

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté de génie
Département de génie mécanique

ÉTUDE PAR SOUS-STRUCTURATION
DES VIBRATIONS TRANSMISES AU SYSTÈME
MAIN-BRAS DES CYCLISTES

Thèse de Doctorat
Spécialité : génie mécanique

Sébastien PERRIER

Jury : Yvan CHAMPOUX (directeur)
Jean-Marc DROUET (co-directeur)
Alain BERRY
Denis RANCOURT
Simon RICHARD

RÉSUMÉ

Depuis quelques années dans le domaine du cyclisme de route, le confort des vélos est devenu un élément au moins aussi recherché que la performance. Le confort est une préoccupation majeure pour 90 % des cyclistes. Les cyclistes sur route passionnés enfourchent leurs vélos pendant plusieurs centaines d'heures chaque année. Ils souhaitent donc utiliser un vélo qui aura la capacité de réduire les vibrations générées par la route. Un sondage réalisé auprès de 320 cyclistes a montré que les vibrations transmises au niveau de la main sont considérées comme la plus grande source d'inconfort.

Ce travail a permis de développer une approche permettant d'estimer le niveau de vibrations transmis au niveau de la main du cycliste par sous-structuration. Les méthodes de sous-structuration permettent de prédire le comportement dynamique d'un assemblage de structures par caractérisation de chacune des structures prise séparément. Bien que ces méthodes existent depuis des dizaines d'années, aucune étude n'avait investigué l'assemblage de deux structures par sous-structuration lorsqu'une d'entre elles est l'Humain. L'approche proposée consiste à mesurer la réponse biodynamique du système main-bras en posture cycliste et à prédire la puissance vibratoire au niveau de la main du cycliste à l'aide d'une méthode de sous-structuration.

Cette thèse présente les éléments importants issus de ces travaux. Deux méthodes de couplage ont été identifiées et testées pour prédire l'influence du système main-bras sur le comportement dynamique de structures mécaniques simples. La variabilité de réponse du système main-bras de plusieurs sujets a été analysée. Des caractéristiques communes à plusieurs sujets ont été identifiées dans la réponse biodynamique de leurs systèmes main-bras. Finalement, l'importance relative du cycliste par rapport au vélo sur le comportement dynamique de l'assemblage vélo – cycliste au niveau de la main a conduit au développement d'une méthode de caractérisation de la réponse vibratoire des vélos seuls.

Mots clés : Vibrations, Dynamique des structures, Sous-structuration, Biodynamique, Interactions Humain – structure, Système main-bras

REMERCIEMENTS

Mes remerciements vont tout particulièrement à mes directeurs de recherche, Yvan Champoux et Jean-Marc Drouet, professeurs au département de génie mécanique de l'Université de Sherbrooke, pour leur disponibilité pendant ce projet. Je tiens également à remercier les membres du jury pour leurs commentaires concernant cette thèse; Alain Berry, Denis Rancourt, professeurs au département de génie mécanique de l'Université de Sherbrooke et Simon Richard, expert validation de produits chez Camoplast Solideal.

Par ailleurs, ces quatre années de doctorat se sont déroulées dans un environ très agréable. Je tiens à remercier pour cela Julien Lépine, étudiant à la maîtrise au sein du laboratoire VélUS, Jean-Philippe Pelland-Leblanc, assistant de recherche chez VélUS, ainsi que l'ensemble des stagiaires qui se sont succédés chez VélUS et dont l'aide a été précieuse pour divers aspects; Camille Brousseau, Michael Charrette, Éric Côté, Louis Formigal, Francis Marois et Alexandre Papillon.

Je remercie l'ensemble des étudiants qui ont cheminés au sein du Groupe d'Acoustique de l'Université de Sherbrooke (GAUS) et avec qui j'ai passé de bons moments. Concernant le GAUS, ces remerciements ne seraient pas complets sans citer Chantal Simard, technicienne au GAUS, Patrick Lévesque, ouilleur-ajusteur et Andrée Paradis, secrétaire.

Concernant leur aide ponctuelle durant le projet, je voudrais remercier Maxime Nicole, ingénieur analyste IMAO, CAO et FAO, Yann Pasco, professionnel de recherche niveau III, et Steve Labbé concernant les éléments finis; Brian Driscoll et Paul Champagne, techniciens pour le support informatique; Debbie Tacium pour la correction d'articles en anglais et Christian Clavet pour le collage de jauges.

Je voudrais également remercier les sujets qui ont acceptés de participer aux différentes mesures sur le système main-bras et qui ont contribués aux résultats obtenus lors de ce doctorat, ainsi que l'entreprise Cervélo – Vroomen White Design pour son appui financier et le partenariat très agréable que nous avons eu durant l'ensemble du projet, notamment avec Richard Matthews et Damon Rinard.

Finalement, je tiens à remercier ma famille et mes ami(e)s qui ont toujours été présents, dans les bons comme dans les moins bons moments. À ce titre, je voudrais remercier Skype, qui a rendu l'éloignement avec mes proches moins difficile à supporter.

Merci à tous !

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION.....	1
1.1	Mise en contexte et problématique.....	1
1.2	Définition du projet de recherche.....	2
1.2.1	Un projet de recherche multidisciplinaire.....	2
1.2.2	Le projet de recherche doctorale.....	3
1.3	Objectifs du projet de recherche doctorale.....	5
1.4	Contributions originales.....	6
1.5	Plan de la thèse.....	7
2	REVUE DE L'ÉTAT DE L'ART.....	11
2.1	Les vibrations dans le domaine du cyclisme.....	11
2.2	Le système main-bras.....	20
2.2.1	Premières études sur le système main-bras.....	20
2.2.2	Les normes.....	21
2.2.3	Facteurs influents.....	24
2.2.4	Disparité des résultats.....	26
2.2.5	Depuis les années 2000.....	28
2.3	Les méthodes de sous-structuration.....	30
2.3.1	Revue historique.....	30
2.3.2	Concept de la sous-structuration.....	33
2.3.3	Expansion des différentes méthodes.....	34
2.3.4	Distinction entre méthodes modales et méthodes utilisant les FRFs.....	35
2.3.5	La sous-structuration dans le domaine fréquentiel.....	37
2.3.6	Avantages et limitations.....	38
2.4	Synthèse.....	39
3	PRÉDICTION DU COMPORTEMENT VIBRATOIRE D'UNE STRUCTURE COUPLÉE AU SYSTÈME MAIN-BRAS.....	41
3.1	Cas d'étude no 1 : Couplage uniaxial entre le système main-bras et une poutre.....	42
3.1.1	Formulation de la méthode de couplage pour une étude uniaxiale.....	43
3.1.2	Données expérimentales mesurées sur l'assemblage.....	48
3.1.3	Caractérisation vibratoire de la poutre.....	49
3.1.4	Attentions particulières pour caractériser le système main-bras.....	49
3.1.5	Résultats.....	52

3.1.6	Validation.....	55
3.2	Cas d'étude no 2 : Couplage bi-axial entre le système main-bras et une poutre	58
3.2.1	Formulation pour un couplage bi-axial et hypothèses simplificatrices.....	59
3.2.2	Posture d'étude et mesures bi-axiales du système main-bras	59
3.2.3	Données expérimentales mesurées sur la poutre.....	60
3.2.4	Résultats.....	61
3.2.5	Validation.....	64
3.3	Cas d'étude no 3 : Couplage hybride entre une structure représentant un cockpit de vélo et les mains du cycliste.....	68
3.3.1	Formulation des équations de couplage.....	68
3.3.2	Mesures expérimentales sur assemblage pour diverses postures.....	72
3.3.3	Caractérisation du système main-bras.....	74
3.3.4	La structure mécanique représentant un cockpit de vélo	76
3.3.5	Comparaison entre mesures expérimentales sur les structures couplées et prédictions de couplage hybride	77
3.4	Conclusion	81
4	RÉPONSE BIODYNAMIQUE DU SYSTÈME MAIN-BRAS	83
4.1	Les facteurs influençant la réponse du système main-bras	84
4.1.1	Dépendance en fonction de la fréquence et de l'excitation	84
4.1.2	Postures du système main-bras et forces de contact	85
4.1.3	Les paramètres morphologiques des différents sujets.....	86
4.2	Le système main-bras en postures « standards »	86
4.2.1	Les différentes configurations de mesures.....	87
4.2.2	Le protocole de réalisation des mesures	87
4.2.3	Les résultats en fonction des sujets.....	88
4.3	Le système main-bras en postures « cyclistes ».....	93
4.3.1	Les différentes configurations de mesures.....	93
4.3.2	Le protocole de réalisation des mesures	94
4.3.3	Les résultats en fonction des sujets	97
4.4	Étude d'intra- et intervariabilité du système main – bras	108
4.4.1	La biodynamique du système main-bras : une caractéristique spécifique à l'individu.....	110
4.4.2	Intravariabilité et Intervariabilité en postures « cyclistes »	111
4.4.3	La possibilité d'un Gain Universel en postures « cyclistes »	114
4.5	Conclusion	122

5	PRÉDICTION DE LA PUISSANCE AUX MAINS DU CYCLISTE ET DIFFÉRENCES ENTRE VÉLOS.....	125
5.1	La puissance : un critère révélateur des vibrations transmises.....	127
5.1.1	Développement des équations de la puissance vibratoire.....	127
5.1.2	Équations de prédiction de la puissance par sous-structuration.....	129
5.1.3	Mesures de la puissance transmise au niveau des mains lors d'une sollicitation verticale sous le vélo de route.....	132
5.1.4	Comparaison entre mesures de puissance directement sur l'assemblage vélo – cycliste et prédiction à l'aide d'une méthode de sous-structuration.....	136
5.1.5	Points saillants.....	138
5.2	Détermination de la puissance transmise au système main-bras du cycliste sur 8 vélos.....	139
5.2.1	Montage expérimental.....	139
5.2.2	Résultats de mesures.....	140
5.2.3	Classement des vélos en fonction de la puissance mesurée.....	141
5.2.4	Points saillants.....	144
5.3	Caractérisation de la réponse vibratoire des vélos seuls.....	145
5.3.1	Une méthode inspirée par la théorie de sous-structuration.....	146
5.3.2	Le montage expérimental.....	148
5.3.3	Analyse des données de transmissibilité.....	153
5.3.4	Comparaison des classements en puissance sur les assemblages vélos – cycliste et en transmissibilité sur les vélos seuls.....	156
5.3.5	Points saillants.....	158
5.4	Conclusion.....	159
6	DISCUSSION.....	161
6.1	La prédiction par sous-structuration lors d'interactions Humain – structure sous sollicitation vibratoire.....	162
6.2	L'analyse des réponses biodynamiques du corps humain : la possibilité d'obtention d'un « Gain Universel ».....	164
6.3	La caractérisation des structures seules dans le processus de diagnostic et d'amélioration du design.....	165
7	CONCLUSION.....	167
7.1	Couplage système main-bras – structure.....	168
7.2	Réponses biodynamiques et Gain Universel.....	169
7.3	Prédiction de la puissance transmise et influence du cycliste.....	169
7.4	Méthode de caractérisation des vélos seuls.....	170

7.5	Contributions.....	170
7.6	Futurs travaux suggérés	172
8	ANNEXES	175
8.1	Vitesse à l'interface entre deux structures dans le cas d'une excitation par la base.....	175
8.2	Cocotte instrumentée.....	177
9	LISTE DES RÉFÉRENCES	179

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Interaction des sphères de compétences dans le cadre du projet avec Cervélo - VWD : De la connaissance au savoir-faire.....	2
Figure 1-2 : Schéma de l'approche proposée mettant en évidence les grands thèmes de la thèse et les objectifs secondaires	8
Figure 2-1 : FRFs mesurées sur un cintre suivant l'axe z avec et sans cycliste (Wojtowicki <i>et al.</i> , 2001).....	12
Figure 2-2 : Appareil permettant de mesurer la consommation d'oxygène du cycliste (Hastings <i>et al.</i> , 2004).....	13
Figure 2-3 : DSP de l'accélération mesurée au moyeu (foncé) et à la base de la selle (clair) pour chaque cadre (Hastings <i>et al.</i> , 2004)	13
Figure 2-4 : Potence instrumentée (Richard, 2005).....	16
Figure 2-5 : Cintre instrumenté avec des jauges (Gauche) et insert de selle instrumenté avec des jauges (Droite) pour détermination de la force au niveau du cintre et de la selle (Vanwalleghem <i>et al.</i> , 2012a, 2012b).....	18
Figure 2-6 : Tests sur route pavée à Reims (France) (Chimentin <i>et al.</i> , 2013).....	19
Figure 2-7 : Accéléromètre sur la potence (Gauche) et sur le poignet (Droite) (Chimentin <i>et al.</i> , 2013).....	19
Figure 2-8 : Courbe de pondération pour les vibrations du système main-bras (ISO-5349, 2001).....	22
Figure 2-9 : Les coordonnées du système main-bras adaptées de la norme ISO-5349 (ISO-5349, 2001).....	22
Figure 2-10 : Plages admissibles pour la position du bras (ISO-10068, 2012).....	23
Figure 2-11 : Valeurs de l'impédance mécanique du système main-bras au point d'entrée (ISO-10068, 2012) pour la direction z_h et zone de tolérance associée	24
Figure 2-12 : Impédance mécanique du système main-bras en fonction de la fréquence et de la direction d'excitation (Burström, 1990).....	25
Figure 2-13 : Corrélation entre les différents facteurs biologiques du système main-bras (doigts – paume – poignet – bras) et l'impédance mécanique en fonction de la fréquence (Burström, 1990)	25
Figure 2-14 : Comparaison de l'amplitude de l'impédance du système main-bras provenant de plusieurs études pour une posture dont le coude est à 90° (Adewusi <i>et al.</i> , 2008).....	27
Figure 2-15 : Schéma d'un assemblage de deux sous-structures en fonction des degrés de liberté de couplage	33
Figure 2-16 : Représentation de la sous-structuration en fonction des 3 domaines, des conditions de compatibilité et d'équilibre et des méthodes associées	35
Figure 3-1 : Exemple illustratif d'un couplage entre deux sous-structures « a » et « b ».....	43

Figure 3-2 : Exemple de couplage où la sous-structure « a » possède cinq points d'intérêt (deux dans l'ensemble d'interface I et trois dans l'ensemble A) et « b » possède quatre points d'intérêt (deux dans l'ensemble I et deux dans l'ensemble B)	44
Figure 3-3 : Configuration de couplage entre le système main-bras et une poutre.....	47
Figure 3-4 : Montage expérimental pour mesurer le comportement dynamique de l'assemblage (main sur poutre) pour 4 différentes forces de poussée de la main au niveau du point de contact I.....	49
Figure 3-5 : Diagramme de mesure de l'impédance du système main-bras	50
Figure 3-6 : Posture d'étude pour excitation verticale du bras selon l'axe z_h	51
Figure 3-7 : Impédance du système main-bras selon la posture d'étude et les quatre forces de poussée.....	52
Figure 3-8 : Comportement vibratoire de la poutre et influence de la main sur le comportement vibratoire de cette poutre pour les quatre forces de poussée (mesurées au point de contact I).....	54
Figure 3-9 : Prédications de couplage de la main sur la poutre pour une posture spécifique comparées aux mesures expérimentales pour quatre forces de poussée (a: 20 N, b: 30 N, c: 40 N et d: 50 N) en amplitude et en phase	56
Figure 3-10 : Système d'axes pour un cycliste sur son vélo.....	58
Figure 3-11 : Montage expérimental permettant de mesurer les caractéristiques dynamiques de la poutre seule ainsi que celles de l'assemblage « système main-bras – poutre ».....	61
Figure 3-12 : FRFs en accélération du comportement vibratoire de la poutre et de l'influence de la main sur la poutre selon l'axe horizontal x pour les quatre forces de poussée	62
Figure 3-13 : FRFs en accélération du comportement vibratoire de la poutre et de l'influence de la main sur la poutre selon l'axe vertical z pour les quatre forces de poussée	62
Figure 3-14 : Prédications de couplage de la main sur la poutre comparées aux mesures expérimentales pour quatre forces de poussée selon l'axe horizontal x (a: 20 N, b: 30 N, c: 40 N et d: 50 N)	65
Figure 3-15 : Prédications de couplage de la main sur la poutre comparées aux mesures expérimentales pour quatre forces de poussée selon l'axe vertical z (a: 20 N, b: 30 N, c: 40 N et d: 50 N)	66
Figure 3-16 : Structure mécanique représentant le cockpit de vélo installé sur le dispositif d'excitation par la base	71
Figure 3-17 : Cockpit avec le capteur AMTI 6D installés sur le dispositif d'excitation par la base (Gauche) et assemblage au complet avec les mains du cycliste (Droite)	73
Figure 3-18 : Trois postures de tests pour les mains sur le cockpit	73

Figure 3-19 : Poignées de mesures de l'impédance du système main-bras (Gauche : Poignée avec corps cylindrique pour posture a ; Droite : Poignée avec corps cubique pour postures b et c).....	75
Figure 3-20 : Mains sur le cockpit selon la posture c (Gauche) et reproduction de cette posture pour les mesures d'impédance de chaque main séparément (Droite).....	76
Figure 3-21 : Localisation des points d'intérêt sur le modèle EF du cockpit pour les différentes postures	77
Figure 3-22 : Comparaison entre mesure sur structures couplées (mains sur structure mécanique) et prédiction de couplage utilisant la formulation FBS pour la posture a	78
Figure 3-23 : Comparaison entre mesure sur structures couplées (mains sur structure mécanique) et prédiction de couplage utilisant la formulation FBS pour la posture b	78
Figure 3-24 : Comparaison entre mesure sur structures couplées (mains sur structure mécanique) et prédiction de couplage utilisant la formulation FBS pour la posture c	79
Figure 4-1 : Visualisation des deux postures « standards ».....	87
Figure 4-2 : Impédance du système main-bras en postures « standards » pour le sujet 1	89
Figure 4-3 : Impédance du système main-bras en postures « standards » pour le sujet 2	89
Figure 4-4 : Impédance du système main-bras en postures « standards » pour le sujet 3	89
Figure 4-5 : Impédance du système main-bras en postures « standards » pour le sujet 4	90
Figure 4-6 : Impédance du système main-bras en postures « standards » pour le sujet 5	90
Figure 4-7 : Impédance du système main-bras en postures « standards » pour le sujet 6	90
Figure 4-8 : Impédance du système main-bras en postures « standards » pour le sujet 7	91
Figure 4-9 : Impédance du système main-bras en postures « standards » pour le sujet 8	91
Figure 4-10 : Impédance du système main-bras en postures « standards » pour le sujet 9	91
Figure 4-11 : Impédance du système main-bras en postures « standards » pour le sujet 10	92
Figure 4-12 : Localisations de la main pour chacune des trois postures cyclistes	93
Figure 4-13 : Distances horizontales entre les composants en contact avec le cycliste	94
Figure 4-14 : Distances entre le sol et les composants en contact avec le cycliste	94
Figure 4-15 : Banc reproduisant l'arrière d'un vélo de route.....	95
Figure 4-16 : Poignée instrumentée cubique avec support plastique pour la réalisation des mesures en posture C.....	95
Figure 4-17 : Posture cycliste A (Mains à proximité de la potence) pour différents sujets	96
Figure 4-18 : Posture cycliste B (Mains aux extrémités basses du cintre) pour différents sujets	96
Figure 4-19 : Posture cycliste C (Mains sur les cocottes) pour différents sujets	96
Figure 4-20 : Impédance du système main-bras en postures « cyclistes » pour le sujet 1	98
Figure 4-21 : Impédance du système main-bras en postures « cyclistes » pour le sujet 2	99
Figure 4-22 : Impédance du système main-bras en postures « cyclistes » pour le sujet 3	100

Figure 4-23 : Impédance du système main-bras en postures « cyclistes » pour le sujet 4.....	101
Figure 4-24 : Impédance du système main-bras en postures « cyclistes » pour le sujet 5.....	102
Figure 4-25 : Impédance du système main-bras en postures « cyclistes » pour le sujet 6.....	103
Figure 4-26 : Impédance du système main-bras en postures « cyclistes » pour le sujet 7.....	104
Figure 4-27 : Impédance du système main-bras en postures « cyclistes » pour le sujet 8.....	105
Figure 4-28 : Impédance du système main-bras en postures « cyclistes » pour le sujet 9.....	106
Figure 4-29 : Impédance du système main-bras en postures « cyclistes » pour le sujet 10....	107
Figure 4-30 : Spectrogrammes de comparaison de la réponse biodynamique du système main-bras des dix sujets en posture « cycliste » C (Gauche : Force de poussée de 40 N ; Droite : Force de poussée de 80 N)	111
Figure 4-31 : Impédance du système main-bras en postures « cyclistes » pour le sujet 11	119
Figure 4-32 : Impédance du système main-bras en postures « cyclistes » pour le sujet 12....	120
Figure 5-1 : Schéma de l'organisation du chapitre 5	126
Figure 5-2 : Illustration d'un assemblage de deux structures a et b avec interface <i>I</i>	129
Figure 5-3 : Illustration du positionnement du cycliste lors des mesures de puissance à la main à l'aide de la cocotte instrumentée	133
Figure 5-4 : Visualisation d'un piston du système XCITE fixé sur une plaque d'acier boulonnée sur le sol avec une plaque sur le dessus permettant de venir déposer une des roues du vélo	134
Figure 5-5 : Densité spectrale de puissance (DSP) de la route de référence utilisée au laboratoire VélUS.....	134
Figure 5-6 : Spectre de puissance moyenne pour la main sur un Cervélo R3.....	135
Figure 5-7 : Comparaison entre puissance mesurée au niveau de la cocotte sur l'assemblage cycliste - Cervélo R3 et puissance prédite lorsque seules les caractéristiques dynamiques de la route et du système main-bras du cycliste sont prises en compte	137
Figure 5-8 : Comparaison entre la puissance mesurée au niveau de la main du cycliste sur son vélo et l'intervalle de confiance à 95 % pour la puissance prédite lorsque seules les caractéristiques de la route et du système main-bras sont utilisées.....	138
Figure 5-9 : Comparaison des spectres de puissance mesurée au niveau de la cocotte pour chacun des huit vélos	141
Figure 5-10 : Classement des huit vélos en fonction de la puissance mesurée à la cocotte et intervalle de confiance à 95 % correspondant	143
Figure 5-11 : Visualisation de la configuration qui permet de maintenir le vélo en place sur les excitateurs hydrauliques à l'aide de bungees.....	148
Figure 5-12 : Schéma du système de précharge.....	149
Figure 5-13 : Système de précharge du pneu en phase de charge.....	150
Figure 5-14 : Ordre de grandeur de la masse dynamique du système main-bras en posture cycliste.....	151

Figure 5-15 : Visualisation de l'installation des masses de 2 kg sur les cocottes instrumentées	152
Figure 5-16 : Comparaison des spectres de transmissibilité pour chacune des huit configurations avec vélos seuls	154
Figure 5-17 : Visualisation du classement des huit vélos en fonction de la somme de transmissibilité entre 1 et 60 Hz à l'aide de la méthode de caractérisation des vélos seuls et intervalle de confiance à 95 % associé	156
Figure 5-18 : Comparaison entre classements obtenus avec la puissance mesurée au niveau de la cocotte sur l'assemblage vélo - cycliste (Haut) et avec la méthode de caractérisation des vélos seuls en transmissibilité avec masses aux cocottes (Bas)	157
Figure 8-1 : Schéma d'un assemblage de deux structures avec excitation en vitesse au niveau de la base	175
Figure 8-2 : Schéma en vue de coupe de la cocotte instrumentée	177
Figure 8-3 : Visualisation des jauges installées sur le corps d'épreuve de la cocotte instrumentée	177
Figure 8-4 : Installation des cocottes instrumentées sur un cintre	178
Figure 8-5 : Schéma de présentation de la cocotte instrumentée installée sur un cintre	178

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 : Paramètres modaux extraits de l'analyse modale sans cycliste (Richard, 2005).....	15
Tableau 2-2 : Paramètres modaux extraits de l'analyse modale avec cycliste (Richard, 2005).....	15
Tableau 2-3 : Paramètres modaux extraits de l'OMA (Richard, 2005)	15
Tableau 3-1 : Caractéristiques de chacun des cas d'étude proposés	42
Tableau 3-2 : Écart maximum à la moyenne permettant d'obtenir un intervalle de confiance à 95 % sur l'impédance du système main-bras en amplitude pour chaque force de poussée.....	53
Tableau 4-1 : Détails morphologiques de base de chacun des sujets	86
Tableau 4-2 : Détermination des maxima et minima sur les courbes d'impédance du système main-bras en postures « standards » pour les dix sujets.....	109
Tableau 4-3 : Détermination des maxima et minima sur les courbes d'impédance du système main-bras en postures « cyclistes » pour les dix sujets	113
Tableau 4-4 : Identification des zones de minima et maxima communes à toutes les configurations en fonction des différents sujets (Identification des gains individuels).....	117
Tableau 4-5 : Identification des zones de minima et maxima communes à toutes les configurations et à tous les sujets (Identification du gain interindividuel)	118
Tableau 4-6 : Détails morphologiques de base des deux sujets ajoutés à l'étude.....	118
Tableau 4-7 : Détermination des maxima et minima sur les courbes d'impédance du système main-bras en postures « cyclistes » pour les deux nouveaux sujets	121
Tableau 4-8 : Gain Interindividuel pour les douze sujets en postures "cyclistes"	121
Tableau 5-1 : Comparaison des valeurs de puissance mesurée pour chacun des huit vélos avec l'intervalle de confiance à 95 % correspondant.....	142
Tableau 5-2 : Comparaison de la moyenne de la somme de la transmissibilité entre 1 et 60 Hz mesurée avec un pas de 1 Hz pour les trois mesures de répétabilités pour chacun des huit vélos avec l'intervalle de confiance à 95 % correspondant	155

1 INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte et problématique

De nos jours, un individu moyen est fréquemment exposé à des vibrations par contact avec des structures vibrantes. Ces expositions aux vibrations ont lieu lorsqu'un individu conduit une voiture, se déplace dans les transports, manipule des machines ou des outils sur son lieu de travail, ou encore pratique certains sports, parmi d'autres activités.

