masking: A comparison of psychophysical procedures. Doctoral dissertation, Indiana University. Bloomington, Indiana, 1973.
- [SNY 77] SNYDER R. Vibrotactile masking: A comparison of psychophysical procedures. *Perception & Psychophysics*, 1977, vol 22, n<sup>o</sup> 5, p 471–475.

- [SPG 82] SHELTON B., PICARDI M., et GREEN D. Comparison of three adaptive psychophysical procedures. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1982, vol 71, n° 6, p 1527-1533.
- [SR 90] SCHLAUCH R. et ROSE R. Two, three, and four interval forced choice staircase procedures: Estimator bias and efficiency. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1990, vol 88, n° 2, p 732-740.
- [SRKSBEH 89] SEIDEL H., RICHTER J., KUREROV N., SCHAJPAK E., BLÜTHNER R., ERDMANN U. et HINZ B. Psychophysical assessment of sinusoidal whole body vibration in z-axis between 0.6 and 5 Hz combined with different noise levels. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 1989, n°61, p 413–422.
- [SS 06] SERRANO I. et SIERRA V. The effect of white noise mask level on sinewave contrast detection thresholds and the critical band masking model. *The Spanish Journal of Psychology*, 2006, vol 9, n° 2, p 249–262.
- [SS 06] SERRANO I. et SIERRA V. The effect of white noise mask level on sinewave contrast detection thresholds and the critical band masking model. *The Spanish Journal of Psychology*, 2006, vol 9, n° 2, p 249-262.
- [SS 84] SHELTON B. et SCARROW I. Two-alternative versus three-alternative procedures for threshold estimation. *Perception & Psychophysics*, 1984, vol 35, n° 4, p 385–392.

- [STI 89] STILLMAN J. A comparison of three adaptive psychophysical procedures using inexperienced listeners. *Perception & Psychophysics*, 1989, vol 46, n° 4, p 345–350.
- [TAY 71] TAYLOR M. On the efficiency of psychophysical measurement. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1971, vol 49, n° 2 (part 2), p 505-508.
- [TC 67] TAYLOR M. et CREELMAN C. PEST: Efficient estimates on probability functions. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1967, vol 41, n° 4, p 782-787.
- [TDKM 68] TALBOT W., DARIAN-SMITH I., KORNHUBER H. et MOUNTCASTLE V. The sense of flutter-vibration: Comparison of the human capacity with response patterns of mechanoreceptive afferents from the monkey hand. *Journal Neurophysiol.*, 1968, vol 31, p 301-334.
- [TFC 83] TAYLOR M., FORBES S. et CREELMAN C. PEST reduces bias in forced choice psychophysics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1983, vol 74, n° 5, p 1367-1374.
- [TRE 95] TREUTWEIN B. Minireview. Adaptive Psychophysical Procedures. *Vision Research*, 1995, vol 35, n° 17, p 2503 – 2522.
- [TS 99] TREUTWEIN B. et STRASBURGER H. Fitting the psychometric function. *Perception & Psychophysics*, 1999, vol 61, n° 1, p 87–106.



- [UTSH 01] URDAPILLETA I., TON NU C., SAINT DENIS C. et HUON F. *Traité d'évaluation sensorielle. Aspects cognitifs et métrologiques des perceptions*. Paris. Dunod. 2001.
- [VC 75] VERRILLO R. et CAPRARO A. Effect of extrinsic noise on vibrotactile information processing channels. *Percept. Psychophys.*, 1975, vol 18, p 88-94.
- [VER 62] VERRILLO R. Investigation of some parameters of the cutaneous threshold for vibration. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1962, vol 34, p 1768-1773.
- [VER 63] VERRILLO R. Effect of contactor area on the vibrotactile threshold. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1963, vol 35, p 1962-1966.
- [VER 65] VERRILLO R. Temporal summation and vibrotactile sensitivity. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1965, vol 37, p 843-846.
- [VER 68] VERRILLO R. A duplex mechanism of mechanoreception. *The Skin Senses*. édité par D. R. Kenshalo (Charles Thomas, Springfield, IL). 1968. p 139-159.
- [VG 75] VERILLO R. et GESCHEIDER G. Enhancement and summation in the perception of two successive vibrotactile stimuli. *Perception & Psychophysics*, 1975, vol 18, n° 2, p 128-136.

- [WAL 61a] WALSH E. Sensations aroused by rhythmically repeated linear motion phase relationships. *Journal of Physiology*, 1961, vol 155, p 53-54.
- [WAL 61b] WALSH E. Role of the vestibular apparatus in the perception of motion on a parallel swing. *Journal of Physiology*, 1961, vol 155, p 506-513.
- [WAL 62] WALSH E. The perception of rhythmically repeated linear motion in the horizontal plane. *British Journal of Psychology*, 1962, vol 53, p 439-445.
- [WAL 64] WALSH E. The perception of rhythmically repeated linear motion in the vertical plane. *Quarterly Journal Experimental Physiology*, 1964, vol 49, p 58-65.
- [WEI 41] WEITZ J. Vibratory sensitivity as a function of skin temperature. *J. Experimental Psychology*, 1941, p 21–36.
- [WF 90] WATSON A. et FITZHUGH A. The method of constant stimuli is inefficient. *Perception & Psychophysics*, 1990, vol 47, n° 1, p 87–91.
- [WG 98] WEI L. et GRIFFIN M. The influence of seat cushions inclination on subject apparent mass and seat transmissibility, Perception of whole body linear oscillation. *United Kingdom Group Meeting on Human Response to Vibration*, Health and Safety Executive, Buxton, Derbyshire, England, 16-18 September, 1998.

- [WJG 76] WIER C., JESTEADT W. et GREEN D. A comparison of method of adjustment and forced choice procedures in frequency discrimination. *Perception & Psychophysics*, 1976, vol 19, n° 1, p 75-79.
- [WJPR 74] WISS P., JOHN F., PARMELEE P. et RICHARD A. Human perception of transient vibrations. *Journal of the Structural Division*, 1974, vol 100. ST4 Pro. Paper 10495.
- [ZF 81] ZWICKER E. et FELDTKELLER R. *Psychoacoustique. L'oreille récepteur d'information*. Paris : Masson, 1981.
- [ZF 99] ZWICKER E. et FASTL H. *Psychoacoustics. Facts and Models*. 2<sup>nd</sup> ed. Berlin: Springer-Verlag, 1999.