Ces expositions aux vibrations peuvent conduire à des troubles de la santé humaine et sont souvent perçues comme une source d'inconfort. L'exposition du corps humain aux sollicitations vibratoires a été et demeure un domaine de recherche très actif (Griffin, 1990 ; Mansfield, 2005). L'étude des interactions dynamiques et vibratoires entre humains et structures est ainsi essentielle afin de réduire la transmission des vibrations.

Depuis une vingtaine d'années, l'ingénierie du sport s'est à son tour intéressée aux problèmes de vibrations des équipements sportifs dans le but de réduire les vibrations transmises aux athlètes et ainsi améliorer leurs performances. La première conférence internationale sur l'Ingénierie du Sport fut d'ailleurs proposée par l'ISEA (International Sports Engineering Association) en 1996. Dès la première édition, on y retrouve des sports tels que le tennis, le golf, le ski, le cyclisme et de nombreux autres (Brody, 1996 ; Ekstrom, 1996 ; Katsanis et Grove, 1996 ; Muller et DeVaney, 1996).

Dans le domaine du cyclisme de route, le marché a assisté récemment à l'émergence du confort du cycliste comme une des caractéristiques les plus souhaitables d'un vélo. Parmi d'autres types de caractéristiques plus traditionnelles liées à la performance telles que l'aérodynamisme ou la légèreté, le confort du cycliste est devenu le nouveau défi des ingénieurs concepteurs. Depuis plusieurs années, on assiste à un usage abondant du terme « confort » dans les magazines spécialisés. Chaque fabricant veut, en effet, vanter les mérites de ses composants nouvellement conçus afin d'améliorer le confort.

Malheureusement, une distinction devient difficile entre une ingénierie de conception visant effectivement à réduire les vibrations et une stratégie marketing basée sur le confort. Une compréhension complète et éclairée de ce qu'est le confort du cycliste sous sollicitation vibratoire demeure encore à établir.

1.2 Définition du projet de recherche

1.2.1 Un projet de recherche multidisciplinaire

Le projet doctoral s'inscrit dans un projet de recherche multidisciplinaire plus vaste. Ce projet de recherche multidisciplinaire vise à définir et comprendre ce qu'est le confort du cycliste sous sollicitation vibratoire. Cela permettra au partenaire industriel Cervélo & Vroomen-White Design (Cervélo – VWD) de concevoir des vélos plus confortables. Ce projet est décomposé en plusieurs domaines de recherche :

- Dynamique des structures
- Biodynamique
- Perception

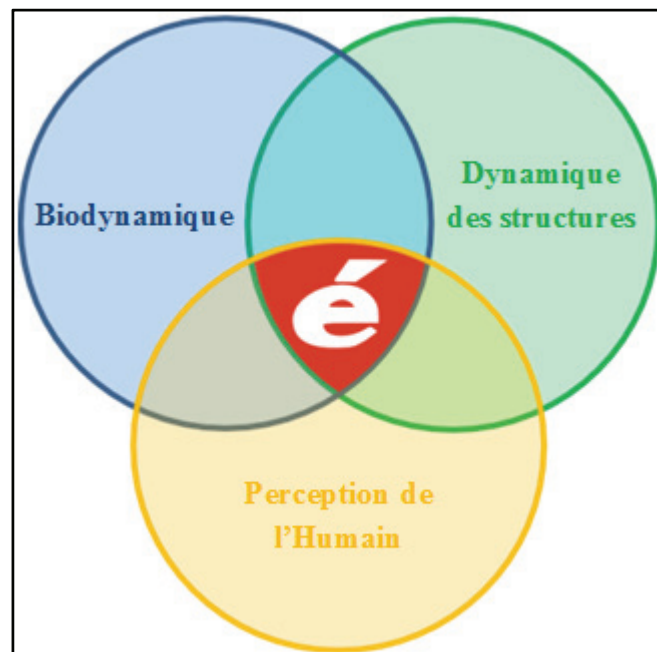


Figure 1-1 : Interaction des sphères de compétences dans le cadre du projet avec Cervélo - VWD : De la connaissance au savoir-faire

Les interactions entre ces différents domaines permettront de répondre à l'objectif principal du projet (figure 1-1).

1.2.2 Le projet de recherche doctorale

Le projet doctoral s'inscrit plus spécifiquement dans la partie « Biodynamique ». Ce projet de recherche doctorale vise à évaluer l'influence du cycliste sur le comportement dynamique du vélo ainsi qu'estimer la contribution de celui-ci sur la transmission des vibrations vers le membre supérieur provenant de la route.

Les cyclistes souhaitent utiliser un vélo qui, tout en étant léger et performant, aura la capacité de filtrer les vibrations générées par les défauts du revêtement routier. Ces sollicitations vibratoires issues de la route se propagent à travers les différents composants des vélos de route pour être finalement transmises au cycliste par l'intermédiaire de trois interfaces de contact. Ces interfaces de contact sont les pieds, les fesses et les mains.

Dans un contexte de confort lié à la transmission de vibrations au corps humain, l'interface de contact au niveau des mains est privilégiée. Un sondage révèle que les cyclistes pensent que les mains sont les plus importantes en termes de perception du confort (Ayachi *et al.*, 2013).

On cherche à estimer la contribution du système main-bras sur la transmission des vibrations provenant de la route et à évaluer l'influence du système main-bras sur le comportement dynamique de la structure. Le comportement dynamique du système main-bras est connu pour être dépendant de nombreux paramètres tels que la posture, la direction d'excitation, le type et le niveau d'excitation, la force de préhension, la force de poussée, la morphologie, et autres (Burström, 1990 ; Burström et Lundström, 1994 ; Gurrarn *et al.*, 1995 ; Tsuji *et al.*, 1995 ; Marsili et Rossi, 1996 ; Burström, 1997 ; Burström et Sorensson, 1999 ; Wasserman *et al.*, 2001 ; Aldien *et al.*, 2005, 2006 ; Besa *et al.*, 2007 ; Kaulbars et Lemerle, 2007 ; Adewusi *et al.*, 2010). De plus, le comportement dynamique du système main-bras est spécifique à l'individu. Compte tenu de cette variabilité de réponses possibles du système main-bras, les interactions dynamiques entre le cycliste et le vélo peuvent varier d'un cycliste à l'autre.

La connaissance des interactions dynamiques entre les assemblages de structures est une préoccupation majeure en génie mécanique. Depuis les années 1960, les méthodes de sous-structuration ont émergé comme un centre d'intérêt commun dans le domaine de la recherche en dynamique des structures. Par exemple, les méthodes SDM (Structural Dynamic Modification) ont pour but d'altérer le comportement dynamique de base d'une structure en couplant une structure « modifiante », généralement des masses ou des ressorts localisés (Avitabile, 2003 ; De Klerk *et al.*, 2008). Dans le cadre du projet doctoral, le système main-bras peut être vu comme la structure « modifiante ». La sous-structuration entre une structure mécanique et la variabilité de réponses du système main-bras devient une analyse par couplage de l'influence de diverses structures « modifiantes » sur le comportement dynamique de la structure mécanique de base.

L'utilisation d'une méthode de sous-structuration avec l'analyse de la réponse biodynamique du système main-bras permettra d'évaluer l'influence du cycliste sur le comportement dynamique de la partie avant du vélo. Afin d'estimer la contribution de celui-ci sur la transmission des vibrations provenant de la route, un critère de transmission vibratoire adéquat devra être utilisé. Une corrélation raisonnablement bonne entre la puissance vibratoire absorbée par le corps humain exposé à une sollicitation de type « vibrations du corps entier » (Whole-Body Vibration) et une sensation subjective de confort a été rapportée par le passé (Pradko *et al.*, 1965). Une étude récente émet l'hypothèse que la dépendance fréquentielle de la réponse biodynamique du système main-bras pourrait jouer un rôle important dans la détermination d'une courbe de pondération représentative des effets liés à une sollicitation vibratoire (Dong *et al.*, 2012). Par exemple, il a été démontré que la dépendance fréquentielle de la puissance vibratoire absorbée par le système main-bras (Dong *et al.*, 2006) est similaire à l'actuelle pondération en fréquences servant à l'évaluation des risques liés à l'exposition aux vibrations transmises à la main (ISO-5349, 2001). Cette pondération fut déterminée sur la base de courbes de sensation de confort de l'ensemble du système main-bras (Miwa, 1967).

Finalement, il apparaît qu'une combinaison entre méthode de sous-structuration et analyse de la réponse biodynamique du système main-bras permettra d'évaluer l'influence du système main-bras sur le comportement dynamique d'une structure de base et d'estimer la contribution

du système main-bras sur la transmission des vibrations provenant de la route à l'aide de la puissance comme critère de transmission vibratoire.

1.3 Objectifs du projet de recherche doctorale

A la lumière des éléments mentionnés précédemment, l'objectif principal du doctorat est fixé.

Objectif principal : Développer une approche permettant d'estimer le niveau de vibrations transmis au niveau de la main du cycliste par sous-structuration.

Objectifs secondaires :

- ✓ Identifier une (ou plusieurs) méthode(s) de couplage de structures qui soi(en)t utilisable(s) avec la réponse biodynamique du système main-bras.
- ✓ Prédire le comportement dynamique d'un assemblage comprenant une main par sous-structuration.
- ✓ Mesurer la réponse biodynamique du système main-bras de plusieurs sujets afin d'évaluer la variabilité des réponses.
- ✓ Identifier un indicateur qui puisse être obtenu par sous-structuration et qui témoigne des vibrations transmises au système main-bras.
- ✓ Développer une méthode de caractérisation de la réponse vibratoire des vélos seuls.

1.4 Contributions originales

L'étude des interactions « humains – structures » est un défi depuis plusieurs décennies. L'analyse de la réponse biodynamique du système main-bras a été l'une des premières solutions proposées par la communauté scientifique. Cependant, elle ne permet pas d'avoir une vision globale de couplage entre une structure mécanique et un système main-bras. En effet, il n'est pas possible d'évaluer l'influence du système main-bras sur le comportement dynamique d'une structure de base.

L'utilisation des méthodes de couplage par sous-structuration dans un contexte biodynamique offre donc un avantage sur cet aspect. Cette approche est une première contribution originale du doctorat. Cette approche propose l'utilisation d'une méthode de sous-structuration en combinaison avec la réponse biodynamique du système main-bras afin d'évaluer l'influence du système main-bras sur le comportement dynamique d'une structure mécanique de base. La caractérisation de la réponse biodynamique du système main-bras est mesurée dans les configurations de l'étude effectuée. De plus, le modèle de couplage permet de prédire le comportement dynamique de l'assemblage par rapport à celui de la structure mécanique seule. Cette approche offre donc une vision plus globale du couplage. Elle permet :

- d'analyser la réponse biodynamique du système main-bras ;
- d'évaluer la transmissibilité de l'assemblage ;
- de prendre en compte l'influence du système main-bras sur le comportement dynamique d'une structure mécanique de base.

Cette contribution à la connaissance scientifique est disponible sous forme d'un article de journal intitulé "The influence of a Human hand-arm system on the vibrational dynamic behaviour of a compliant mechanical structure" par Sébastien Perrier *et al.*, accepté pour publication dans le *Journal of Vibration and Control*.

D'autres contributions originales découlent de l'étude de la réponse biodynamique du système main-bras de plusieurs sujets. Dans la littérature sur la réponse biodynamique du corps

humain, le système main-bras est exclusivement étudié pour un humain dont le tronc est vertical. La mesure de la réponse biodynamique du système main-bras en postures cyclistes constitue donc une seconde contribution originale. De plus, les études scientifiques sur le système main-bras concluent que chaque individu est spécifique et que des conclusions communes sont difficilement identifiables. L'analyse de la variabilité des réponses du système main-bras révèle cependant que des conclusions communes aux sujets testés sont possibles en postures cyclistes. Ceci constitue donc une autre contribution originale du doctorat.

La dernière contribution du doctorat concerne la caractérisation de la réponse vibratoire des vélos. L'approche par sous-structuration permet de prédire le niveau de vibrations transmis aux mains du cycliste en fonction de la caractérisation des deux structures séparément. La formulation de ces équations de couplage a conduit au développement d'une méthode permettant de caractériser les vélos seuls. Pour pouvoir utiliser cette méthode de caractérisation des vélos seuls, un système innovant a été développé permettant à la fois de maintenir le vélo et de précharger les pneus lors des tests. Cette méthode permet d'avoir moins de variabilité étant donné qu'il n'y a pas de cycliste lors des tests. De plus, cette méthode permet d'obtenir un classement des vélos selon leur capacité d'isolation vibratoire qui est similaire aux résultats obtenus avec la méthode expérimentale complète. La méthode expérimentale complète consiste à caractériser la capacité d'isolation des vélos en présence de cyclistes.

1.5 Plan de la thèse

Deux grandes questions sont abordées dans cette thèse : l'analyse de la réponse biodynamique du système main-bras et le couplage par sous-structuration. Ces deux aspects déterminent la base de l'exposé de cette thèse. Les méthodologies qui permettent d'envisager les interactions Humain-structure par sous-structuration et par l'analyse de la réponse biodynamique du corps humain sont présentées dans cette thèse. La figure suivante schématise l'approche proposée. Elle met en correspondance les grands thèmes de la thèse avec les objectifs secondaires précédemment mentionnés.

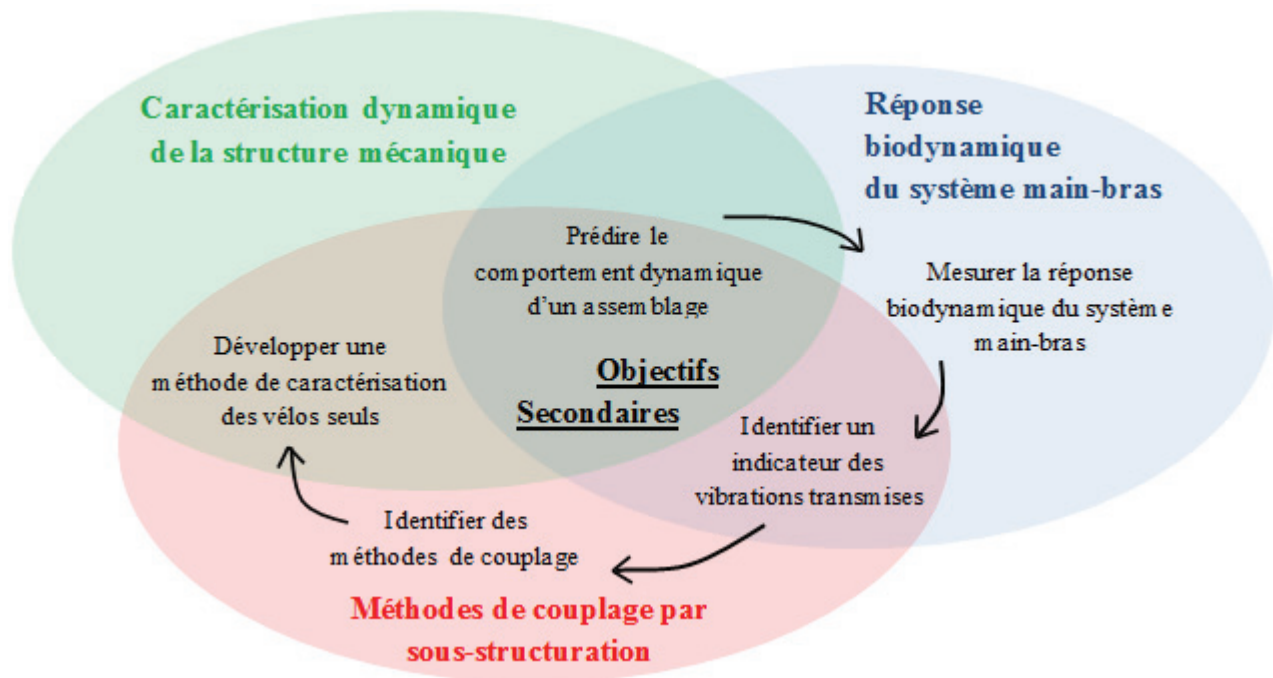


Figure 1-2 : Schéma de l'approche proposée mettant en évidence les grands thèmes de la thèse et les objectifs secondaires

Dans le chapitre 2, une revue de l'état des connaissances est effectuée. Les études concernant les vibrations dans le domaine du cyclisme de route sont présentées. Une analyse des travaux effectués par la communauté scientifique sur le système main-bras est également proposée ainsi qu'une revue sur les méthodes de couplage par sous-structuration. Des méthodes de couplage par sous-structuration potentiellement utilisables dans un contexte biodynamique d'assemblage avec l'humain sont alors identifiées. Pour conclure ce chapitre, une synthèse des éléments essentiels à la réalisation du doctorat est effectuée.

Dans le chapitre 3, à travers trois cas d'étude, la théorie du couplage par sous-structuration est présentée et appliquée entre une structure mécanique et le système main-bras. La nouveauté réside dans l'utilisation des méthodes de sous-structuration pour assembler des structures dont l'une est l'Humain. Ces cas d'étude démontrent qu'il est possible d'utiliser les méthodes de sous-structuration pour prédire l'influence du système main-bras sur le comportement dynamique d'une structure mécanique et mettent en évidence les avantages liés à la sous-structuration dans le cas d'un assemblage Humain-structure.

Dans le chapitre 4, le système main-bras est à l'étude. La réponse biodynamique du système main-bras de plusieurs sujets est mesurée selon plusieurs postures et un protocole préalablement établi. Une analyse de la réponse biodynamique du système main-bras de ces différents sujets est effectuée pour les différentes postures. Pour conclure, une étude de variabilité de réponses biodynamiques du système main-bras est effectuée.

Le chapitre 5 poursuit deux objectifs. Il introduit l'indicateur utilisé afin d'évaluer les vibrations transmises au cycliste et propose une nouvelle méthode de caractérisation des vélos seuls. Les prédictions de vibrations transmises au niveau de la main du cycliste obtenues par sous-structuration sont comparées avec des mesures réalisées directement sur l'assemblage vélo – cycliste. Finalement, la méthode de caractérisation des vélos seuls est présentée.

Le chapitre 6 est consacré aux discussions. Nous reviendrons sur les avantages et opportunités qu'offre cette nouvelle approche pour l'étude des interactions « humains – structures » sous sollicitation vibratoire. Nous parlerons de la possibilité d'obtenir des caractéristiques communes à un groupe d'individu malgré le caractère spécifique de la réponse biodynamique. Un « Gain Universel » existe-t-il pour les cyclistes ? Nous discuterons de l'utilisation de la caractérisation des structures seules dans le processus de diagnostic et d'amélioration du design.

2 REVUE DE L'ÉTAT DE L'ART

Ce doctorat est une recherche de type interdisciplinaire. Il y a des interactions entre trois disciplines. Ces disciplines sont les vibrations dans le domaine du cyclisme, la réponse biodynamique du système main-bras et les méthodes de sous-structuration.

Cette thèse propose d'utiliser les méthodes de sous-structuration pour étudier les interactions entre Humains et structures. Plus spécifiquement, il est proposé d'utiliser ces méthodes pour prédire les vibrations transmises au niveau de la main du cycliste sur son vélo. Dans ce chapitre, une revue de l'état des connaissances est effectuée afin de présenter les éléments de chacune des disciplines nécessaires à la compréhension de la thèse.

Une synthèse des éléments essentiels à la réalisation des travaux de doctorat est effectuée à la lumière de cette revue de littérature. Des méthodes de couplage par sous-structuration potentiellement utilisables dans un contexte d'assemblage avec l'Humain sont identifiées. Ceci permettra de répondre à l'objectif secondaire « Identifier une (ou plusieurs) méthode(s) de couplage de structures qui soi(en)t utilisable(s) avec la réponse biodynamique du système main-bras ».

2.1 Les vibrations dans le domaine du cyclisme

Dans le domaine du cyclisme de route, les études concernant la transmission des vibrations aux cyclistes sont peu nombreuses. Aux alentours des années 2000, les premières études ont ciblé les propriétés modales des vélos (Ferraresi *et al.*, 1998 ; Thibault et Champoux, 2000 ; Wojtowicki *et al.*, 2001). Une fonction de réponse en fréquence (FRF) mesurée au niveau du guidon entre une condition libre – libre avec vélo seul suspendu est notamment comparée avec une FRF mesurée au niveau du guidon lorsque le vélo est déposé sur le sol en présence d'un cycliste (figure 2-1). Il est conclu le cycliste a une influence importante sur les propriétés modales du vélo et qu'il ajoute un fort amortissement.

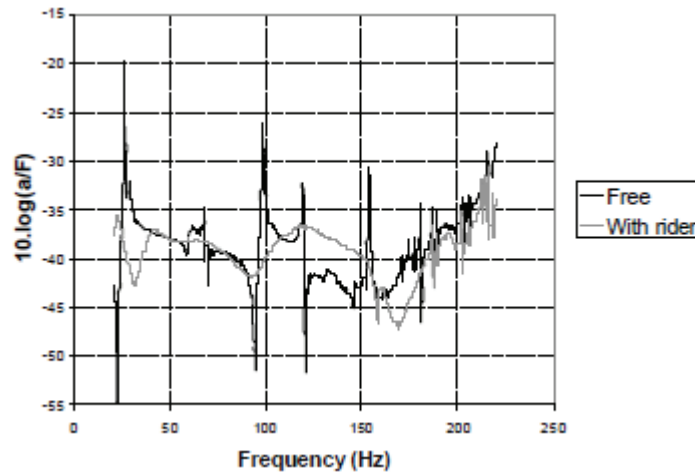


Figure 2-1 : FRFs mesurées sur un cintre suivant l'axe z avec et sans cycliste (Wojtowicki *et al.*, 2001)

Les vibrations sont également testées à l'aide d'impacts générés par de petites planches de bois collées sur le sol (Wojtowicki *et al.*, 2001). La plus haute fréquence excitée par ce genre de sollicitation est aux alentours de 50 Hz. Il fut conclu qu'un simulateur de route stationnaire serait nécessaire pour avoir un meilleur contrôle de certains paramètres.

Dans l'objectif d'étudier les vibrations transmises par la partie avant d'un vélo de route, une comparaison de plusieurs fourches est effectuée par analyse modale (Richard et Champoux, 2004). Trois configurations sont testées pour ces fourches : fourches suspendues en condition libre – libre, sur un vélo complet déposé sur le sol et sur un vélo complet avec cycliste. Ces résultats montrent que le comportement modal des fourches en condition libre – libre est très différent du comportement modal des fourches sur vélo avec cycliste, dû à un changement de conditions aux limites. De plus, des différences dans le comportement modal sur le vélo avec cycliste peuvent être observées entre les différentes fourches. Cette étude a permis de mettre en évidence que l'avant du vélo possède une dynamique importante sur la plage [0 ; 100] Hz et que des différences de comportement entre les composants peuvent être identifiées. Une autre étude concernant les fourches a permis de mettre en évidence que les inserts viscoélastiques présents sur certaines fourches ont une influence sur le comportement modal de la fourche en condition libre – libre mais n'ont aucune influence sur le comportement modal du vélo avec cycliste (Richard et Champoux, 2007).

En 2004, une étude tente d'investiguer les effets des vibrations transmises par la route sur la performance du cycliste (Hastings *et al.*, 2004). Les objectifs de cette étude étaient de développer un système permettant de caractériser l'effet des vibrations transmises depuis la route sur les performances du cycliste et d'utiliser cette méthode pour comparer l'influence du comportement dynamique de trois cadres sur les performances. Les trois cadres utilisés étaient en acier, en aluminium et en fibre de carbone. Le principe du test est le suivant : un cycliste roule à vitesse constante (19,3 km/h) sur un tapis roulant muni d'une bosse en polyuréthane conçue pour générer un spectre de vibrations jusqu'à 200 Hz. Pour mesurer les performances du cycliste, un appareil permettant de mesurer la consommation d'oxygène du cycliste est utilisé (figure 2-2). Pour la mesure des vibrations, deux accéléromètres sont placés respectivement au niveau du moyeu de la roue arrière et à la base de la selle.



Figure 2-2 : Appareil permettant de mesurer la consommation d'oxygène du cycliste (Hastings *et al.*, 2004)

Les données issues des mesures accélérométriques ont été utilisées pour calculer la densité spectrale de puissance (DSP) pour les trois cadres (figure 2-3).

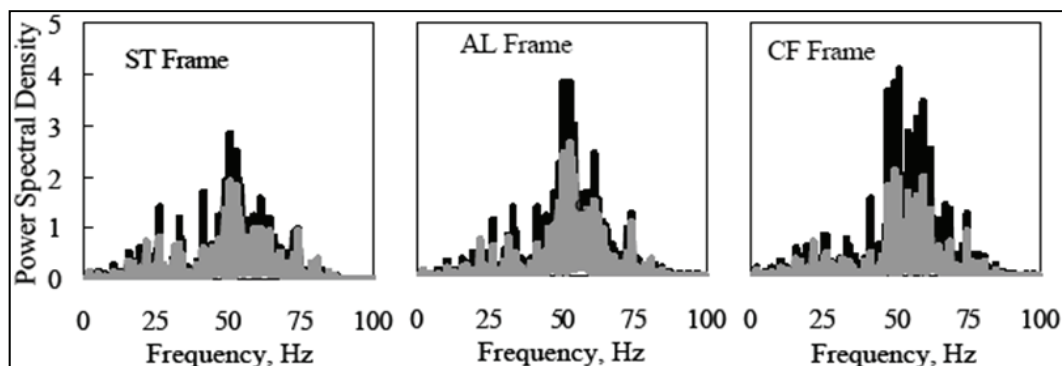


Figure 2-3 : DSP de l'accélération mesurée au moyeu (foncé) et à la base de la selle (clair) pour chaque cadre (Hastings *et al.*, 2004)

Les conclusions de cette étude sont que le cadre en fibre de carbone procure moins de vibrations sur la plage 15 – 45 Hz. En revanche, les résultats concernant la consommation d'oxygène ne montrent pas de différences significatives entre les différents cadres. Il n'y a alors aucune conclusion possible concernant la performance en fonction des vibrations transmises au cycliste.

En 2005, S. Richard présente l'étude complète issue de son projet de maîtrise dont l'objectif est de « comprendre le comportement dynamique d'un vélo de route en relation avec la quantification et la perception du confort ressenti aux mains du cycliste » (Richard, 2005). Son étude est présentée en trois parties : le comportement dynamique du vélo, la détermination des paramètres liés au confort et la perception du confort à vélo.

L'analyse du comportement dynamique du vélo se fait à l'aide d'analyses modales avec et sans cycliste. Dans un premier temps, l'excitation est générée par deux pots vibrants situés au moyeu avant et au guidon et la réponse vibratoire est mesurée en 69 points distribués sur l'ensemble du vélo. Cette configuration est utilisée avec et sans cycliste lorsque le vélo est déposé sur le sol. Par la suite, une analyse modale opérationnelle (OMA) fut utilisée afin de s'approcher de conditions réelles d'utilisation avec un cycliste. Ce type d'analyse permet d'extraire les paramètres modaux d'un vélo sans la connaissance de la force appliquée au système mais dans des conditions in situ (Richard et Champoux, 2005). Pour cela, un accéléromètre de référence est nécessaire. Cet accéléromètre est situé au niveau du moyeu avant du vélo et l'acquisition de la réponse vibratoire se fait suivant 20 points de mesure. Les résultats issus de ces analyses modales sont présentés dans les tableaux suivants.

Tableau 2-1 : Paramètres modaux extraits de l'analyse modale sans cycliste (Richard, 2005)

Fréquences [Hz]	Facteur d'amortissement structural [%]	Déformées modales
24,0	1,54	Déplacement vertical du cadre, flexion avant / arrière de la fourche
27,2	1,79	Torsion du tube de direction
33,5	1,67	Flexion avant / arrière de la fourche
39,8	1,28	1 ^{er} mode de flexion du cadre
44,0	0,45	Torsion de la potence
54,3	0,93	Flexion de la potence
67,5	0,27	Flexion avant / arrière du guidon

Tableau 2-2 : Paramètres modaux extraits de l'analyse modale avec cycliste (Richard, 2005)

Fréquences [Hz]	Facteur d'amortissement structural [%]	Déformées modales
27,8	7,1	Flexion avant / arrière de la fourche
48,9	5,8	1 ^{er} mode de flexion de la roue avant, torsion du cadre
87,5	1,6	2 ^{ème} mode de flexion de la roue avant, torsion de la potence
148	0,9	3 ^{ème} mode de flexion de la roue avant
174	2,6	Flexion latérale des extrémités du cintre, flexion latérale de la fourche
243	0,7	4 ^{ème} mode de flexion de la roue avant, flexion latérale de la fourche, flexion du cintre
290	0,7	Flexion latérale de la fourche, 1 ^{er} mode de flexion du tube horizontal et des haubans

Tableau 2-3 : Paramètres modaux extraits de l'OMA (Richard, 2005)

Fréquences [Hz]	Facteur d'amortissement structural [%]	Déformées modales
21,9	15,3	Déplacement vertical du vélo (mode de corps rigide)
34,1	13,3	Flexion avant / arrière de la fourche
51,4	6,1	Torsion du cadre
247,3	1,4	Flexion du cintre, flexion latérale de la fourche
289,7	1,7	Flexion latérale de la fourche, flexion des extrémités du cintre

A l'aide de ces tableaux, on constate que le nombre de modes dans la bande 0 – 100 Hz chute considérablement en présence de cycliste. De plus, le seul mode qui demeure commun est celui de flexion avant / arrière de la fourche (33,5 Hz pour l'analyse modale sans cycliste, 27,8 Hz pour l'analyse modale avec cycliste et 34,1 Hz pour l'OMA). On constate par ailleurs un amortissement plus élevé en présence de cycliste, notamment lors de l'analyse de type OMA.

La deuxième partie (détermination des paramètres liés au confort) vise à déterminer le lien existant entre le comportement dynamique du vélo et le confort du cycliste évalué pour la partie avant du vélo. Selon S. Richard, la mesure de l'accélération au niveau du cintre n'est pas satisfaisante car l'effet du couplage entre les mains et le guidon peut affecter considérablement les mesures. De plus, l'accélération est peu répétitive car plusieurs paramètres sont difficilement contrôlables (la position des mains, la force de préhension, la posture du cycliste ...). Afin de contrôler la posture du cycliste, une potence instrumentée fut développée (figure 2-4). Cette potence instrumentée permet de mesurer la force verticale.



Figure 2-4 : Potence instrumentée (Richard, 2005)

Cette potence instrumentée possède une double utilité : elle permet de contrôler la force appliquée par le cycliste par l'intermédiaire de la valeur de force statique et elle permet de mesurer la force dynamique lors des tests. Selon S. Richard, l'accélération ne semble pas adéquate comme mesurande, la force dynamique est alors étudiée. L'hypothèse est émise que, plus la force dynamique est grande, plus les sensations du cycliste sont désagréables. En revanche, aucune hypothèse n'est émise concernant le contenu fréquentiel.

Les tests sont réalisés en utilisant un goujon de bois installé sur un tapis roulant pour générer un impact au niveau de la roue avant. La roue arrière est surélevée pour ne pas frapper le goujon. Le signal étant transitoire, c'est le contenu énergétique de la force dynamique mesurée par la potence qui est choisie comme paramètre du confort (Richard et Champoux, 2006).

La dernière partie de son mémoire concerne la perception du confort et plus particulièrement la détermination de la résolution sensorielle des cyclistes. Le principe est d'établir la plus petite variation perceptible (PPVP) en termes de force dynamique mesurée à l'aide de la potence instrumentée. La démarche utilisée est de faire déceler à un cycliste une variation de pression du pneu avant. L'énergie du signal de force étant linéairement dépendante à la pression du pneu, déceler une variation de pression correspond à déceler une variation d'énergie en termes de force dynamique au niveau de la potence.

Il ressort de cette étude qu'un cycliste moyen est capable de déceler une différence d'énergie d'environ 2 lbf².s au niveau de ses mains. Par la suite, un test est réalisé avec 13 fourches. Les résultats montrent qu'un seul des sept participants possède la résolution sensorielle suffisante pour distinguer la fourche qui génère le plus de force de celle qui génère le moins de force au niveau de la potence.

Cette étude approfondie a ainsi permis de mieux comprendre plusieurs aspects (Champoux *et al.*, 2007). La force transmise semble être un bon moyen d'évaluer le confort vibratoire des cyclistes. Il est important de contrôler la posture des cyclistes lors des tests. D'après la résolution sensorielle des cyclistes, il n'est pas toujours possible de distinguer la différence entre des composants de vélo. Il persiste néanmoins quelques limitations : excitation par impact et non large bande, caractérisation uniquement au niveau des mains.

Pour surmonter ces limitations, des techniques de sollicitation vibratoire ont été développées permettant d'exciter en vibration un vélo sous ces deux roues simultanément (Lépine *et al.*, 2011). Ces techniques permettent notamment de pouvoir reproduire en partie le signal d'excitation mesuré sur la route (Lépine *et al.*, 2013a). De plus amples informations sur la

caractérisation de l'excitation de la route en termes de niveaux et de spectre fréquentiel sont disponibles dans ces articles (Lépine *et al.*, 2011, 2013a).

Depuis l'étude de Richard, d'autres études ont investigué le confort des vélos de route (Hölzel *et al.*, 2012 ; Olieman *et al.*, 2012 ; Lépine *et al.*, 2013b). Il ressort de ces études que plusieurs paramètres ont une influence sur les vibrations transmises au cycliste : l'état de surface de la route, la vitesse à laquelle le cycliste roule, la pression des pneus, et la capacité d'isolation des composants de vélo elles-mêmes. Par ailleurs, la puissance vibratoire fut proposée comme nouveau mesurande du confort (Vanwalleghem *et al.*, 2012a, 2012b). Un vélo est alors instrumenté au niveau de la selle et du cintre pour obtenir la puissance vibratoire transmise au cycliste par l'intermédiaire de capteurs de force et de vitesse. Des tests préliminaires montrent que les capteurs fonctionnent correctement. Il est conclu que la puissance vibratoire semble être un mesurande adéquat pour évaluer le confort du cycliste. Des travaux futurs permettront d'évaluer l'influence de certains paramètres tels que la pression des pneus, la position du cycliste, le matériau du cadre, la géométrie, l'état de surface de la route, ... sur la puissance vibratoire mesurée à l'aide de ces capteurs.



Figure 2-5 : Cintre instrumenté avec des jauges (Gauche) et insert de selle instrumenté avec des jauges (Droite) pour détermination de la force au niveau du cintre et de la selle (Vanwalleghem *et al.*, 2012a, 2012b)

Une étude récente propose d'évaluer les vibrations transmises à travers le bras du cycliste (Chimentin *et al.*, 2013). Il est proposé d'étudier les vibrations transmises au cycliste lors d'une excitation par l'intermédiaire d'une route pavée (figure 2-6). Pour cela, quatre accéléromètres sont positionnés en différents endroits sur le bras du cycliste et sur le vélo. Un accéléromètre est positionné au niveau de la potence et les trois autres sont positionnés au niveau du poignet, du coude et de la clavicule du cycliste (figure 2-7). Lorsque le cycliste

roule sur ce type de route, il est présenté que des vibrations sont mesurées selon les trois axes avec un niveau prépondérant pour l'axe vertical.



Figure 2-6 : Tests sur route pavée à Reims (France) (Chiementin *et al.*, 2013)



Figure 2-7 : Accéléromètre sur la potence (Gauche) et sur le poignet (Droite) (Chiementin *et al.*, 2013)

Dans un second temps, il est proposé de calculer la limite du temps d'exposition à ce type d'excitation. Pour cela, l'accélération mesurée est pondérée à l'aide de la courbe de pondération de la norme ISO-5349 servant à évaluer les risques de développer des troubles du système main-bras lors d'une exposition aux vibrations. Le temps d'exposition maximum toléré est alors calculé à l'aide de la formule présentée dans cette norme. À l'issue de cette étude, il est conclu que les vibrations peuvent être préjudiciables pour le système main-bras. En effet, d'après le calcul du temps maximum d'exposition, la dose de vibration générée par cette route pavée ne peut pas être supportée plus de 7 minutes pour une vitesse de 35 km/h.

Finalement, il est conclu que la norme surestime la dose de vibrations transmises au cycliste. Une nouvelle courbe de pondération basée sur la transmissibilité entre l'accélération à la clavicule et l'accélération à la potence est alors proposée.

2.2 Le système main-bras

De nos jours, beaucoup de gens sont exposés aux vibrations par contact avec une structure vibrante dû à leur travail ou à des activités de loisirs. Cette exposition aux vibrations peut être perçue comme une source d'inconfort, et peut mener parfois à une combinaison complexe de troubles vasculaires, neurologiques et musculo-squelettiques. Parmi ces vibrations, les vibrations du système main-bras ont toujours été une préoccupation majeure, notamment pour les travailleurs utilisant des outils percutant ou vibrant. Ce domaine demeure encore aujourd'hui un domaine de recherche très actif.

2.2.1 Premières études sur le système main-bras

Les premières études sur la réponse dynamique du système main-bras ont été effectuées à l'aide d'excitation vibratoire de type sinusoïdale (Miwa, 1967 ; Reynolds et Soedel, 1972). Il est identifié que la réponse dynamique du système main-bras varie en fonction de certains paramètres tels que la force de préhension, la force de poussée, la position de la main et autres. Rapidement, l'excitation vibratoire devient une excitation aléatoire sur une bande de fréquences plus large (Cundiff, 1976).

Dès les premières études, la volonté de modéliser le système main-bras est très présente (Cundiff et Mishoe, 1975 ; Suggs *et al.*, 1976 ; Mishoe et Suggs, 1977 ; Reynolds et Keith, 1977 ; Wood *et al.*, 1978). Ces modèles permettent d'évaluer la réponse du système main-bras selon plusieurs directions. Deux éléments importants ressortent de ces études : le système main-bras est une structure qui est très amortie (Mishoe et Suggs, 1977) et, plus la fréquence augmente, plus les vibrations sont localisées au niveau de la main et des doigts (Reynolds et Angevine, 1977). Un deuxième élément très présent est le désir d'établir une corrélation entre une sensation subjective de la part des sujets testés et une valeur physique mesurable (Miwa, 1967 ; Reynolds *et al.*, 1977).

Compte tenu des nombreuses variabilités possibles du système main-bras dans plusieurs directions, les modèles développés deviennent de plus en plus complexes pour pouvoir reproduire les réponses biodynamiques mesurées (Reynolds et Falkenberg, 1984). De plus, dans certains cas tels que d'intenses vibrations ou de longs temps d'exposition, la réponse biodynamique du système main-bras n'est pas constante dans le temps et présente un comportement non-linéaire (Panzke et Balasus, 1985). Certains auteurs commencent à se questionner sur la fiabilité des modèles développés. La notion de variabilité de réponse dynamique du système main-bras devient de plus en plus présente. Une étude rapporte d'ailleurs que les valeurs moyennes d'impédance d'un individu pour une condition particulière peuvent varier d'environ 10 % (Hempstock et O'Connor, 1986). Certains paramètres commencent à être étudiés plus spécifiquement (Lundström et Burström, 1989). Dans l'étude de Lundström en 1989, le système main-bras de 8 sujets de sexe masculin fut mesuré en utilisant 3 postures différentes, 3 forces de préhension, 3 niveaux d'excitation et une direction d'excitation. Son étude montre que l'impédance du système main-bras est dépendante de la fréquence et des paramètres mentionnés auparavant. Il conclut que les propriétés mécaniques du système main-bras doivent être soigneusement prises en compte avant de mettre en place des normes.

2.2.2 Les normes

D'intenses vibrations peuvent être transmises aux mains d'opérateurs travaillant avec des outils vibrants. L'utilisation habituelle et continue d'outils vibrants peut être reliée avec de nombreux cas de blessures affectant les vaisseaux sanguins, les nerfs, les os, les muscles et les tissus de la main ou de l'avant-bras.

La norme internationale ISO-5349 spécifie les méthodes pour mesurer, évaluer et reporter les expositions aux vibrations transmises au système main-bras (ISO-5349, 2001). Dans cette norme, les conseils présentés sont issus d'un nombre limité d'études provenant d'expériences pratiques ou d'expérimentations en laboratoire. La prédiction des risques de développement de troubles liés à l'exposition de la main aux vibrations est actuellement basée sur cette norme et sur la courbe de pondération en fréquence associée (figure 2-8).

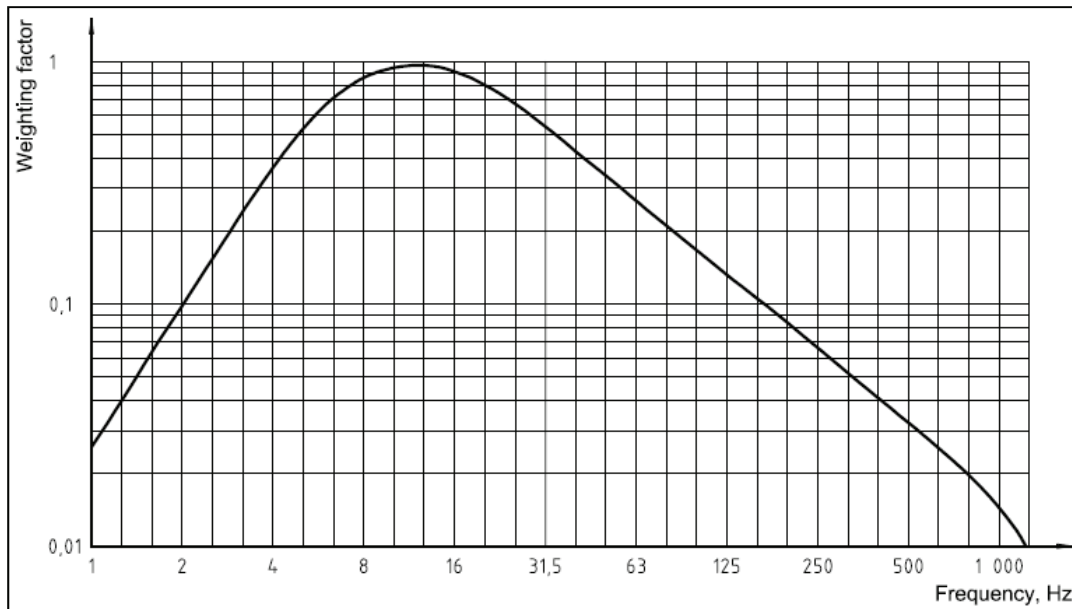


Figure 2-8 : Courbe de pondération pour les vibrations du système main-bras (ISO-5349, 2001)

Cette courbe de pondération sert à l'évaluation des risques de développer des troubles liés à l'exposition aux vibrations. Elle permet de pondérer l'accélération mesurée au niveau de la main. Un calcul présenté dans la norme permet d'évaluer le taux d'exposition et de juger s'il y a risque de développer des troubles suite à ces expositions. Bien que cette courbe de pondération soit actuellement utilisée pour évaluer les risques liés à une exposition aux vibrations, elle fut originellement développée sur la base de sensation subjective de confort pour chaque fréquence (Miwa, 1967).

Cette norme présente également les coordonnées associées au système main-bras (figure 2-9).

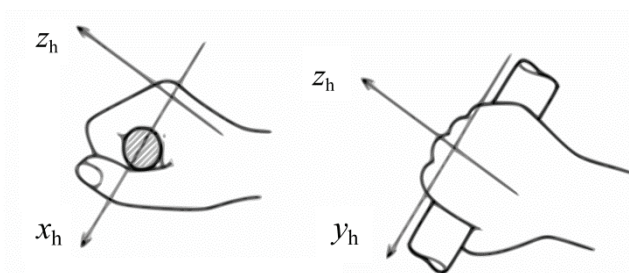


Figure 2-9 : Les coordonnées du système main-bras adaptées de la norme ISO-5349 (ISO-5349, 2001)

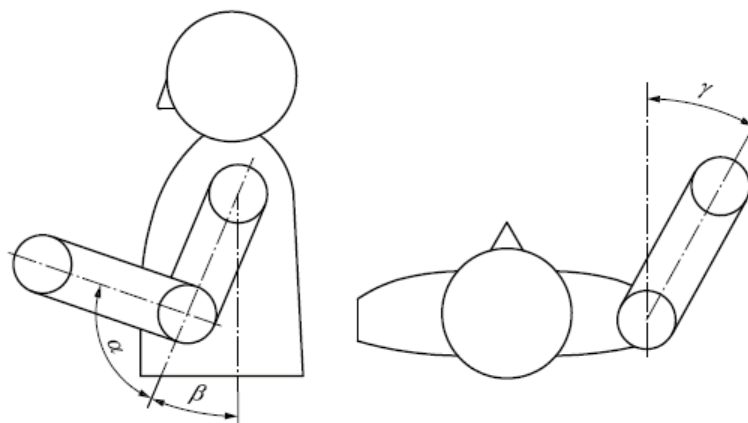
La norme ISO-100068 (ISO-10068, 2012) présente la réponse du système main-bras sous forme d'impédance mécanique mesurée au point d'entrée (DPMI : Driving-Point Mechanical Impedance). L'impédance mécanique est le ratio complexe de la force dynamique F agissant au contact avec la main et la vitesse d'excitation vibratoire V à la main. Elle est donnée par l'équation suivante.

$$Z(\omega) = F(\omega) / V(\omega) \quad (2.1)$$

Où ω est la fréquence angulaire.

Cette norme propose des modèles mécaniques équivalents pour le système main-bras dans les trois directions orthogonales. Elle propose également des courbes d'impédance pour chacune des directions correspondant à la gamme de valeurs mesurées pour des sujets de sexe masculin dans des configurations spécifiques :

- la position du bras par rapport au torse correspond à la gamme définie dans la figure 2-10
- le poignet est en position neutre, il n'y a ni flexion, ni extension (Tolérance $\pm 15^\circ$)
- la main saisie une poignée qui possède un diamètre entre 19 mm et 45 mm
- la force de préhension est comprise entre 25 N et 50 N. La force de poussée appliquée par la main n'est pas plus élevée que 50 N



$$15^\circ < \alpha < 120^\circ; \quad -15^\circ < \beta < 75^\circ; \quad -15^\circ < \gamma < 15^\circ; \quad \alpha + \beta < 120^\circ$$

Figure 2-10 : Plages admissibles pour la position du bras (ISO-10068, 2012)

La figure suivante présente un exemple de courbes d'impédance tiré de la norme ISO-10068.

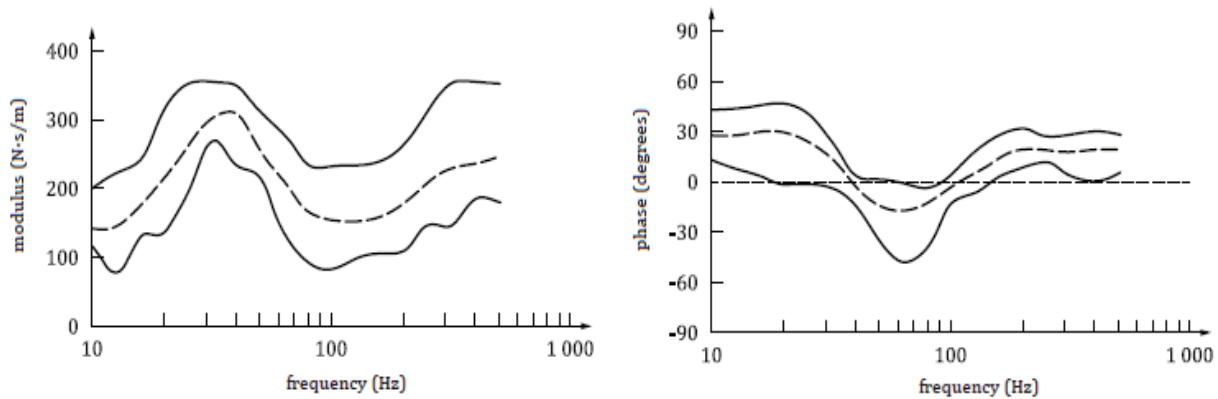


Figure 2-11 : Valeurs de l'impédance mécanique du système main-bras au point d'entrée (ISO-10068, 2012) pour la direction z_h et zone de tolérance associée (Gauche : Module ; Droite : Phase)

Les modèles de la norme ISO-10068 ainsi que les courbes d'impédance proposées sont applicables uniquement dans les contextes spécifiques décrits par la norme. Sachant que de nombreux facteurs influencent la réponse du système main-bras, la réponse biodynamique du système main-bras fut abondamment étudiée sous forme d'impédance mécanique. Néanmoins dès les premières études sur le système main-bras, d'autres formulations ont été présentées dans la littérature (Cundiff, 1976 ; Miwa, 1988). C'est le cas par exemple de la formulation en puissance :

$$P(\omega) = \text{Re}[Z(\omega)]|V(\omega)|^2 \quad (2.2)$$

Où V est une valeur rms.

2.2.3 Facteurs influents

Quelle que soit la formulation utilisée, de nombreux auteurs ont étudié l'influence de certains paramètres sur la réponse du système main-bras. Une des premières études concernant l'influence de paramètres fut celle de Burström (1990). Il étudia la réponse de dix sujets à une sollicitation sinusoïdale sur la bande fréquentielle allant de 2 à 1000 Hz. L'influence de la direction d'excitation, du niveau de vibration, de la force de préhension, de la posture et du sexe du sujet furent étudiées. Les résultats de son étude montrent que l'impédance du système main-bras dépend principalement de la fréquence et de la direction d'excitation (Burström, 1990). La figure suivante illustre ce propos.

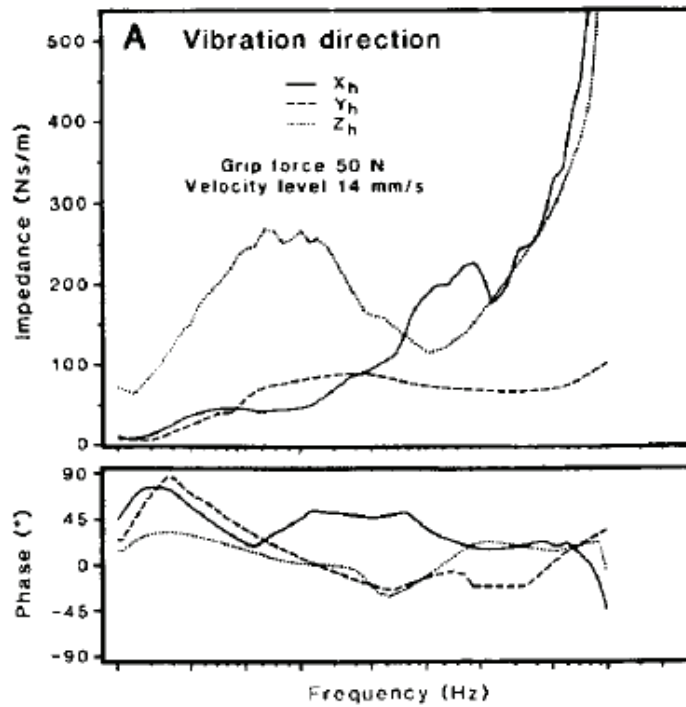


Figure 2-12 : Impédance mécanique du système main-bras en fonction de la fréquence et de la direction d'excitation (Burström, 1990)

Par ailleurs, il décrit que la constitution du système main-bras (doigts – paume – poignet – bras) affecte la réponse du système main-bras pour des fréquences distinctes (figure 2-13).

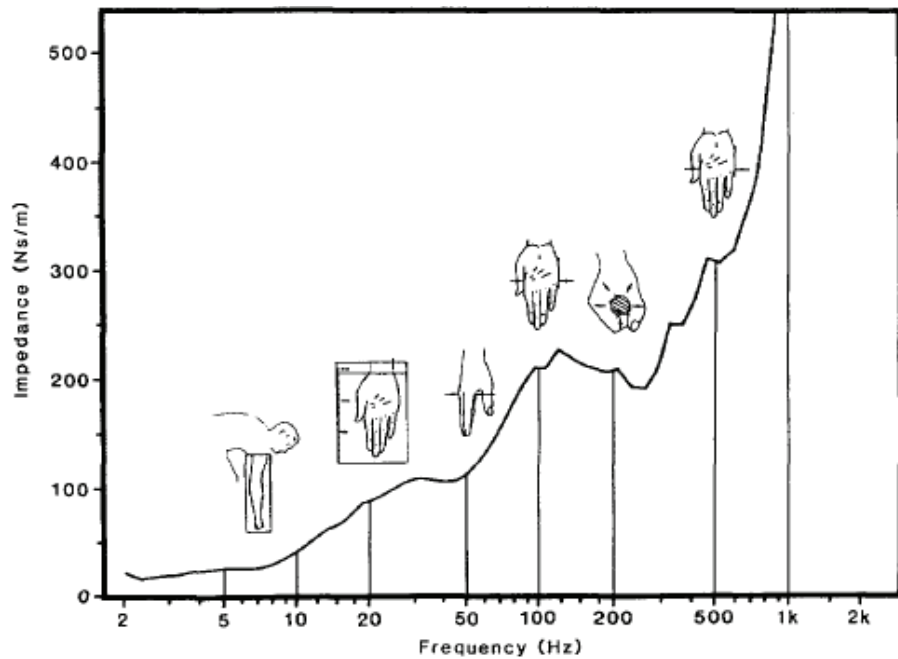


Figure 2-13 : Corrélation entre les différents facteurs biologiques du système main-bras (doigts – paume – poignet – bras) et l'impédance mécanique en fonction de la fréquence (Burström, 1990)

De nombreuses études suivirent pour étudier l'influence de certains paramètres (Burström et Lundström, 1994 ; Gurram *et al.*, 1995 ; Tsuji *et al.*, 1995 ; Marsili et Rossi, 1996 ; Burström, 1997 ; Burström et Sorensson, 1999 ; Wasserman *et al.*, 2001 ; Aldien *et al.*, 2005, 2006 ; Besa *et al.*, 2007 ; Kaulbars et Lemerle, 2007 ; Adewusi *et al.*, 2010). Il ressort de ces études que la réponse du système main-bras dépend de nombreux paramètres tels que la posture, la direction d'excitation, le type et le niveau d'excitation, les forces de contact, et autres. Concernant les forces de contact, les conclusions obtenues pour l'ensemble des auteurs décrivent une impédance qui augmente lorsque les forces de contact augmentent (force de préhension et force de poussée). Il en est de même pour le niveau d'excitation. Plus le niveau d'excitation augmente, plus l'impédance du système main-bras augmente. Malgré des conclusions communes pour certains paramètres, des disparités existent entre les auteurs.

2.2.4 Disparité des résultats

En même temps que les auteurs étudient l'influence des paramètres, les modèles du système main-bras se complexifient pour rendre compte de cette influence. Certains modèles deviennent non-linéaires, d'autres se rendent jusqu'à 4 degrés de liberté pour pouvoir modéliser les différentes postures et les différents axes d'excitation (Rakheja *et al.*, 1993 ; Tsuji et Kaneko, 1996 ; Dong *et al.*, 2008).

Certains se lancent dans la comparaison des données d'impédance et des modèles associés disponibles dans la littérature. Des articles de revue sur la réponse biodynamique du système main-bras sont d'ailleurs disponibles (Dong *et al.*, 2001, 2005). On observe des différences inexplicables dans les résultats de plusieurs études, menées indépendamment, dont les conditions de mesures sont théoriquement équivalentes (Gurram *et al.*, 1995 ; Rakheja *et al.*, 2002). Parmi les causes de disparité entre les données d'impédance obtenues sont mentionnées l'instrumentation, la calibration des capteurs, la compilation des résultats et même la poignée de mesure instrumentée (Pitts, 2003 ; Dong *et al.*, 2006 ; Adewusi *et al.*, 2008). Certains auteurs mentionnent même que « tout comme la masse et la taille, la réponse biodynamique du système main-bras est spécifique à l'individu » (Dong *et al.*, 2009).

La figure 2-14 illustre les disparités observées entre certains auteurs pour une posture spécifique du système main-bras.

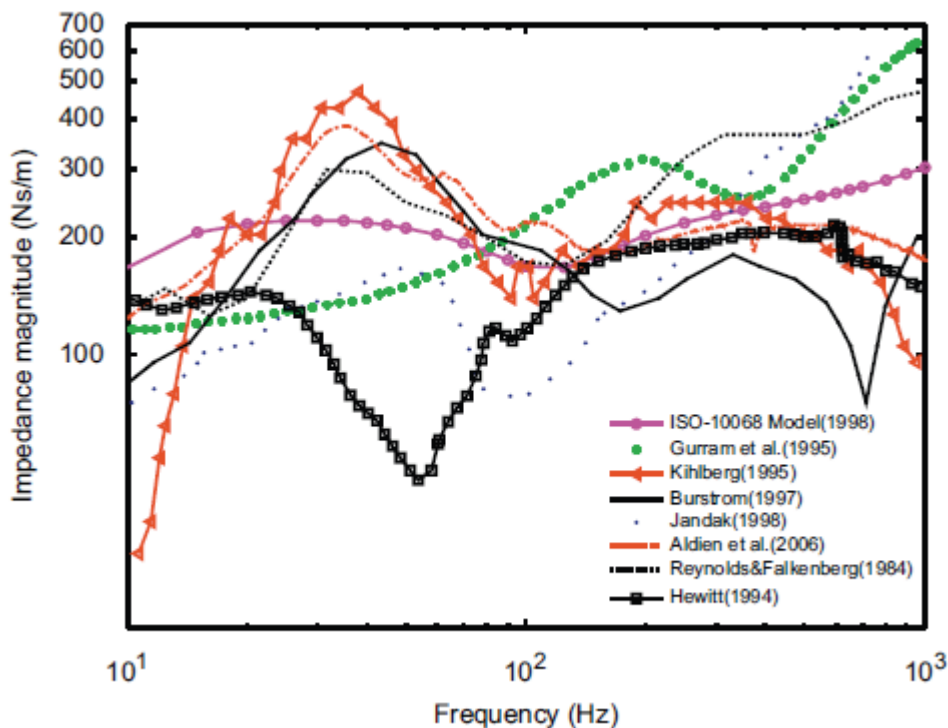


Figure 2-14 : Comparaison de l'amplitude de l'impédance du système main-bras provenant de plusieurs études pour une posture dont le coude est à 90° (Adewusi *et al.*, 2008)

L'influence de la poignée instrumentée sur les mesures d'impédance est investiguée. Parmi les paramètres les plus souvent étudiés sont présents la taille de la poignée et les forces de contact (Aldien *et al.*, 2005, 2006 ; Marcotte *et al.*, 2005 ; Concettoni *et al.*, 2007). On en conclut que le comportement dynamique de la poignée peut avoir une influence sur la mesure de la réponse du système main-bras, spécialement pour les fréquences supérieures à 500 Hz (Marcotte *et al.*, 2007 ; Dong *et al.*, 2008).

2.2.5 Depuis les années 2000...

Compte tenu des disparités entre les résultats obtenus pour la réponse biodynamique du système main-bras, la fiabilité de la norme ISO-5349 pour la prédiction des risques de développer des troubles liés à l'exposition aux vibrations est remise en cause (Burström *et al.*, 1998). Comment expliquer qu'une seule courbe de pondération soit utilisée alors que le système main-bras présente une réponse différente pour les trois axes orthogonaux ? Cette interrogation fait débat dans la communauté scientifique depuis lors.

Dès le début des années 2000, la réponse biodynamique des doigts et de la paume fait suite aux études sur la réponse du système main-bras. Les résultats des premières études alimentent le débat concernant la courbe de pondération de la norme ISO-5349. Une des premières études suggère que la pondération en fréquence de la norme ISO-5349 pourrait sous-estimer les effets des vibrations hautes fréquences concernant les troubles induits aux doigts (Dong *et al.*, 2004). Par la suite, de nouvelles études confirment que la pondération de la norme ISO-5349 est inadéquate pour les vibrations transmises aux doigts et à la paume (Dong *et al.*, 2005, 2006). Une pondération adaptée aux études sur les doigts et la paume est proposée ainsi qu'un modèle biodynamique correspondant (Dong *et al.*, 2007). D'autres études concernant la réponse biodynamique des doigts et de la paume suivirent (Concettoni et Griffin, 2009 ; Dong *et al.*, 2010 ; Wu *et al.*, 2010 ; Xu *et al.*, 2011) et leurs modélisations associées selon les trois directions orthogonales (Dong *et al.*, 2012, 2013).

Suite à ces études, il est prétendu que les risques de développer des blessures lors d'exposition aux vibrations seraient associés à la puissance absorbée par le système main-bras. La courbe de pondération en fréquence de la norme ISO-5349 est alors comparée avec les résultats de puissance absorbée par le système main-bras (Dong *et al.*, 2008a, 2008b). Ces études ont permis de montrer une corrélation entre la courbe de pondération de la norme ISO-5349 et la puissance absorbée par le système main-bras au complet. En revanche, la courbe de pondération de la norme ISO-5349 pourrait surestimer les effets des basses fréquences (transmises à l'épaule) et sous-estimer les effets des hautes fréquences (transmises aux doigts).

Un auteur estime que cette hypothèse est trop simplificatrice et oublie l'importance des facteurs physiologiques et biologiques tels que les tissus, les vaisseaux sanguins, le système nerveux, etc... pour évaluer le risque de développer des troubles liés à une exposition aux vibrations (Marcotte, 2008). Pour cette raison, il juge que la puissance absorbée ne doit pas remplacer l'actuelle pondération en fréquence. Finalement, l'hypothèse est élargie et formulée comme suit : « Une partie de l'information nécessaire à l'évaluation des risques de développer des troubles liés à une exposition aux vibrations serait contenu dans la puissance absorbée par le système main-bras ». Cette théorie est présentée dans une étude récente dans laquelle il est formulé que « la dépendance fréquentielle de la réponse biodynamique du système main-bras pourrait jouer un rôle important dans la détermination d'une courbe de pondération représentative des effets liés à une sollicitation vibratoire » (Dong *et al.*, 2012). Une dernière étude révèle la nécessité d'avoir plusieurs courbes de pondérations en fréquence afin de pouvoir évaluer les risques de développer des troubles au niveau des différents segments du système main-bras (Adewusi *et al.*, 2012, 2013). Le débat concernant la courbe de pondération en fréquence de la norme ISO-5349 reste ouvert.

2.3 Les méthodes de sous-structuration

2.3.1 Revue historique

Afin de comprendre le développement et l'évolution des différentes méthodes de sous-structuration existantes, il est important de les situer dans leur contexte. Pour cela, une brève revue historique est présentée. Cette revue permet de placer temporellement les contributions importantes concernant la sous-structuration.

Historiquement, les prémices du concept de sous-structuration peuvent être trouvées dans le champ de la « Décomposition de Domaine » (« DD : Domain Decomposition »). Le paradigme de la DD provient du désir d'analyser des problèmes complexes en considérant séparément le problème de ses composants et le problème de l'identification de l'interface de solution. La sous-structuration peut être vue comme un cas spécial de la DD.

En 1890, Schwarz imagine une procédure itérative basée sur la DD pour prouver l'existence et l'unicité de la solution à un problème de Laplace dans un domaine constitué d'un cercle et d'un rectangle. La démonstration était basée sur le fait que l'unicité de la solution sur le cercle et l'unicité de la solution sur le rectangle étant connue, la procédure itérative entre les sous-domaines convergerait vers une solution unique. La publication de Schwarz a ouvert une nouvelle voie pour trouver itérativement des solutions à des problèmes analytiques sur des domaines complexes (Schwarz, 1890).

Malheureusement, la plupart des modèles analytiques de sous-domaines continus couplés ne possèdent pas de solution fermée. Pour contourner le problème, des techniques de discrétisation et d'approximation furent développées telles que l'approche de Rayleigh – Ritz (Ritz, 1909), la technique des éléments de frontière et la méthode des éléments finis.

La méthode des éléments finis émergeât comme une technique à la fois souple et très efficace, notamment avec l'invention du microprocesseur puisqu'une grande variété de problèmes

physiques pouvait désormais être résolue en détails et de façon précise. Désireux de pouvoir analyser des problèmes plus grands et plus complexes, les scientifiques et ingénieurs ont recherché des méthodes pour optimiser l'efficacité de leurs calculs. Les techniques modernes de calculs parallèles utilisées pour résoudre des problèmes d'ingénierie mécanique sont souvent basées sur le concept de la DD.

Pour la modélisation dynamique, une façon d'améliorer l'efficacité de l'analyse consiste à réduire la complexité de chacun des sous-domaines (sous-structures). Après avoir trouvé les solutions locales représentées dans un sous-espace de degrés de liberté, les sous-structures sont couplées.

Les premières idées de sous-structuration dynamique furent développées en tant que techniques de réduction (Hurty, 1960). Ces méthodes étaient bientôt connues sous le nom « Component Modes Synthesis » (CMS), où le terme « Modes » inclut toutes sortes de modes structurels (modes propres exacts, modes approximatifs, modes statistiques, modes d'interface, ...). Les communautés scientifiques et ingénieurs découvrirent les bénéfices de la sous-structuration dynamique et la méthode CMS devint un important sujet de recherche dans le domaine de la dynamique des structures. Des développements majeurs suivirent et des méthodes désormais classiques furent développées (Craig et Bampton, 1968 ; MacNeal, 1971 ; Rubin, 1975).

Les techniques de couplage de sous-structures devinrent attractives pour la communauté expérimentale seulement au cours des années 1980, malgré une première tentative réalisée quelques années plus tôt à l'aide d'informations modales obtenues expérimentalement (Klosterman, 1971). Par la suite, les techniques de couplage furent directement appliquées aux FRFs mesurées. Au début, ces méthodes ciblaient les problèmes de modification dynamique de structure (SDM : « Structural Dynamic Modification ») dont le but est de modifier le comportement dynamique d'une structure de base en couplant une « modification » de type masses localisées, ressorts, amortisseurs, ou autres. Bien que les techniques SDM ne soient généralement pas considérées comme des techniques de sous-structuration, les deux concepts sont en fait identiques.

Une des premières étapes vers les techniques de couplage dans le domaine fréquentiel fut proposée par l'intermédiaire d'une méthode de modification de structure appelée SMURF « Structural Modification Using Experimental Frequency Response Functions » (Crowley *et al.*, 1984). Cette méthode ne devint cependant pas très populaire. Quelques années plus tard, la méthode classique de sous-structuration par FRF (FBS : Frequency-Based Substructuring) fut formulée (Jetmundsen, 1986 ; Jetmundsen *et al.*, 1988). Cette méthode était plus efficace et plus précise que la méthode de couplage par impédance disponible au même moment (Imregun *et al.*, 1987). Plusieurs années après sa formulation, la méthode de Jetmundsen est réinventée et réécrite de manière plus simple pour être utilisée comme une méthode de sous-structuration dynamique sous le nom de « Lagrange multiplicateur FBS » (De Klerk *et al.*, 2006).

Entre temps, plusieurs études ont utilisé les méthodes de couplage par FRFs de manière expérimentale, numérique ou hybride (Otte *et al.*, 1991 ; Ren et Beards, 1995 ; Van Langenhove et Maasdam, 2000 ; Urgueira *et al.*, 2001). D'autres études ont ciblé la comparaison des différentes méthodes et plus particulièrement des méthodes modales et des méthodes utilisant les FRFs (Urgueira, 1989 ; Cuppens *et al.*, 2000 ; Liu, 2000 ; Allen et Mayes, 2007). De plus amples informations sur les méthodes de sous-structuration sont disponibles dans plusieurs articles de revue (Craig, 1976 et 1995 ; Ewins, 2000 ; Avitabile, 2003 ; De Klerk *et al.*, 2008).

Quelle que soit la méthode utilisée, une importante limitation concerne la partie expérimentale. Plus précisément, les degrés de liberté de rotation sont difficiles à mesurer en pratique. Plusieurs études ont porté une attention particulière aux degrés de liberté de rotation (Smiley et Brinkman, 1984 ; Avitabile *et al.*, 1987 et 1997 ; Cafeo *et al.*, 1993 ; Gialamas *et al.*, 1996 ; Yoshimura et Hosoya, 2000 ; De Klerk *et al.*, 2008).

Une étude récente propose de contourner ce problème de degrés de liberté de rotation en proposant une méthode appelée « Transmission Simulator Method » (Mayes *et al.*, 2011 ; Mayes, 2012). Le principe de base consiste à mesurer un nombre suffisamment important de degrés de liberté de translation à l'interface entre les deux sous-structures pour que les degrés de liberté de rotation ne soient plus nécessaires pour la réalisation du couplage. La méthode

consiste à développer une structure additionnelle (le « Transmission Simulator ») qui vient se fixer au niveau de l'interface entre les sous-structures et qui permet de mesurer un nombre important de degrés de liberté de translation en plusieurs points. Lors de la caractérisation des deux sous-structures séparément, le « Transmission Simulator » est présent sur chacune d'elles. Le couplage est finalement réalisé permettant de prédire le comportement dynamique de l'assemblage comprenant les deux sous-structures et le « Transmission Simulator ». Un modèle éléments finis de ce « Transmission Simulator » est nécessaire pour pouvoir soustraire son comportement dynamique et déduire le comportement dynamique de l'assemblage constitué des deux sous-structures seulement. Cette méthode nécessite donc de réaliser un nombre important de mesures et de combiner résultats expérimentaux avec résultats par éléments finis du « Transmission Simulator » pour pouvoir contourner le problème des degrés de liberté de rotation (Mayes et Ross, 2012).

2.3.2 Concept de la sous-structuration

La possibilité de prédire les propriétés dynamiques d'un assemblage en fonction des propriétés dynamiques de ces composants (sous-structures) ou de prédire les effets d'une modification sur le comportement dynamique d'une structure de base est le principe du couplage par sous-structuration. Dans tous les cas, des degrés de liberté de couplage sont nécessaires sur chacune des sous-structures afin de pouvoir réaliser l'assemblage. La figure suivante illustre le couplage entre deux sous-structures en fonction des degrés de liberté de couplage. Sur cette figure, deux structures sont assemblées par l'intermédiaire de n degrés de liberté de couplage. La première sous-structure possède N_A degrés de liberté et la seconde en possède N_B . Le système couplé résultant possèdera alors N_C degrés de liberté où $N_C = N_A + N_B - n$.

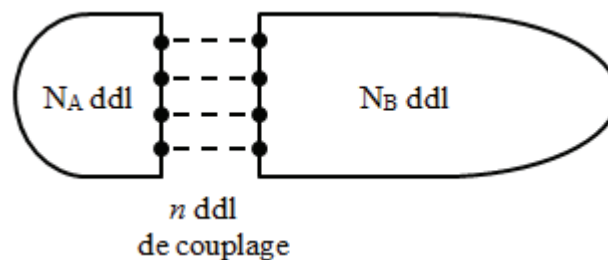


Figure 2-15 : Schéma d'un assemblage de deux sous-structures en fonction des degrés de liberté de couplage

Quelle que soit la méthode de sous-structuration utilisée, le concept de sous-structuration est basé sur deux hypothèses. En effet, deux conditions doivent toujours être satisfaites à l'interface entre les sous-structures qui vont être couplées :

- **Condition de compatibilité** : Les déplacements (vitesses ou accélérations) des degrés de liberté des sous-structures doivent être égaux à l'interface.
- **Condition d'équilibre** : Il doit y avoir équilibre des forces au niveau des degrés de liberté d'interface des sous-structures.

Par ailleurs, il y a hypothèses d'invariance et de linéarité concernant chacun des structures impliquées dans l'assemblage.

2.3.3 Expansion des différentes méthodes

D'après l'historique présenté précédemment, les méthodes de sous-structuration peuvent être classées en 3 domaines distincts : le domaine physique, le domaine temporel ou modal, et le domaine fréquentiel. Malgré leurs distinctions, d'un point de vue théorique, la même information est contenue dans ces 3 différentes représentations. Il est possible de faire des liens entre chacun de ces domaines :

- Passage du domaine physique au domaine modal par l'analyse des valeurs propres.
- Passage du domaine modal au domaine fréquentiel par synthèse de FRFs.
- Passage du domaine physique au domaine fréquentiel par la transformée de Fourier.
- Passage du domaine fréquentiel au domaine modal par l'identification des paramètres modaux.

Dans le domaine physique, la structure est caractérisée par sa masse, sa raideur et son amortissement. Ces informations sont données par les matrices de masse, de raideur et d'amortissement correspondantes pour un modèle linéaire discrétisé. Le processus de couplage dans le domaine physique est équivalent à l'assemblage des matrices des éléments individuels.

Dans le domaine modal ou temporel, le comportement dynamique de la structure est interprété comme une combinaison des réponses modales (le système matriciel est projeté sur une base modale). La dynamique des sous-structures est alors approximée dans une base réduite.

Dans le domaine fréquentiel, la structure est vue à travers ses fonctions de réponse en fréquence.

La figure suivante illustre les liens entre chacun de ces domaines et les méthodes associées.

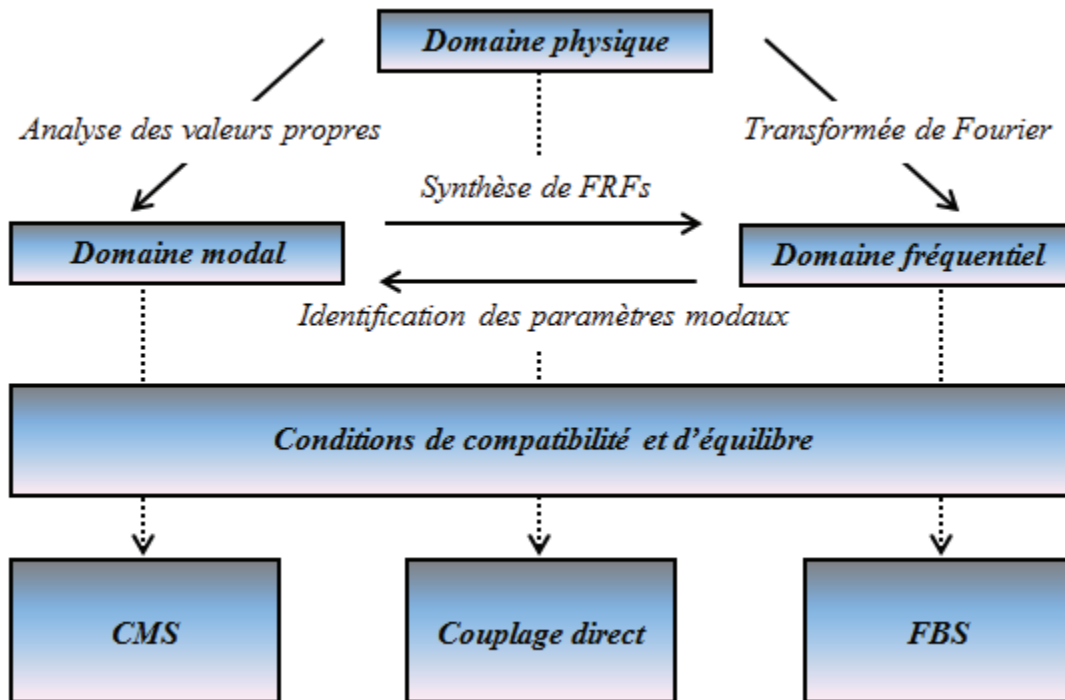


Figure 2-16 : Représentation de la sous-structuration en fonction des 3 domaines, des conditions de compatibilité et d'équilibre et des méthodes associées

2.3.4 Distinction entre méthodes modales et méthodes utilisant les FRFs

Dans le domaine modal, la méthode CMS permet d'assembler une structure en fonction du comportement modal de chacun de ces composants. Cette méthode est la plus concise en présentation puisqu'elle demande moins de calculs que les méthodes utilisant les FRFs. Cependant, pour chaque structure constituant l'assemblage, il convient de définir un modèle modal et compléter les analyses modales avant que le processus de couplage puisse commencer. L'approche modale est très sensible aux nombres de modes qui sont inclus dans

le modèle. En théorie, tous les modes de chaque sous-structure sont requis pour que l'analyse soit correcte. Ce problème est connu sous le nom d'erreurs de troncature. L'obtention de résultats précis nécessite donc une analyse modale complète pour chaque sous-structure. Les modes de corps rigide sont notamment des données importantes qui doivent être prises en considération dans la méthode CMS.

Dans le domaine fréquentiel, l'approche utilisée est de caractériser le comportement dynamique d'un assemblage en fonction du comportement dynamique de chacune des sous-structures prise séparément. Il est alors nécessaire de définir la matrice de FRFs mettant en relation chacun des degrés de liberté d'interface des sous-structures. Le couplage par formulation en impédance (ICM : Impedance Coupling Method) est le plus direct algébriquement. Cependant, les matrices d'impédance étant difficiles à obtenir en pratique (nécessité de bloquer des degrés de liberté pour mesurer les forces transmises), les données sont obtenues par l'inversion des matrices de mobilité. Dans le cas du couplage entre deux structures, il y a nécessité de procéder à trois inversions de matrices. Ainsi, cette méthode est sujette à de sévères erreurs d'amplification. Des erreurs d'arrondi dus à un mauvais conditionnement de matrices sont également présentes. Ce constat a mené au développement d'une autre méthode de couplage par FRFs visant à limiter l'inversion des matrices. La méthode FBS (formulation en mobilité) est une formulation plus efficace d'un point de vue numérique. Etant donné le nombre moins important d'inversions de matrices (une seule inversion dans le cas du couplage entre deux structures), l'efficacité des calculs est améliorée et on observe une meilleure robustesse contre le mauvais conditionnement. Un inconvénient majeur de cette méthode est cependant la nécessité de fournir une matrice complète de FRFs à chacune des fréquences d'intérêt pour l'étude de la structure assemblée. Ceci signifie qu'il faut donc procéder à un nombre important d'acquisition de données. Avec des FRFs mesurées, la méthode FBS mènera probablement à de meilleurs résultats que les autres méthodes dans les cas où la structure possède un fort amortissement, des impédances dépendantes de la fréquence ou une densité modale importante.

2.3.5 La sous-structuration dans le domaine fréquentiel

Dans cette section, les équations sont écrites pour les sous-systèmes A et B découplés. L'assemblage de ces deux sous-systèmes au niveau de leur interface par sous-structuration permet l'obtention d'un système couplé nommé C . Deux formulations sont ici présentées : le couplage par impédance et par mobilité. Ces considérations seront reprises dans le chapitre 3.

La première méthode de couplage par FRFs a été la méthode de couplage par impédance. Pour deux structures A et B devant être assemblées, on peut écrire l'équation suivante pour la sous-structure A :

$$\{\mathbf{V}_A\} = [\mathbf{Y}_A]\{\mathbf{F}_A\} \quad (2.3)$$

Où \mathbf{V}_A , \mathbf{F}_A , \mathbf{Y}_A sont respectivement la vitesse, la force et la mobilité de la sous-structure A .

Et de la même manière pour la sous-structure B :

$$\{\mathbf{V}_B\} = [\mathbf{Y}_B]\{\mathbf{F}_B\} \quad (2.4)$$

Les conditions d'équilibre des forces et de compatibilité des vitesses (déplacements ou accélérations) appliquées au point de contact pour assembler ces deux sous-structures et former la structure C donnent :

$$\{\mathbf{V}_C\} = \{\mathbf{V}_A\} = \{\mathbf{V}_B\} \quad (2.5)$$

$$\{\mathbf{F}_C\} = \{\mathbf{F}_A\} + \{\mathbf{F}_B\} \quad (2.6)$$

En insérant les relations (2.3) et (2.4) dans l'équation (2.6), et en simplifiant par la relation (2.5), ceci permet d'écrire :

$$[\mathbf{Y}_C]^{-1} = [\mathbf{Y}_A]^{-1} + [\mathbf{Y}_B]^{-1} \quad (2.7)$$

Où $[\mathbf{Y}_C]$ est la matrice de mobilité du système couplé C composé des deux systèmes A et B .

Ce qui donne en impédance :

$$[\mathbf{Y}_C]^{-1} = [\mathbf{Z}_C] = [\mathbf{Z}_A] + [\mathbf{Z}_B] \quad (2.8)$$

Les matrices d'impédance étant difficiles à obtenir en pratique, les données sont obtenues par l'inversion des matrices de mobilité de l'équation (2.7). Il y a donc nécessité d'inverser 3 matrices pour utiliser une formulation de sous-structuration par impédance. Les problèmes liés à l'inversion des matrices ont mené au développement d'une autre méthode de couplage par FRFs visant à limiter l'inversion de matrices.

L'autre méthode de couplage par FRFs est la méthode de couplage par mobilité. L'équation (2.7) de couplage entre deux sous-structures A et B peut être déclinée différemment afin de limiter le nombre d'inversion :

$$[\mathbf{Y}_C]^{-1} = [\mathbf{Y}_A]^{-1} \left([\mathbf{I}] + [\mathbf{Y}_A][\mathbf{Y}_B]^{-1} \right) \quad (2.9)$$

$$[\mathbf{Y}_C]^{-1} = [\mathbf{Y}_A]^{-1} \left([\mathbf{Y}_B] + [\mathbf{Y}_A] \right) [\mathbf{Y}_B]^{-1} \quad (2.10)$$

En inversant la relation (2.10), on obtient :

$$[\mathbf{Y}_C] = [\mathbf{Y}_B] \left([\mathbf{Y}_B] + [\mathbf{Y}_A] \right)^{-1} [\mathbf{Y}_A] \quad (2.11)$$

Cette expression en mobilité est plus efficace numériquement que la formulation en impédance, il y a seulement une inversion nécessaire. Dans un contexte où la structure A est la structure de base et la structure B est considérée comme une modification, la relation (2.11) peut être reformulée pour que la structure A soit la structure la plus présente dans l'expression :

$$[\mathbf{Y}_C] = [\mathbf{Y}_A] - [\mathbf{Y}_A] \left([\mathbf{Y}_B] + [\mathbf{Y}_A] \right)^{-1} [\mathbf{Y}_A] \quad (2.12)$$

2.3.6 Avantages et limitations

Historiquement, la sous-structuration est apparue afin de résoudre des problèmes complexes et de grandes dimensions. De part ces hypothèses et sa mise en œuvre, la sous-structuration est sujette à un certain nombre de limitations :

- Limitée aux systèmes linéaires et stationnaires avec paramètres constants
- Le code de sous-structuration peut prendre un temps conséquent à programmer
- D'un point de vue expérimental, la plupart des mesures sont limitées aux degrés de liberté de translation puisque les degrés de liberté de rotation sont difficiles à mesurer
- D'un point de vue expérimental, des mesures contenant du bruit sont utilisées. Les différents calculs (inversion de matrices, ...) propageront le bruit mesuré, résultant en une solution imprécise, voir erronée, pour le système complet

Néanmoins, ayant connaissance de ces limitations, l'utilisation de la sous-structuration est justifiée par un nombre important d'avantages :

- Elle permet l'évaluation du comportement dynamique de structures qui sont trop complexes ou trop volumineuses pour être analysées comme un tout
- Par l'analyse des sous-systèmes, un comportement dynamique local peut être reconnu plus facilement que lorsque le système complet est analysé
- L'effet d'un changement de propriétés d'une sous-structure sur le système assemblé peut être analysé efficacement
- Lorsqu'une structure est changée, la sous-structuration dynamique permet une rapide évaluation de la dynamique résultante pour le système complet (seule la sous-partie modifiée a besoin d'être caractérisée de nouveau)
- Possibilité de combiner les sous-structures qu'elles aient été caractérisées numériquement ou expérimentalement (Analyse hybride)
- Elle permet le partage et la combinaison de sous-structures provenant de différents groupes projets

2.4 Synthèse

Aucune étude n'a réalisé de couplage par sous-structuration entre un humain et une structure. Ceci est un élément d'originalité de ce doctorat qui propose d'utiliser cette approche pour étudier les vibrations transmises au niveau de la main du cycliste. Dans cet objectif et à la lumière de cette revue de l'état de l'art, plusieurs éléments doivent être soulignés.

Pour la partie vibration dans le domaine du cyclisme de route :

- La plage de fréquences pour la dynamique de l'ensemble vélo – cycliste au niveau de l'avant du vélo ne dépasse pas 100 Hz
- Le cycliste ajoute beaucoup d'amortissement à l'assemblage
- La posture du cycliste doit être contrôlée
- La puissance est proposée comme mesurande pour l'évaluation du confort

Pour la partie « système main-bras » :

- Le système main-bras a majoritairement été caractérisé sous forme d'impédance mais il peut aussi bien l'être sous forme de puissance
- Les résultats peuvent varier d'un individu à l'autre
- De nombreux paramètres influencent la réponse biodynamique du système main-bras
- La puissance pourrait être une partie de l'information nécessaire à l'évaluation des risques de développer des troubles liés à une exposition aux vibrations

Pour la partie « méthodes de sous-structuration » :

- Les méthodes de couplage peuvent être utilisées expérimentalement
- Deux méthodes permettent de faire du couplage par FRFs (impédance et mobilité)
- Avec des FRFs mesurées, la méthode FBS mènera probablement à de meilleurs résultats que les autres méthodes dans les cas où la structure possède un fort amortissement, des impédances dépendantes de la fréquence ou une densité modale importante
- Lorsqu'une structure est changée, la sous-structuration dynamique permet une rapide évaluation de la dynamique résultante pour le système complet (seule la sous-partie modifiée a besoin d'être caractérisée de nouveau)

On déduit de l'ensemble de ces informations que les méthodes par sous-structuration qui utilisent le couplage par FRFs peuvent être utilisées avec le système main-bras à condition de contrôler plusieurs paramètres. L'impédance et la puissance semblent être deux mesurandes à considérer pour pouvoir assembler les structures entre elles par sous-structuration et évaluer les vibrations transmises au cycliste.

3 PRÉDICTION DU COMPORTEMENT VIBRATOIRE D'UNE STRUCTURE COUPLÉE AU SYSTÈME MAIN- BRAS

A la connaissance de l'auteur, aucune étude scientifique n'a investigué les interactions humain-structure en combinant la réponse biodynamique du système main-bras et le comportement vibratoire d'une structure mécanique. Il existe donc un manque d'informations dans la communauté scientifique concernant la compréhension des interactions et des effets de couplage ainsi que de l'influence du système main-bras sur une structure mécanique.

Basé sur ce constat, ce chapitre propose d'utiliser une nouvelle approche pour étudier les interactions humain-structure. Cette approche combine la caractérisation biodynamique du système main-bras avec le comportement vibratoire d'une structure mécanique pour déterminer le comportement vibratoire de l'assemblage. Elle est basée sur l'utilisation d'une méthode de sous-structuration. En utilisant les caractérisations biodynamiques, elle permet de décrire le comportement vibratoire d'un assemblage humain-structure par la caractérisation de chaque structure séparément.

Dans ce chapitre, l'approche proposée par cette thèse est mise en œuvre au travers de trois cas d'étude. Après avoir identifié à l'aide d'une revue de l'état de l'art plusieurs méthodes de couplage de structures qui soient utilisables avec la réponse biodynamique du système main-bras, deux méthodes sont utilisées afin de répondre à l'objectif secondaire « Prédire le comportement dynamique d'un assemblage comprenant une main par sous-structuration ».

Un premier cas d'étude propose un couplage par impédance selon un seul axe d'excitation entre une poutre et une posture du système main-bras. Dans le deuxième cas d'étude, la même posture du système main-bras est couplée à cette poutre par impédance selon deux axes. Le troisième cas d'étude propose un couplage uniaxial utilisant une méthode de couplage de type FBS (Frequency-Based Substructuring) avec plusieurs postures du système main-bras.

Le tableau suivant présente les distinctions entre les trois cas d'étude proposés.

Tableau 3-1 : Caractéristiques de chacun des cas d'étude proposés

	Cas d'étude no 1	Cas d'étude no 2	Cas d'étude no 3
Méthode de couplage	Formulation en impédance	Formulation en impédance	Formulation FBS
Nombre d'axes	Couplage uniaxial	Couplage bi-axial	Couplage uniaxial
Structure mécanique	Poutre	Poutre	Cockpit de vélo (potence – cintre)
Caractérisation de la structure mécanique	Expérimentale	Expérimentale	Numérique (Eléments Finis)
Système main-bras	Une posture	Une posture	Trois postures
Caractérisation du système main-bras	Expérimentale	Expérimentale	Expérimentale
Points de couplage	Un point (une main)	Un point (une main)	Deux points (deux mains)

3.1 Cas d'étude no 1 : Couplage uniaxial entre le système main-bras et une poutre

Cette section se concentre sur la réalisation d'un couplage mécanique entre le système main-bras et une poutre droite selon un axe en utilisant une méthode de couplage par impédance. La poutre est choisie en tant que structure mécanique simple afin de pouvoir tout contrôler lors de la réalisation du couplage. Les développements mathématiques, les attentions particulières liées à la caractérisation de la réponse biodynamique du système main-bras, ainsi que la méthode de caractérisation du comportement vibratoire de la poutre seule sont présentés. Finalement, les réponses biodynamiques du système main-bras sont analysées et les prédictions de couplage sont comparées avec des mesures expérimentales effectuées directement sur l'assemblage main – poutre.

3.1.1 Formulation de la méthode de couplage pour une étude uniaxiale

Cette section introduit la terminologie et les notations pour un système couplé comprenant deux structures. Les équations sont développées pour présenter le comportement dynamique du système couplé par caractérisation de chaque structure séparément à l'aide de la méthode de sous-structuration par impédance (Imregun, 1987).

Dans un contexte général, un couplage entre deux structures « a » et « b » formant un assemblage « ab » peut être décrit de la manière illustrative suivante :

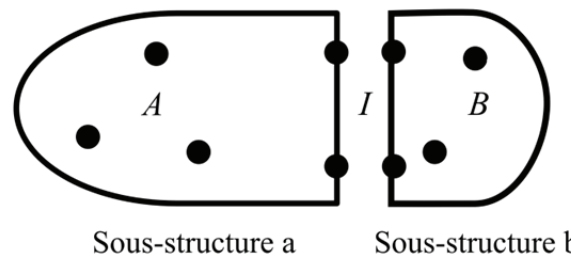


Figure 3-1 : Exemple illustratif d'un couplage entre deux sous-structures « a » et « b »

Dans l'exemple de la figure 3-1, la sous-structure « a » et la sous-structure « b » présentent chacune un certain nombre de points physiques. Les points physiques appartenant strictement à la sous-structure « a » sont symbolisés par la lettre *A*. Les points physiques appartenant strictement à la sous-structure « b » sont symbolisés par la lettre *B*. Les points physiques permettant de coupler la sous-structure « a » à la sous-structure « b » sont nommés points d'interface ou de contact, et sont symbolisés par la lettre *I*.

Il est possible de considérer plusieurs points de contact entre deux structures ainsi que plusieurs points sur chaque structure. Chacun de ces points peut être nominativement exprimé (figure 3-2). Un chiffre associé à une lettre permet alors de définir la localisation particulière d'un point physique. Pour finir, chacun de ces points physiques peut posséder six degrés de liberté.

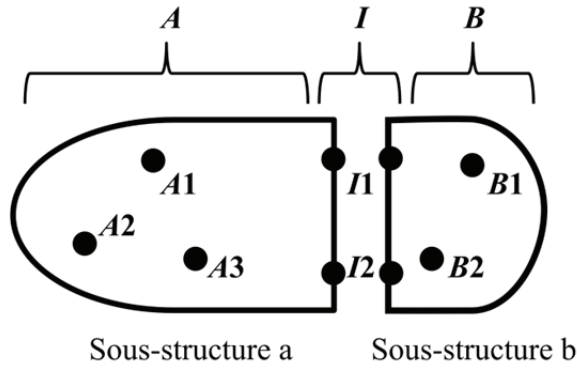


Figure 3-2 : Exemple de couplage où la sous-structure « a » possède cinq points d'intérêt (deux dans l'ensemble d'interface I et trois dans l'ensemble A) et « b » possède quatre points d'intérêt (deux dans l'ensemble I et deux dans l'ensemble B)

Dans les équations suivantes, les sous-structures « a » et « b » sont décrites par des exposants en lettres minuscules et les ensembles A , B et I sont décrits par des lettres majuscules en indice. Finalement, le format vertical gras est utilisé de manière traditionnelle afin de représenter des matrices ou des vecteurs.

Chacune de ces deux structures peut être décrite indépendamment par une formulation en impédance exprimée en fonction de la fréquence. Considérons la sous-structure « a » seule :

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{F}_A^a(\omega) \\ \mathbf{F}_I^a(\omega) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{AA}^a(\omega) & \mathbf{Z}_{AI}^a(\omega) \\ \mathbf{Z}_{IA}^a(\omega) & \mathbf{Z}_{II}^a(\omega) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{V}_A^a(\omega) \\ \mathbf{V}_I^a(\omega) \end{Bmatrix} \quad (3.1)$$

Où $\mathbf{Z}_{AI}^a(\omega)$ est une caractérisation en impédance de la sous-structure « a » et ω la fréquence angulaire. La première lettre A en indice représente la localisation de réponse en termes de force bloquée et la seconde lettre I représente la localisation de la vitesse d'excitation.

De manière générale, lors d'une caractérisation en impédance, l'ensemble des points d'intérêt sont bloqués pour mesurer la force résultante. Seul le point où a lieu l'excitation est libéré. Ainsi, pour la caractérisation en impédance d'une structure comprenant plusieurs points, les points d'excitation doivent être libérés alternativement afin de caractériser l'ensemble des termes nécessaires à l'obtention de la matrice d'impédance.

En considérant que trois points sont utilisés pour la sous-structure « a » seule et deux points d'interface, l'équation (3.1) peut être détaillée afin de révéler ces points physiques de caractérisation. Pour alléger la présentation, la dépendance fréquentielle (ω) des différents termes n'est pas écrite dans les équations suivantes.

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{F}_{A1}^a \\ \mathbf{F}_{A2}^a \\ \mathbf{F}_{A3}^a \\ \mathbf{F}_{I1}^a \\ \mathbf{F}_{I2}^a \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{A1A1}^a & \mathbf{Z}_{A1A2}^a & \mathbf{Z}_{A1A3}^a & \mathbf{Z}_{A1I1}^a & \mathbf{Z}_{A1I2}^a \\ \mathbf{Z}_{A2A1}^a & \mathbf{Z}_{A2A2}^a & \mathbf{Z}_{A2A3}^a & \mathbf{Z}_{A2I1}^a & \mathbf{Z}_{A2I2}^a \\ \mathbf{Z}_{A3A1}^a & \mathbf{Z}_{A3A2}^a & \mathbf{Z}_{A3A3}^a & \mathbf{Z}_{A3I1}^a & \mathbf{Z}_{A3I2}^a \\ \mathbf{Z}_{I1A1}^a & \mathbf{Z}_{I1A2}^a & \mathbf{Z}_{I1A3}^a & \mathbf{Z}_{I1I1}^a & \mathbf{Z}_{I1I2}^a \\ \mathbf{Z}_{I2A1}^a & \mathbf{Z}_{I2A2}^a & \mathbf{Z}_{I2A3}^a & \mathbf{Z}_{I2I1}^a & \mathbf{Z}_{I2I2}^a \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{V}_{A1}^a \\ \mathbf{V}_{A2}^a \\ \mathbf{V}_{A3}^a \\ \mathbf{V}_{I1}^a \\ \mathbf{V}_{I2}^a \end{Bmatrix} \quad (3.2)$$

De manière générale, cette équation inclut l'ensemble des degrés de liberté des points $A1$, $A2$, $A3$, $I1$ et $I2$. Par exemple, la matrice \mathbf{Z}_{A1A1}^a de l'équation (3.2) peut être détaillée avec tous ses degrés de liberté.

$$\mathbf{Z}_{A1A1}^a = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{A1xA1x}^a & \mathbf{Z}_{A1xA1y}^a & \mathbf{Z}_{A1xA1z}^a & \mathbf{Z}_{A1xA1\theta x}^a & \mathbf{Z}_{A1xA1\theta y}^a & \mathbf{Z}_{A1xA1\theta z}^a \\ \mathbf{Z}_{A1yA1x}^a & \mathbf{Z}_{A1yA1y}^a & \mathbf{Z}_{A1yA1z}^a & \mathbf{Z}_{A1yA1\theta x}^a & \mathbf{Z}_{A1yA1\theta y}^a & \mathbf{Z}_{A1yA1\theta z}^a \\ \mathbf{Z}_{A1zA1x}^a & \mathbf{Z}_{A1zA1y}^a & \mathbf{Z}_{A1zA1z}^a & \mathbf{Z}_{A1zA1\theta x}^a & \mathbf{Z}_{A1zA1\theta y}^a & \mathbf{Z}_{A1zA1\theta z}^a \\ \mathbf{Z}_{A1\theta xA1x}^a & \mathbf{Z}_{A1\theta xA1y}^a & \mathbf{Z}_{A1\theta xA1z}^a & \mathbf{Z}_{A1\theta xA1\theta x}^a & \mathbf{Z}_{A1\theta xA1\theta y}^a & \mathbf{Z}_{A1\theta xA1\theta z}^a \\ \mathbf{Z}_{A1\theta yA1x}^a & \mathbf{Z}_{A1\theta yA1y}^a & \mathbf{Z}_{A1\theta yA1z}^a & \mathbf{Z}_{A1\theta yA1\theta x}^a & \mathbf{Z}_{A1\theta yA1\theta y}^a & \mathbf{Z}_{A1\theta yA1\theta z}^a \\ \mathbf{Z}_{A1\theta zA1x}^a & \mathbf{Z}_{A1\theta zA1y}^a & \mathbf{Z}_{A1\theta zA1z}^a & \mathbf{Z}_{A1\theta zA1\theta x}^a & \mathbf{Z}_{A1\theta zA1\theta y}^a & \mathbf{Z}_{A1\theta zA1\theta z}^a \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

De manière similaire à l'équation (3.1), la sous-structure « b » seule peut être décrite par la formulation en impédance suivante :

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{F}_I^b \\ \mathbf{F}_B^b \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{II}^b & \mathbf{Z}_{IB}^b \\ \mathbf{Z}_{BI}^b & \mathbf{Z}_{BB}^b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{V}_I^b \\ \mathbf{V}_B^b \end{Bmatrix} \quad (3.4)$$

Lorsque les deux structures sont couplées, l'assemblage « ab » peut être décrit à l'aide d'une formulation en impédance :

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{F}_A^{ab} \\ \mathbf{F}_I^{ab} \\ \mathbf{F}_B^{ab} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{AA}^{ab} & \mathbf{Z}_{AI}^{ab} & \mathbf{0} \\ \mathbf{Z}_{IA}^{ab} & \mathbf{Z}_{II}^{ab} & \mathbf{Z}_{IB}^{ab} \\ \mathbf{0} & \mathbf{Z}_{BI}^{ab} & \mathbf{Z}_{BB}^{ab} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{V}_A^{ab} \\ \mathbf{V}_I^{ab} \\ \mathbf{V}_B^{ab} \end{Bmatrix} \quad (3.5)$$

La formulation en impédance de l'équation (3.5) décrivant le comportement dynamique du système couplé « ab » peut être prédit par la caractérisation en impédance de chaque sous-structure séparément (Équations (3.1) et (3.4)). Selon la théorie des méthodes de couplage, ceci est rendu possible par des conditions d'équilibre des forces et de compatibilité des vitesses au sein de l'ensemble d'interface. Une formulation en impédance basée sur la caractérisation des sous-structures séparément découle de ces conditions :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{AA}^{ab} & \mathbf{Z}_{AI}^{ab} & \mathbf{0} \\ \mathbf{Z}_{IA}^{ab} & \mathbf{Z}_{II}^{ab} & \mathbf{Z}_{IB}^{ab} \\ \mathbf{0} & \mathbf{Z}_{BI}^{ab} & \mathbf{Z}_{BB}^{ab} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{AA}^a & \mathbf{Z}_{AI}^a & \mathbf{0} \\ \mathbf{Z}_{IA}^a & \mathbf{Z}_{II}^a + \mathbf{Z}_{II}^b & \mathbf{Z}_{IB}^b \\ \mathbf{0} & \mathbf{Z}_{BI}^b & \mathbf{Z}_{BB}^b \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Dans notre cas d'étude, la sous-structure « a » représente la poutre, la sous-structure « b » représente le système main-bras et l'interface I est le point de contact entre le système main-bras et cette structure mécanique (figure 3-3). Pour étudier les interactions humain-structure dans le cas d'une structure vibrante, les méthodes de couplage par sous-structuration offrent certains avantages. Un de ces avantages est la capacité de coupler des structures en considérant leur ensemble d'interface seulement. Dans le cas du couplage avec le système main-bras, l'équation (3.6) peut être simplifiée pour éliminer l'ensemble B et garder uniquement l'ensemble d'interface I pour la sous-structure « b » car aucun point autre que le point d'interface n'est considéré sur le reste du bras :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{AA} & \mathbf{Z}_{AI} \\ \mathbf{Z}_{IA} & \mathbf{Z}_{II} \end{bmatrix}^{ab} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{AA}^a & \mathbf{Z}_{AI}^a \\ \mathbf{Z}_{IA}^a & \mathbf{Z}_{II}^a + \mathbf{Z}_{II}^b \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

L'équation (3.7) est une formulation généralisée en impédance de l'approche permettant de coupler une structure mécanique avec le corps humain par sous-structuration. Dans cette équation, chaque terme est une matrice et il peut y avoir autant de degrés de liberté que nécessaire.

La poutre utilisée dans ce cas d'étude est un cylindre creux en aluminium de diamètre 25,4 mm, d'épaisseur de mur 3,2 mm et de longueur totale 168 cm. Elle est encastree aux extrémités à l'aide de deux poteaux d'acier, eux-mêmes fermement attachés à une lourde table

rigide en acier. Cette structure a été choisie pour révéler de multiples modes dans la bande de fréquences d'intérêt allant de 5 à 300 Hz et ainsi voir l'influence du système main-bras sur le comportement dynamique de la poutre en fonction de la fréquence. La figure 3-3 illustre la configuration de la poutre.

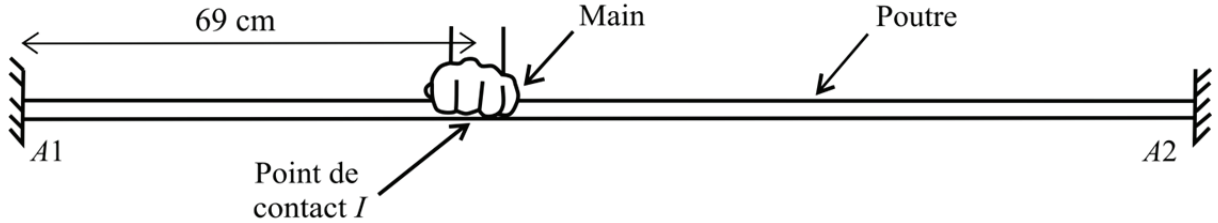


Figure 3-3 : Configuration de couplage entre le système main-bras et une poutre

Dans cette configuration, l'ensemble A contient deux points ($A1$ et $A2$) et l'ensemble d'interface I seulement un point. En utilisant les équations (3.5) et (3.7) pour le couplage de cette poutre avec le système main-bras, on peut écrire l'équation suivante :

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{F}_{A1}^{ab} \\ \mathbf{F}_{A2}^{ab} \\ \mathbf{F}_I^{ab} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{A1A1}^a & \mathbf{Z}_{A1A2}^a & \mathbf{Z}_{A1I}^a \\ \mathbf{Z}_{A2A1}^a & \mathbf{Z}_{A2A2}^a & \mathbf{Z}_{A2I}^a \\ \mathbf{Z}_{IA1}^a & \mathbf{Z}_{IA2}^a & \mathbf{Z}_{II}^a + \mathbf{Z}_{II}^b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{V}_{A1}^{ab} \\ \mathbf{V}_{A2}^{ab} \\ \mathbf{V}_I^{ab} \end{Bmatrix} \quad (3.8)$$

Comme la poutre est encastree en $A1$ et $A2$, on en déduit :

$$\mathbf{V}_{A1}^{ab} = \mathbf{V}_{A2}^{ab} = 0 \quad (3.9)$$

et,

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{F}_{A1}^{ab} \\ \mathbf{F}_{A2}^{ab} \\ \mathbf{F}_I^{ab} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{A1I}^a \\ \mathbf{Z}_{A2I}^a \\ \mathbf{Z}_{II}^a + \mathbf{Z}_{II}^b \end{bmatrix} \left\{ \mathbf{V}_I^{ab} \right\} \quad (3.10)$$

L'équation (3.10) peut également être simplifiée pour mettre en évidence le comportement dynamique des structures couplées au point I . En effet, ce point est le point d'intérêt lors des études d'interactions Humain-structure. On trouve ainsi le comportement dynamique des structures couplées au point d'interface I en fonction du comportement dynamique de chacune des sous-structures prise séparément en ce même point.

$$\{\mathbf{F}_I^{ab}\} = [\mathbf{Z}_{II}^a + \mathbf{Z}_{II}^b] \{\mathbf{V}_I^{ab}\} \quad (3.11)$$

Parmi l'ensemble des degrés de liberté, seul l'axe vertical z est considéré dans ce cas d'étude. La poutre est excitée selon la direction verticale uniquement et la réponse est mesurée selon le même axe. L'équation (3.11) peut finalement être réduite de la manière suivante :

$$\{F_{Iz}^{ab}\} = [Z_{IzIz}^a + Z_{IzIz}^b] \{V_{Iz}^{ab}\} \quad (3.12)$$

On voit apparaître dans l'équation (3.12) la caractérisation en impédance de la poutre seule au point d'interface I ainsi que la caractérisation en impédance du système main-bras.

3.1.2 Données expérimentales mesurées sur l'assemblage

Les données expérimentales sont mesurées sur l'assemblage afin d'évaluer la précision des prédictions obtenues en utilisant la méthode de sous-structuration par impédance. L'impédance du système couplé (main sur la poutre) est mesurée en utilisant un capteur de force et un accéléromètre, dont le signal sera intégré dans le domaine fréquentiel pour obtenir la vitesse. Ces capteurs sont installés sous la poutre (figure 3-4), à l'endroit exact où la main est en contact avec la poutre. Un signal aléatoire de type bruit blanc est délivré au pot vibrant. Ce signal possède une valeur efficace (RMS) de 10 m/s^2 dans la bande de fréquences 5 – 300 Hz. Le système d'acquisition est un SCADAS Mobile piloté par le logiciel Test.Lab 11b de LMS.

Cette étude est menée sur un seul sujet afin d'éviter toute variabilité inter-individuelle. Une posture du système main-bras est choisie pour des mesures d'impédance dans la direction verticale (cf. section 3.1.4). Un total de quatre forces de poussée différentes est testé pour 20, 30, 40 et 50 N. La force de poussée est mesurée et contrôlée en utilisant une jauge de déformations installée sur la poutre. Pour chaque configuration, il est demandé au sujet de déposer sa main sur la poutre sans appliquer aucune force de préhension. Le sujet garde la force de poussée appliquée constante pendant l'exposition aux vibrations en utilisant le niveau de force affiché sur le conditionneur de signal de la jauge (figure 3-4). Une fois la posture et la force de poussée correctement établies, les données sont mesurées.

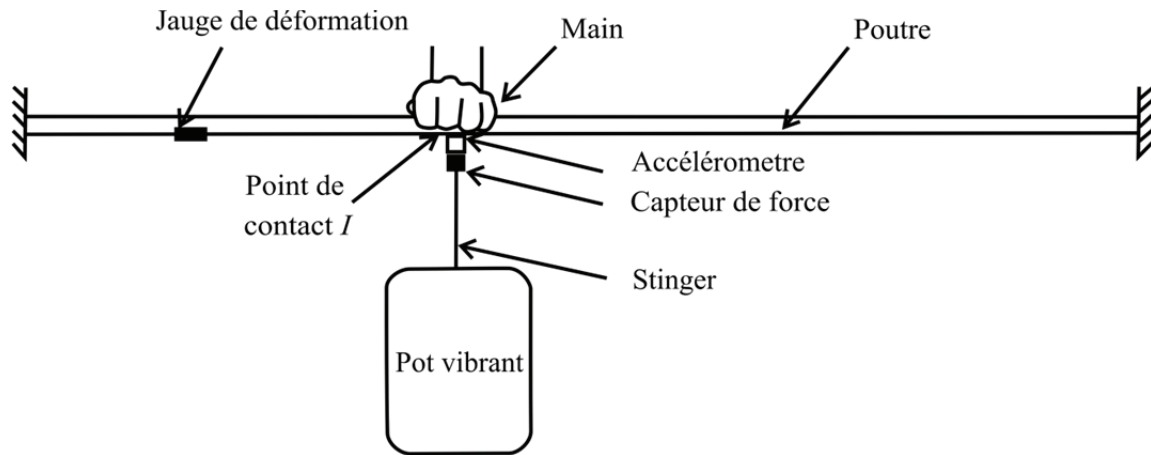


Figure 3-4 : Montage expérimental pour mesurer le comportement dynamique de l'assemblage (main sur poutre) pour 4 différentes forces de poussée de la main au niveau du point de contact I (Capteur de force 208C03 type ICP de PCB Piezotronics, accéléromètre 356B20 type ICP de PCB Piezotronics, jauge de déformations avec conditionneur de signal modèle P-3500 de Vishay)

3.1.3 Caractérisation vibratoire de la poutre

Concernant la caractérisation dynamique de la poutre seule, la FRF Z_{lz}^a nécessaire au processus de couplage décrit dans l'équation (3.12) est obtenue expérimentalement. Cette caractérisation en impédance de la poutre seule est effectuée selon la même procédure expérimentale que celle décrite dans la section précédente 3.1.2. La résolution fréquentielle de la réponse harmonique de la structure est de 0,5 Hz.

3.1.4 Attentions particulières pour caractériser le système main-bras

Quelques études ont investigué les effets de certains paramètres tels que la posture, la direction d'excitation, les forces de contact, et autres sur les caractéristiques de la réponse biodynamique du système main-bras. Bien que les caractéristiques de réponse biodynamique aient été mesurées sur des sujets dans des conditions contrôlées, des différences importantes existent dans les données d'impédance reportées par les différents investigateurs. Ces différences peuvent être attribuées en partie aux différentes méthodes et conditions de tests employées par les chercheurs individuellement, et à la dépendance de la réponse biodynamique du système main-bras aux divers paramètres précédemment cités.

Pour ces raisons, le système main-bras est caractérisé dans cette étude à partir de mesures d'impédance en conditions contrôlées. Dans l'équation (3.12) Z_{lz}^b correspond à l'impédance mécanique du système main-bras mesurée au point d'excitation pour une sollicitation selon l'axe vertical z . Ce terme dépendant de la fréquence est mesuré pour obtenir une FRF expérimentale des caractéristiques dynamiques du système main-bras. Cette FRF est obtenue en utilisant une poignée de mesure spécialement conçue afin d'avoir les mêmes caractéristiques que la poutre cylindrique en termes de diamètre. Cette poignée est équipée d'un accéléromètre et montée sur un capteur de force. Cet ensemble est lui-même installé sur un pot vibrant, permettant ainsi des mesures d'impédance (figure 3-5). Le système d'acquisition est le SCADAS Mobile piloté par le logiciel Test.Lab 11b de LMS. Pour éviter tout comportement non-linéaire inhérent au système main-bras, un signal d'accélération équivalent à celui mesuré sur la poutre est délivré à la poignée de mesures. Ceci est effectué en utilisant le système de contrôle et de réplication de données de Vibration Research Corporation (VR). Les mesures sont effectuées sur la bande de fréquences 5 – 300 Hz avec une résolution de 0,5 Hz.

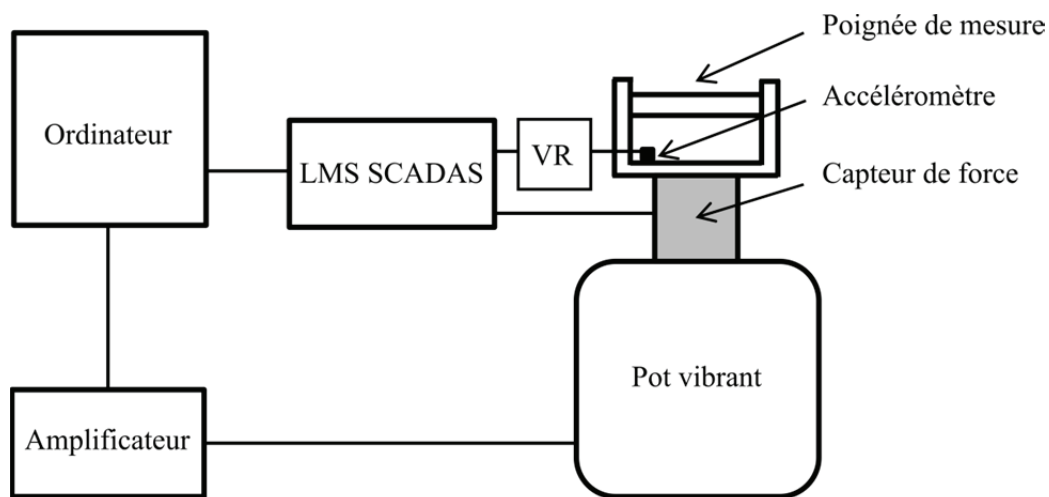


Figure 3-5 : Diagramme de mesure de l'impédance du système main-bras
(Logiciel LMS Test.Lab 11b avec frontal SCADAS mobile, amplificateur de puissance SS250VCF MB Dynamics pour le pot vibrant, système de contrôle et de réplication VR, capteur de force 6 degrés de liberté modèle MC3-6-500 d'AMTI, accéléromètre 356B20 type ICP de PCB Piezotronics)

De précédentes études ont investigué l'effet de la dynamique de la poignée sur les mesures biodynamiques du système main-bras. Pour la bande de fréquences d'intérêt considérée dans ce cas d'étude, la poignée possède un comportement rigide. Ceci fut déterminé par mesures réalisées directement sur la poignée seule. Compte tenu de cette vérification de comportement rigide sur la plage d'intérêt, son impédance peut être soustraite de l'impédance totale (main + poignée) pour obtenir l'impédance du système main-bras. Les mesures sont effectuées avec et sans main sur la poignée.

$$Z_{\text{main}} = Z_{\text{totale}} - Z_{\text{poignée}} \quad (3.13)$$

Comme mentionné auparavant, cette étude est menée sur un seul sujet afin d'éviter toute variabilité inter-individuelle. La même posture de la main et du bras que celle utilisée lors des mesures sur l'assemblage est utilisée pour des mesures d'impédance du système main-bras selon une direction verticale. Pour cette posture, l'angle entre le bras et l'avant-bras est une extension de 180° du coude (bras en pleine extension) et l'angle entre le haut du corps et l'épaule est de 0° (figure 3-6).

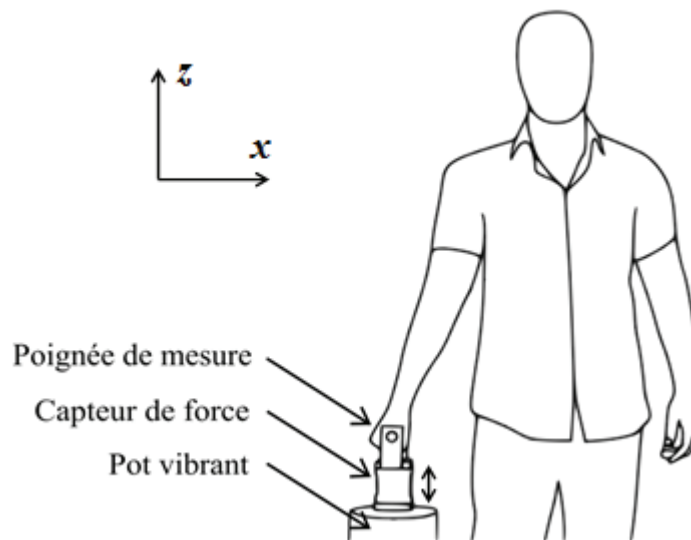


Figure 3-6 : Posture d'étude pour excitation verticale du bras selon l'axe z_h

Pour cette posture, selon la norme ISO-5349, une direction d'excitation verticale correspond à une excitation selon la coordonnée z_h de la main (figure 2-9).

Les mêmes quatre forces de poussée sont testées (20, 30, 40 et 50 N). Pour chaque configuration, il est demandé au sujet de saisir la poignée sans appliquer de force de préhension. Lorsque le sujet parvient à contrôler la force de poussée, les données sont mesurées. Le sujet doit maintenir une force de poussée constante pendant l'ensemble du test en utilisant la force DC affichée par le capteur de force. Un total de dix mesures est réalisé par configuration pour évaluer la variabilité intra-individuelle. Les mesures ont été réalisées sur plusieurs jours afin d'éviter tous biais liés à la fatigue du sujet.

3.1.5 Résultats

Les résultats de mesures d'impédance (amplitude et phase) du système main-bras pour la posture sélectionnée et les quatre forces de poussée sont illustrés sur la figure 3-7. Ces impédances mesurées décrivent le comportement dynamique du système main-bras selon la posture spécifiquement étudiée et le type d'excitation utilisé. Chaque courbe représente la moyenne des dix FRFs mesurées pour chaque force de poussée.

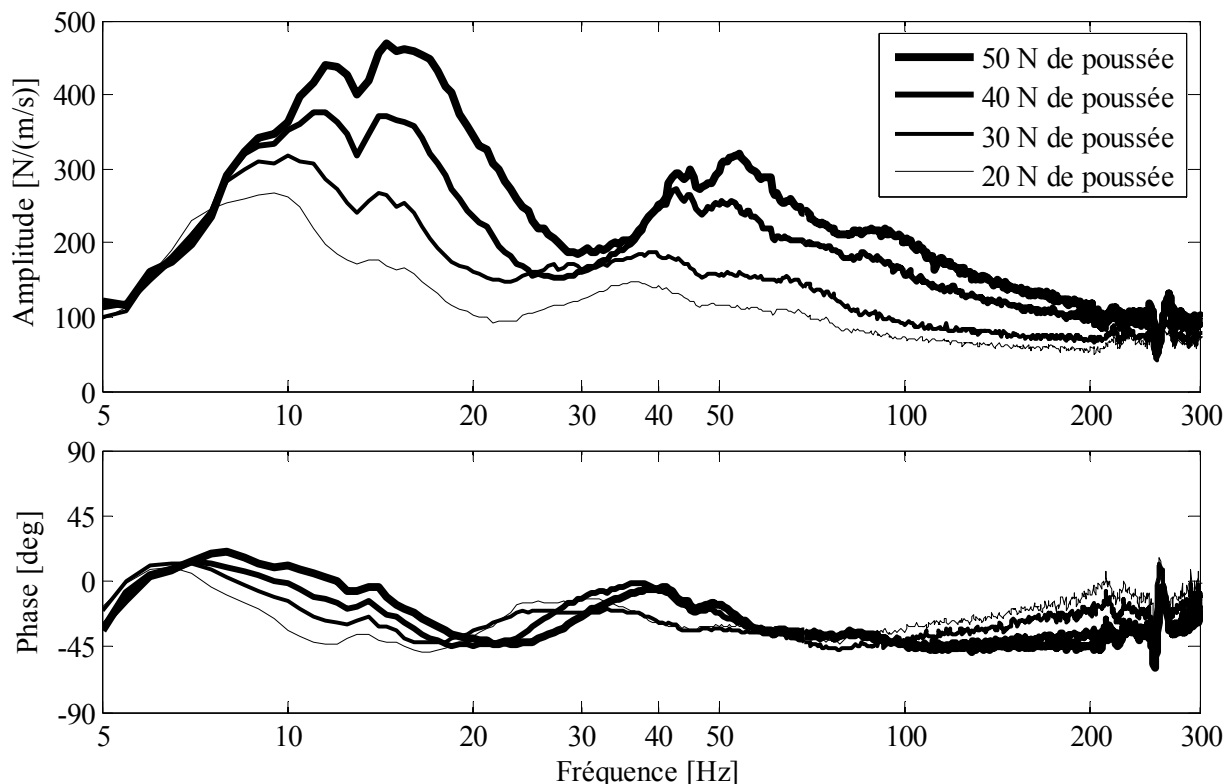


Figure 3-7 : Impédance du système main-bras selon la posture d'étude et les quatre forces de poussée

On constate que l'amplitude de l'impédance du système main-bras augmente avec la force de poussée. Pour chaque force de poussée, les résultats indiquent deux pics amortis dans la bande de fréquences 5 – 75 Hz.

Une analyse statistique sur les mesures d'impédance du système main-bras pour chaque force de poussée indique que ces données sont normalement distribuées. Pour cela, la fonction Matlab « normplot » (normal probability plot) peut être utilisée. Elle permet de savoir si des données issues d'un vecteur sont distribuées normalement. Lorsque les données sont normalement distribuées, la fonction « normfit » de Matlab permet d'évaluer l'intervalle de confiance à 95 %. En effet, l'écart à la moyenne menant à un intervalle de confiance à 95 % peut être déterminé en fonction de l'écart-type. Pour chaque force de poussée, le plus grand niveau d'incertitude sur les courbes d'impédance est observé au voisinage de 15 Hz. Ce maximum d'écart à la moyenne menant à l'intervalle de confiance à 95 % est présenté dans le tableau 3-2 pour chaque niveau de la force de poussée.

Tableau 3-2 : Écart maximum à la moyenne permettant d'obtenir un intervalle de confiance à 95 % sur l'impédance du système main-bras en amplitude pour chaque force de poussée

Force de poussée (N)	Écart Maximum (N/(m/s))
20	27,4
30	36,9
40	35,3
50	43,8

Les résultats du tableau 3-2 indiquent que l'incertitude de mesures augmente avec la force de poussée appliquée par le sujet. Cependant, d'après la figure 3-7, les courbes sont bien dissociées en dessous de 200 Hz. En considérant les écarts permettant de déduire les intervalles de confiance à 95 % pour chaque force de poussée, on en déduit que chacune des forces de poussée peut être distinguée sur les réponses en impédance du système main-bras.

Les dimensions de la poutre ont été choisies pour révéler plusieurs modes dans la bande de fréquences d'intérêt 5 – 300 Hz. Le comportement dynamique de la poutre seule ainsi que le comportement dynamique de l'assemblage (section 3.1.2) sont présentés sur la figure 3-8. Cette figure présente l'accélération mesurée au point de contact *I*. Elle illustre l'influence de la main sur le comportement dynamique de la poutre pour les quatre forces de poussée (amplitude et phase).

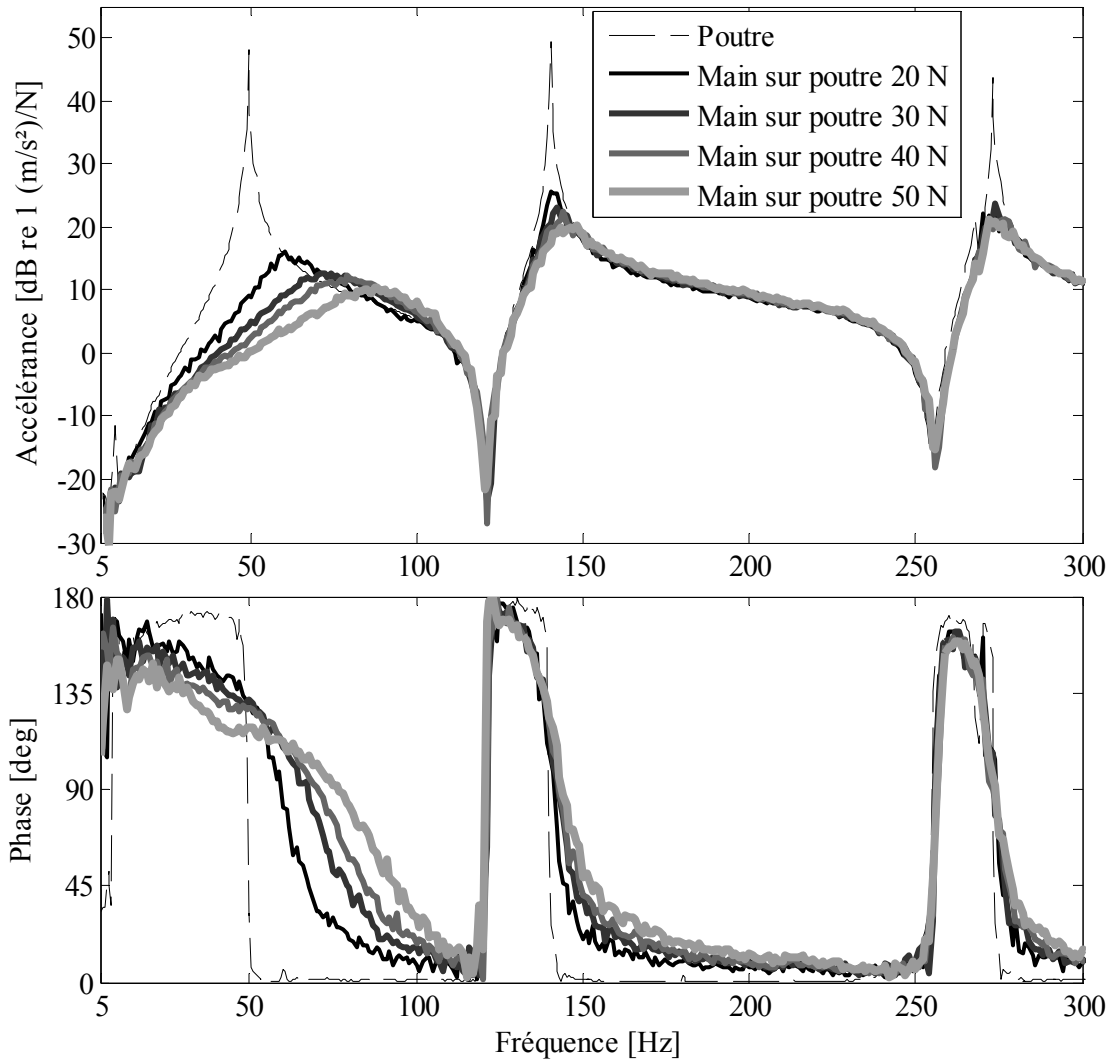


Figure 3-8 : Comportement vibratoire de la poutre et influence de la main sur le comportement vibratoire de cette poutre pour les quatre forces de poussée (mesurées au point de contact I)

Sur la figure 3-8, la FRF mesurée de la poutre seule montre trois fréquences de résonance à 49, 140 et 273 Hz en alternance avec des antirésonances à 121 et 255 Hz. Cette alternance est caractéristique d'une mesure au point d'entraînement. On remarque également un pic au-dessus de 5 Hz. Ce pic est dû aux conditions de fixation de la poutre aux deux extrémités. Il peut clairement être identifié que le comportement dynamique de la poutre est modifié lorsque la main applique une force de poussée sur celle-ci. De plus, on constate que l'influence du système main-bras sur la poutre n'est pas la même pour les quatre forces de poussée. Plus la force de poussée augmente, plus l'influence de la main sur le comportement dynamique de la poutre est importante. Ceci montre l'importance de contrôler la force de poussée afin d'obtenir des prédictions fiables lorsque l'on utilise une méthode de sous-structuration avec le système main-bras. Le système main-bras possède une influence sur l'ensemble des trois modes dont l'importance est plus marquée pour la première résonance. Pour les deuxième et troisième résonances de la poutre, le système main-bras ajoute majoritairement de l'amortissement.

3.1.6 Validation

Dans cette section de validation, la FRF expérimentale de la poutre seule (section 3.1.3) est couplée avec chacune des FRFs expérimentales décrivant les caractéristiques dynamiques du système main-bras (section 3.1.4) en utilisant l'équation (3.12). Les résultats de prédictions du comportement dynamique du système couplé (main sur poutre), utilisant la méthode de couplage par impédance avec une posture spécifique et quatre forces de poussée différentes, sont comparés aux mesures expérimentales effectuées sur l'assemblage avec la même posture et les mêmes forces de poussée (section 3.1.2).

La figure suivante compare les prédictions de couplage avec les mesures expérimentales effectuées sur l'assemblage pour les quatre forces de poussée en accélération. Le comportement dynamique de la poutre seule est indiqué en traits pointillés fins afin de mettre en évidence l'influence de la main sur la poutre. L'écart maximal de prédictions dû à la variabilité de la réponse dynamique du système main-bras est inférieur à 3 dB en accélération $[(m/s^2)/N]$.

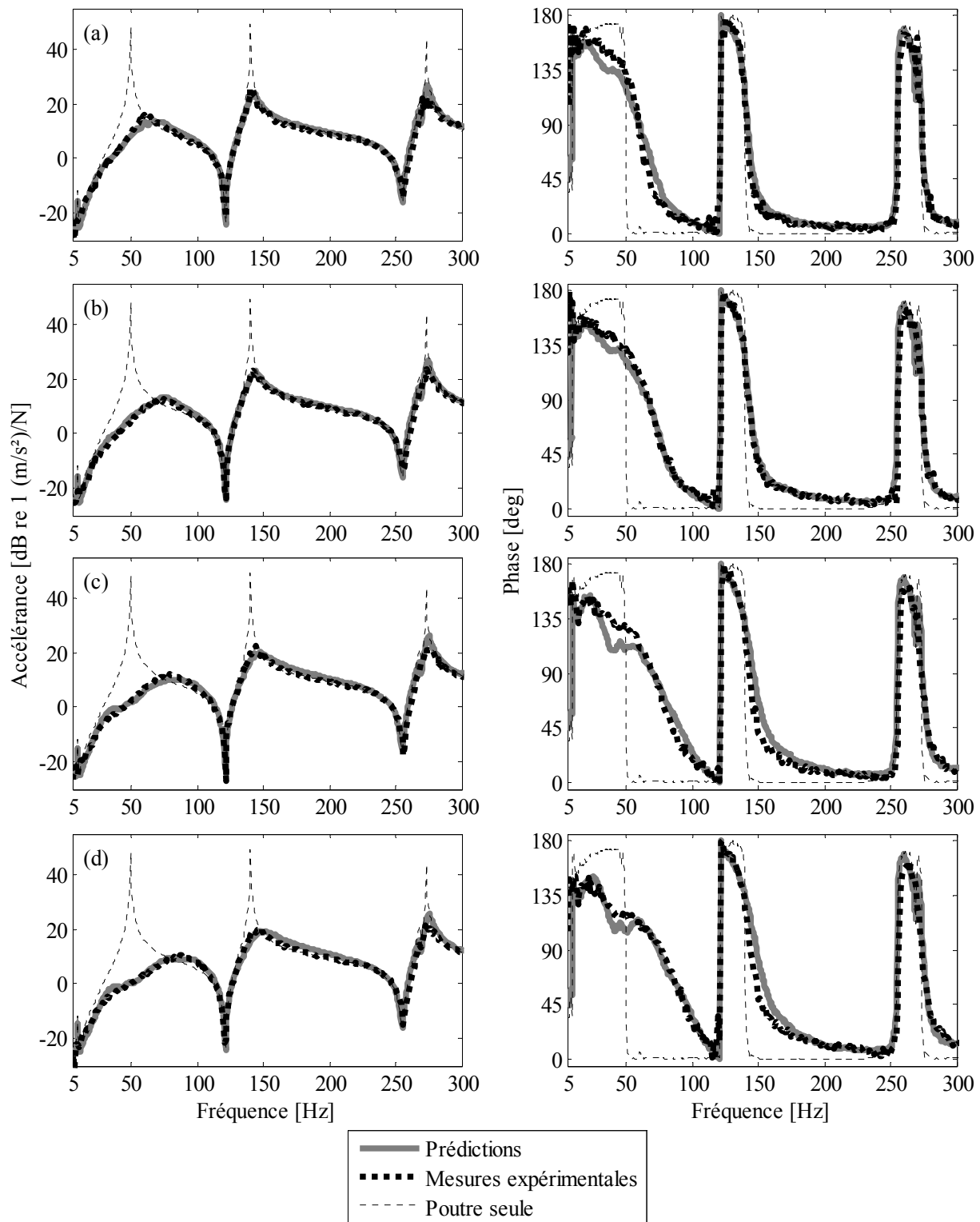


Figure 3-9 : Prédications de couplage de la main sur la poutre pour une posture spécifique comparées aux mesures expérimentales pour quatre forces de poussée (a: 20 N, b: 30 N, c: 40 N et d: 50 N) en amplitude (gauche) et en phase (droite)

Les prédictions obtenues sur la figure 3-9 possèdent un écart maximal de l'ordre de 3 dB en accélération. Compte tenu de la variabilité de l'impédance du système main-bras en fonction de la force de poussée (figure 3-7) et de l'influence de la main sur la poutre (figure 3-8) pour chaque force de poussée, on peut conclure que l'utilisation d'une méthode de sous-structuration permet d'obtenir des prédictions fiables concernant le comportement dynamique de l'assemblage main – poutre.

Les résultats de la figure 3-9 démontrent que le modèle de couplage uniaxial par impédance permet de prédire l'influence du système main-bras sur le comportement dynamique de la poutre pour quatre forces de poussée différentes. Ainsi, les interactions dynamiques entre le système main-bras et cette structure mécanique sont bien prises en compte malgré une caractérisation indépendante de chacune des structures constituant cet assemblage.

D'après les résultats obtenus lors de cette étude, la fiabilité du couplage par impédance réside dans le contrôle de la force de poussée utilisée. En effet, il est important de contrôler la force de poussée appliquée par le sujet quand on utilise une approche par sous-structuration car la réponse du système main-bras en impédance est sensible à ce paramètre (figure 3-7). Ce cas d'étude démontre donc la possibilité de prédire le comportement dynamique d'un assemblage comprenant une main à l'aide d'une méthode de sous-structuration par impédance.

Cette approche par sous-structuration semble donc avoir un fort potentiel pour l'étude des interactions Humain-structure et l'étude de l'exposition du corps humain aux vibrations. Cependant, la démonstration effectuée dans cette section est un cas particulier concernant une étude uniaxiale. Le cas d'étude suivant propose donc d'étudier cette approche par sous-structuration sur un cas d'étude légèrement plus complexe à deux axes.

3.2 Cas d'étude no 2 : Couplage bi-axial entre le système main-bras et une poutre

Après avoir démontré la possibilité de réalisation d'un couplage mécanique entre le système main-bras et une poutre droite selon un axe, ce nouveau cas d'étude propose de réaliser un couplage entre le système main-bras et la même poutre selon deux axes en utilisant la même méthode de couplage par impédance.

Les méthodes de sous-structuration permettent en théorie de coupler des structures entre elles peu importe le nombre de degrés de liberté impliqué dans ce couplage. Lorsqu'un cycliste roule sur la route avec son vélo, la sollicitation de la route génère une excitation principalement selon deux axes, l'axe vertical et l'axe horizontal antéro-postérieur (figure 3-10). Ainsi, deux axes pourraient être considérés lors de la réalisation d'un couplage par sous-structuration dans le cas du cycliste sur son vélo.

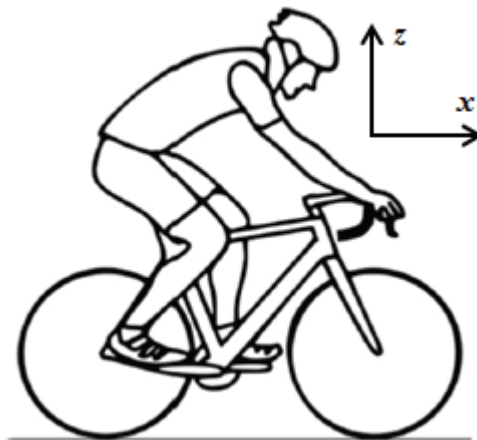


Figure 3-10 : Système d'axes pour un cycliste sur son vélo

3.2.1 Formulation pour un couplage bi-axial et hypothèses simplificatrices

L'équation (3.11) de couplage au point de contact I entre la poutre et le système main-bras peut être décomposée pour révéler les deux axes d'intérêt de ce cas d'étude :

$$\begin{Bmatrix} F_{Ix}^{ab} \\ F_{Iz}^{ab} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{IxIx}^a + Z_{IxIx}^b & Z_{IxIz}^a + Z_{IxIz}^b \\ Z_{IzIx}^a + Z_{IzIx}^b & Z_{IzIz}^a + Z_{IzIz}^b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V_{Ix}^{ab} \\ V_{Iz}^{ab} \end{Bmatrix} \quad (3.14)$$

La structure « a » est une nouvelle fois la poutre et la structure « b » le système main-bras.

La poutre étant théoriquement parfaitement symétrique et encadrée aux deux extrémités, les termes Z_{IxIz}^a et Z_{IzIx}^a sont nuls. En effet, lors d'une sollicitation en vitesse au point I selon l'axe z , seule une réponse en force selon l'axe z peut être mesurée. Respectivement, lors d'une sollicitation en vitesse au point I selon l'axe x , seule une réponse selon l'axe x peut être mesurée. L'équation (3.14) devient alors :

$$\begin{Bmatrix} F_{Ix}^{ab} \\ F_{Iz}^{ab} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{IxIx}^a + Z_{IxIx}^b & Z_{IxIz}^b \\ Z_{IzIx}^b & Z_{IzIz}^a + Z_{IzIz}^b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V_{Ix}^{ab} \\ V_{Iz}^{ab} \end{Bmatrix} \quad (3.15)$$

3.2.2 Posture d'étude et mesures bi-axiales du système main-bras

La caractérisation du système main-bras se fait selon le même principe que celui décrit dans la section 3.1.4 mais selon les deux axes x et z . On demande au sujet d'adopter la même posture que précédemment (Figure 3-6) et d'exercer une force de poussée verticale seulement. Quatre forces de poussée selon l'axe z sont étudiées (20, 30, 40 et 50 N). Bien que l'étude soit bi-axiale, la force de poussée exercée est uniquement verticale.

Les mesures de réponse du système main-bras sont effectuées séquentiellement selon l'axe x et selon l'axe z pour chacune des configurations afin d'obtenir les termes correspondants à la structure « b » dans l'équation (3.15).

Des résultats préliminaires ont permis d'identifier que lors d'une sollicitation en vitesse selon un axe, seule une réponse du système main-bras selon cet axe est mesurée. L'hypothèse est alors émise que les termes croisés d'impédance sont nuls. L'équation (3.15) peut donc être simplifiée de la manière suivante :

$$\begin{Bmatrix} F_{lx}^{ab} \\ F_{lz}^{ab} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{lxlx}^a + Z_{lxlx}^b & 0 \\ 0 & Z_{lzlz}^a + Z_{lzlz}^b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V_{lx}^{ab} \\ V_{lz}^{ab} \end{Bmatrix} \quad (3.16)$$

3.2.3 Données expérimentales mesurées sur la poutre

Afin d'évaluer l'influence du système main-bras sur la structure, des mesures directes sont effectuées lorsque la main est en contact avec la poutre selon les quatre forces de poussée. On demande alors au sujet d'adopter la posture d'étude et d'exercer une force de poussée verticale sur la poutre.

Le montage expérimental permettant les mesures lorsque la main est en contact avec la poutre est présenté sur la figure suivante. Sur ce montage expérimental, l'excitation de la poutre par le pot vibrant est une excitation à 45° afin de solliciter l'axe horizontal et l'axe vertical en même temps. Des jauges de déformation ont été ajoutées afin de mesurer la force de poussée et s'assurer que le sujet applique une force de poussée verticale seulement. Ce montage expérimental permet d'obtenir les caractéristiques dynamiques de la poutre seule selon les deux axes et de mesurer d'influence de la main sur la poutre pour quatre forces de poussée. Ces mesures permettront de vérifier la validité des prédictions de couplage par sous-structuration pour les deux axes. Chaque mesure possède une durée de 30 s.

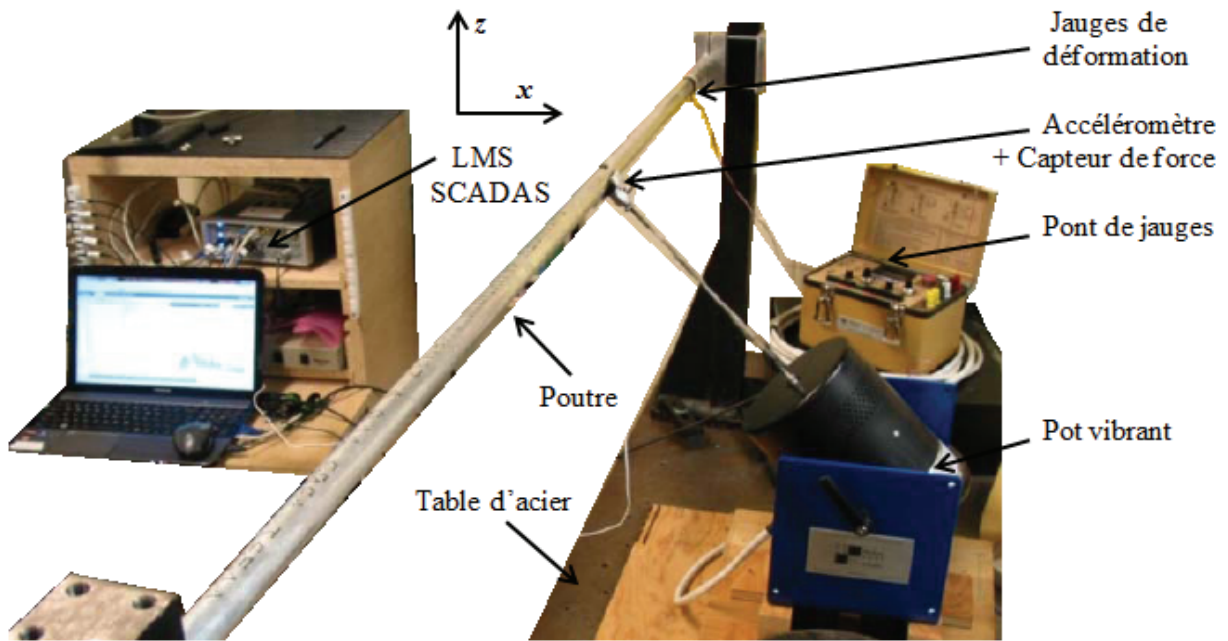


Figure 3-11 : Montage expérimental permettant de mesurer les caractéristiques dynamiques de la poutre seule ainsi que celles de l'assemblage « système main-bras – poutre »

3.2.4 Résultats

Le comportement dynamique de la poutre seule ainsi que le comportement dynamique de l'assemblage, correspondant aux données mesurées pour l'axe horizontal et l'axe vertical, sont présentés sur la figure 3-12 et la figure 3-13 respectivement. Ces figures présentent l'accélération mesurée au point de contact *I* pour les deux axes orthogonaux. Elles illustrent l'influence de la main sur le comportement dynamique de la poutre selon ces deux axes en amplitude pour les quatre forces de poussée.

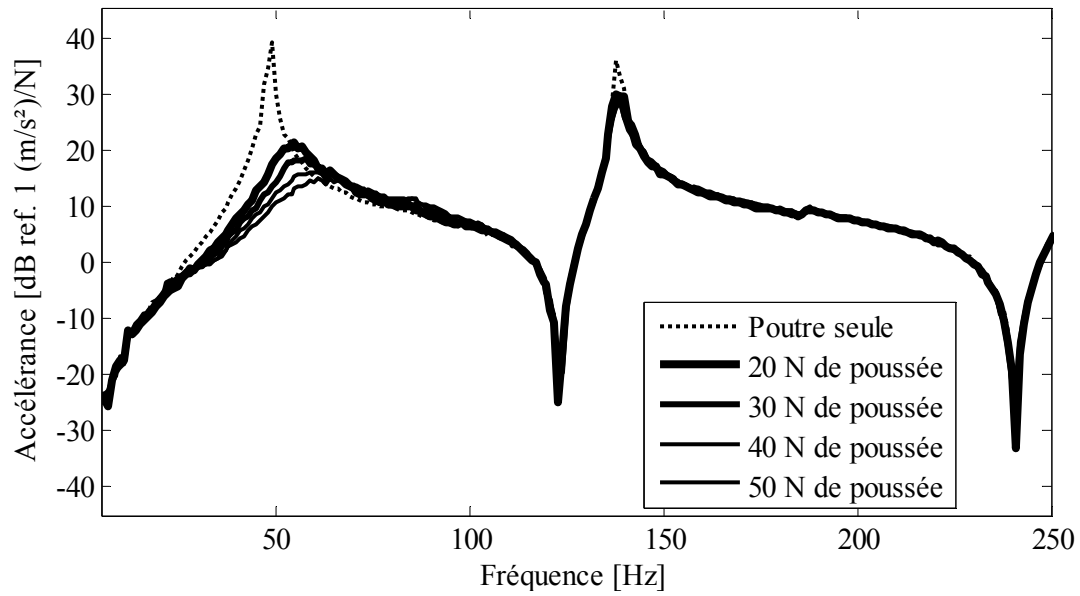


Figure 3-12 : FRFs en accélération du comportement vibratoire de la poutre et de l'influence de la main sur la poutre selon l'axe horizontal x pour les quatre forces de poussée

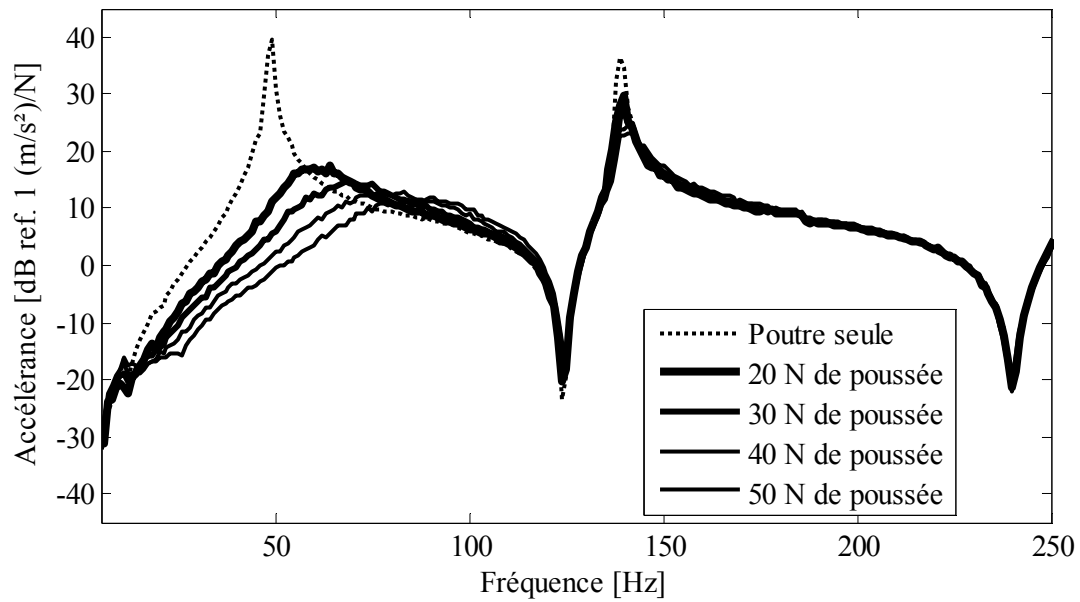


Figure 3-13 : FRFs en accélération du comportement vibratoire de la poutre et de l'influence de la main sur la poutre selon l'axe vertical z pour les quatre forces de poussée

On constate d'après la figure 3-12 et la figure 3-13 que la poutre seule possède le même comportement dynamique selon les axes x et z . Ceci peut s'expliquer par le fait que la poutre est presque parfaitement symétrique. Théoriquement, elle possède des modes doubles; c'est-à-dire des modes se produisant à la même fréquence et ayant la même déformée modale mais selon deux directions orthogonales.

Par ailleurs, il peut clairement être identifié que le comportement dynamique de la poutre est modifié lorsque la main applique une force de poussée sur celle-ci. On remarque une influence plus marquée du système main-bras pour la première résonance, notamment entre 10 et 75 Hz. La deuxième résonance est seulement légèrement modifiée par la présence du système main-bras sur la poutre. En revanche, les antirésonances de la poutre ne sont pas affectées par le système main-bras. Ceci est cohérent compte tenu du montage expérimental. En effet, les perturbations sont appliquées par l'intermédiaire de la poutre et le système main-bras ne peut être excité à ces fréquences d'antirésonance car la poutre ne bouge plus.

On constate que, quel que soit l'axe considéré, l'influence du système main-bras sur la poutre n'est pas la même pour les quatre forces de poussée. Pour les deux axes, plus la force de poussée augmente, plus l'influence de la main sur le comportement dynamique de la poutre est importante. Ceci montre l'importance de contrôler la posture et la force de poussée, quel que soit l'axe considéré, afin d'obtenir des prédictions fiables lorsque l'on utilise une méthode de sous-structuration avec le système main-bras.

La force de poussée exercée par le sujet étant selon l'axe vertical z seulement, on constate d'après ces deux figures que l'influence de la main sur le comportement dynamique de la poutre est plus importante selon l'axe vertical z . Néanmoins, malgré une absence de force de poussée statique selon l'axe horizontal x , il existe une variation du comportement dynamique de la poutre en fonction de la force de poussée exercée par la main selon l'axe z . Étant donné la présence de la main sur la poutre, il existe nécessairement une force dynamique suivant x au point de contact. Cette force dynamique suivant x varie en fonction de la force de poussée exercée selon l'axe vertical z faisant ainsi varier l'influence de la main sur la poutre suivant l'axe x .

Si l'on compare l'influence de la main sur la poutre pour les quatre forces de poussée entre le cas d'étude uniaxial (figure 3-8) et le cas d'étude bi-axial (figure 3-13), on constate que la main possède une influence similaire sur le comportement dynamique de la poutre suivant l'axe vertical z .

3.2.5 Validation

Pour chacun des axes considérés, le couplage par sous-structuration en impédance entre la poutre et le système main-bras est réalisé en utilisant l'équation (3.16). Selon l'axe horizontal x , la FRF expérimentale de la poutre seule est couplée avec chacune des FRFs expérimentales décrivant les caractéristiques dynamiques du système main-bras pour une posture spécifique et les quatre forces de poussée. Le même processus est également réalisé concernant l'axe vertical z en utilisant les FRFs expérimentales correspondantes. Les résultats de prédictions du comportement dynamique du système couplé (main sur poutre) sont comparés aux mesures expérimentales effectuées sur l'assemblage avec la même posture et les mêmes forces de poussée selon les deux axes. Les figures suivantes comparent les prédictions de couplage avec les mesures expérimentales effectuées sur l'assemblage pour les quatre forces de poussée en accélération. Le comportement dynamique de la poutre seule est indiqué en traits pointillés fins afin de mettre en évidence l'influence de la main sur la poutre.

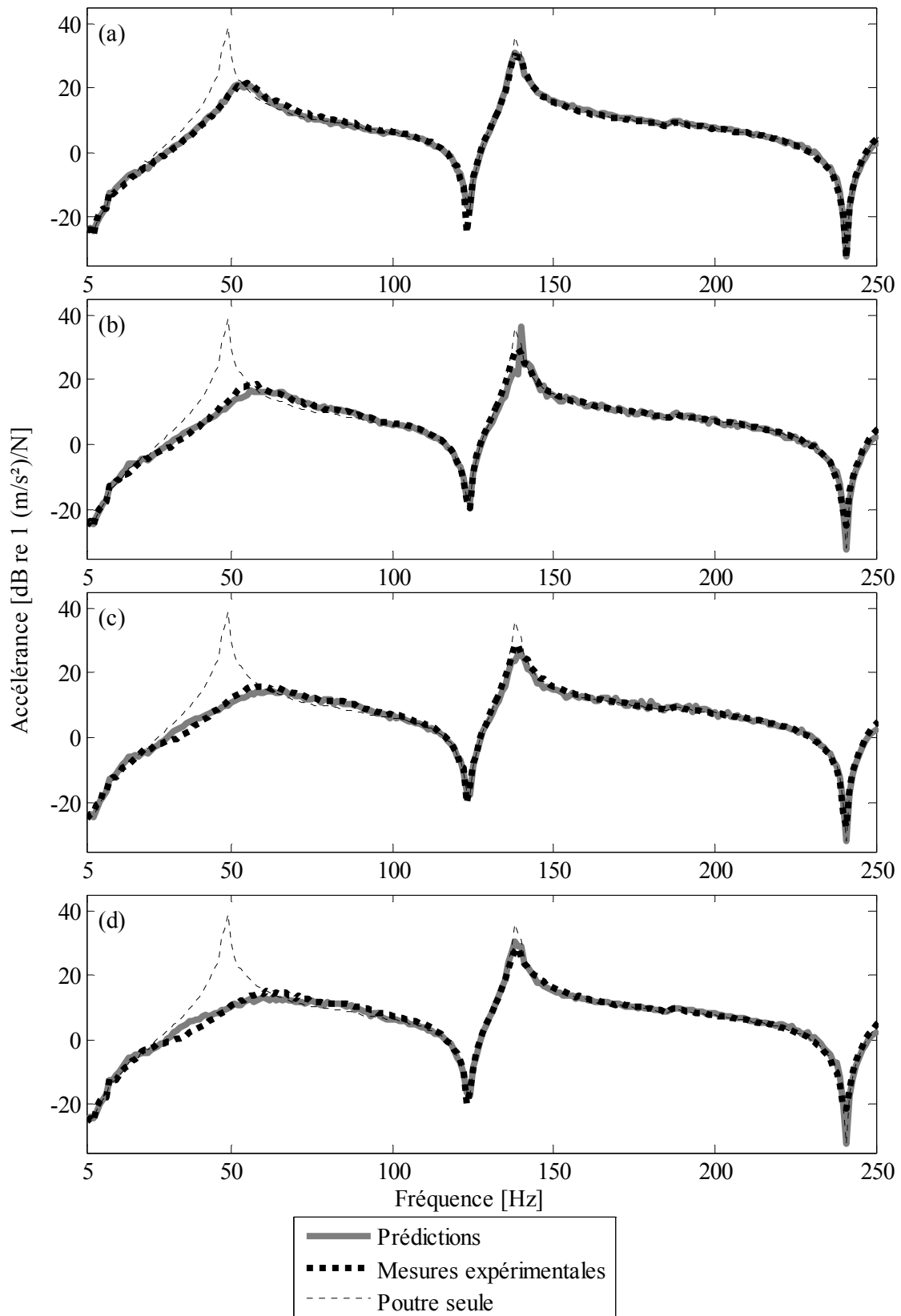


Figure 3-14 : Prédications de couplage de la main sur la poutre comparées aux mesures expérimentales pour quatre forces de poussée selon l'axe horizontal x (a: 20 N, b: 30 N, c: 40 N et d: 50 N)

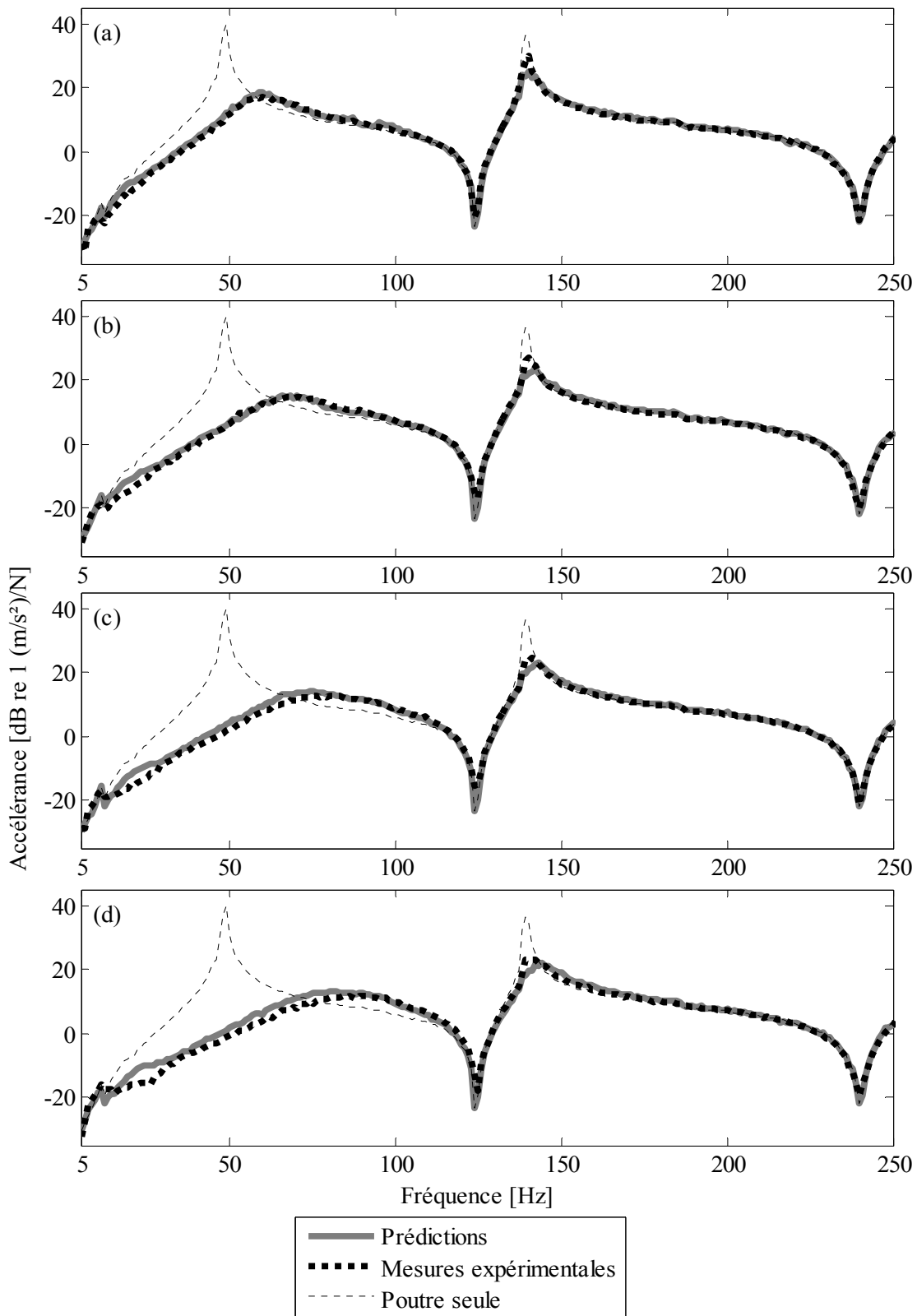


Figure 3-15 : Prédications de couplage de la main sur la poutre comparées aux mesures expérimentales pour quatre forces de poussée selon l'axe vertical z (a: 20 N, b: 30 N, c: 40 N et d: 50 N)

Les résultats de la figure 3-14 et de la figure 3-15 montrent la comparaison entre prédictions du comportement dynamique de l'assemblage main – poutre par sous-structuration et mesures expérimentales. On constate sur la figure 3-14, correspondante à l'axe horizontal x , un léger décalage entre prédictions et mesures expérimentales pour les forces de poussée de 40 et 50 N aux alentours de 35 Hz et 60 Hz. De la même manière sur la figure 3-15, correspondante à l'axe vertical z , on constate une légère surestimation de la part des prédictions sur la plage de fréquences [15 ; 75] Hz pour les forces de poussée de 40 et 50 N. On pense que ces écarts proviennent d'un biais lors de la mesure et du contrôle de la force de poussée exercée par le sujet. Il est important de contrôler avec justesse la force de poussée appliquée par le système main-bras. À défaut de précision dans les mesures, les prédictions par sous-structuration correspondantes risquent de perdre en fiabilité.

Cette approche par sous-structuration montre néanmoins qu'il est possible de prédire le comportement dynamique d'un assemblage comprenant une main selon plusieurs axes. Après avoir démontré la possibilité de réalisation d'un couplage mécanique selon un axe, ce nouveau cas d'étude démontre que plusieurs axes peuvent être pris en considération lors du couplage par impédance entre une poutre droite et le système main-bras. En effet, le modèle de couplage permet de prédire l'influence du système main-bras sur le comportement dynamique de la poutre pour les deux axes considérés dans cette étude.

La démonstration effectuée dans ce cas d'étude utilisait une méthode de couplage par impédance avec une main, une posture, deux axes et quatre forces de poussée. Le cas d'étude suivante propose d'étudier les interactions main – structure dans un contexte qui se rapproche de celui du cyclisme.

3.3 Cas d'étude no 3 : Couplage hybride entre une structure représentant un cockpit de vélo et les mains du cycliste

Les deux cas d'étude précédents ont permis de présenter la méthode de couplage par formulation en impédance. Ce dernier cas d'étude propose d'utiliser une méthode différente de sous-structuration pour réaliser un couplage uniaxial. Cette méthode utilise une formulation en mobilité et porte le nom de méthode FBS (Frequency-Based Substructuring). Une originalité est présentée dans cette étude. Le couplage est réalisé de manière hybride; c'est-à-dire en combinant des résultats issus de caractérisations numériques avec des résultats expérimentaux. Ce dernier cas d'étude a pour objectifs propres de démontrer que (1) l'approche combinant la réponse biodynamique et la sous-structuration n'est pas restrictive en termes de méthodes de couplage et (2) le couplage par sous-structuration est possible de manière hybride.

Le couplage présenté dans cette section propose de se rapprocher d'un contexte cycliste. En effet, une structure simple représentant le cockpit d'un vélo est couplée avec les deux mains du cycliste dans un contexte d'excitation verticale par la base. On appelle cockpit l'ensemble composé du cintre et de la potence. Trois postures cyclistes distinctes sont analysées.

Dans un premier temps, le développement mathématique des équations propres à l'utilisation de cette méthode FBS en mobilité est proposé. Ensuite, les mesures expérimentales pour chacune des postures sont présentées ainsi que les méthodes de caractérisation du comportement dynamique de chacune des structures. Pour finir, les résultats de prédiction de couplage par sous-structuration sont comparés avec les mesures expérimentales réalisées sur l'assemblage pour chacune des configurations.

3.3.1 Formulation des équations de couplage

Tout comme la formulation en impédance, il est possible de prédire le comportement d'un assemblage composé de sous-structures par caractérisation dynamique de ces sous-structures séparément en utilisant la mobilité (formulation FBS).

La formulation FBS permet d'assembler des structures par caractérisation de celles-ci en conditions libre – libre avec une excitation en termes de force et une réponse en déplacement (formulation en compliance), vitesse (formulation en mobilité) ou accélération (formulation en accélération). Par soucis de constance avec la formulation originale (Jetmundsen, 1986), la formulation est présentée ici sous forme de mobilité; c'est-à-dire par caractérisation en force et en vitesse.

Considérons deux structures « a » et « b » couplées pour former un assemblage « ab » tel que présenté précédemment sur la figure 3-1. Ces deux structures peuvent être décrites de manière indépendante par une formulation en mobilité. Si l'on considère le comportement dynamique de chaque structure séparément, il est possible d'écrire l'équation suivante pour la sous-structure « a » :

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{V}_A^a(\omega) \\ \mathbf{V}_I^a(\omega) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{AA}^a(\omega) & \mathbf{Y}_{AI}^a(\omega) \\ \mathbf{Y}_{IA}^a(\omega) & \mathbf{Y}_{II}^a(\omega) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_A^a(\omega) \\ \mathbf{F}_I^a(\omega) \end{Bmatrix} \quad (3.17)$$

Où $\mathbf{Y}_{AI}^a(\omega)$ est une caractérisation en mobilité de la sous-structure « a ». La première lettre A décrit la localisation de réponse en vitesse et la seconde lettre I décrit la localisation de la force d'excitation.

De manière générale, lors d'une caractérisation en mobilité, la structure est en conditions libres. L'excitation en force prend place alternativement pour l'ensemble des points afin de caractériser la vitesse de réponse pour l'ensemble des points d'intérêt et ainsi obtenir les termes nécessaires à l'obtention de la matrice de mobilité.

Pour la sous-structure « b », il est possible d'écrire l'équation suivante :

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{V}_I^b(\omega) \\ \mathbf{V}_B^b(\omega) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{II}^b(\omega) & \mathbf{Y}_{IB}^b(\omega) \\ \mathbf{Y}_{BI}^b(\omega) & \mathbf{Y}_{BB}^b(\omega) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_I^b(\omega) \\ \mathbf{F}_B^b(\omega) \end{Bmatrix} \quad (3.18)$$

De manière similaire, il est possible d'écrire une formulation en mobilité pour la matrice des FRFs du système complet « ab » :

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{V}_A^{\text{ab}}(\omega) \\ \mathbf{V}_I^{\text{ab}}(\omega) \\ \mathbf{V}_B^{\text{ab}}(\omega) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{AA}^{\text{ab}}(\omega) & \mathbf{Y}_{AI}^{\text{ab}}(\omega) & \mathbf{Y}_{AB}^{\text{ab}}(\omega) \\ \mathbf{Y}_{IA}^{\text{ab}}(\omega) & \mathbf{Y}_{II}^{\text{ab}}(\omega) & \mathbf{Y}_{IB}^{\text{ab}}(\omega) \\ \mathbf{Y}_{BA}^{\text{ab}}(\omega) & \mathbf{Y}_{BI}^{\text{ab}}(\omega) & \mathbf{Y}_{BB}^{\text{ab}}(\omega) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_A^{\text{ab}}(\omega) \\ \mathbf{F}_I^{\text{ab}}(\omega) \\ \mathbf{F}_B^{\text{ab}}(\omega) \end{Bmatrix} \quad (3.19)$$

Par une application des conditions d'équilibre des forces et de continuité des vitesses à l'interface entre les deux sous-structures, il est possible d'obtenir une formulation en mobilité de la matrice de FRFs du système couplé « ab » en fonction de la caractérisation en mobilité de chaque sous-structure séparément. Pour alléger la présentation, la dépendance fréquentielle (ω) des différents termes n'est pas écrite dans les équations suivantes.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{AA} & \mathbf{Y}_{AI} & \mathbf{Y}_{AB} \\ \mathbf{Y}_{IA} & \mathbf{Y}_{II} & \mathbf{Y}_{IB} \\ \mathbf{Y}_{BA} & \mathbf{Y}_{BI} & \mathbf{Y}_{BB} \end{bmatrix}^{\text{ab}} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{AA}^{\text{a}} & \mathbf{Y}_{AI}^{\text{a}} & 0 \\ \mathbf{Y}_{IA}^{\text{a}} & \mathbf{Y}_{II}^{\text{a}} & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{Y}_{BB}^{\text{b}} \end{bmatrix} - \begin{Bmatrix} \mathbf{Y}_{AI}^{\text{a}} \\ \mathbf{Y}_{II}^{\text{a}} \\ -\mathbf{Y}_{BI}^{\text{b}} \end{Bmatrix} \left[\mathbf{Y}_{II}^{\text{a}} + \mathbf{Y}_{II}^{\text{b}} \right]^{-1} \begin{Bmatrix} \mathbf{Y}_{AI}^{\text{a}} \\ \mathbf{Y}_{II}^{\text{a}} \\ -\mathbf{Y}_{BI}^{\text{b}} \end{Bmatrix}^{\text{T}} \quad (3.20)$$

Tout comme pour la formulation en impédance, l'équation (3.20) peut être simplifiée afin d'éliminer l'ensemble B et garder uniquement l'ensemble d'interface I pour la sous-structure « b » :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{AA} & \mathbf{Y}_{AI} \\ \mathbf{Y}_{IA} & \mathbf{Y}_{II} \end{bmatrix}^{\text{ab}} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{AA}^{\text{a}} & \mathbf{Y}_{AI}^{\text{a}} \\ \mathbf{Y}_{IA}^{\text{a}} & \mathbf{Y}_{II}^{\text{a}} \end{bmatrix} - \begin{Bmatrix} \mathbf{Y}_{AI}^{\text{a}} \\ \mathbf{Y}_{II}^{\text{a}} \end{Bmatrix} \left[\mathbf{Y}_{II}^{\text{a}} + \mathbf{Y}_{II}^{\text{b}} \right]^{-1} \begin{Bmatrix} \mathbf{Y}_{AI}^{\text{a}} \\ \mathbf{Y}_{II}^{\text{a}} \end{Bmatrix}^{\text{T}} \quad (3.21)$$

L'équation (3.21) est une formulation généralisée en mobilité de l'approche permettant de coupler une structure mécanique avec le corps humain par sous-structuration. Chaque terme est une matrice et il peut y avoir autant de degrés de liberté que nécessaire.

Dans notre cas d'étude, une structure simple d'aluminium représentant un cockpit de vélo est couplée avec les deux mains du cycliste dans un contexte d'excitation par la base selon la direction verticale z . La sous-structure « a » est la structure représentant le cockpit de vélo. L'ensemble A est alors l'endroit où se produit l'excitation par la base et l'ensemble d'interface I contient deux points correspondants aux points de contact avec les deux mains du cycliste (figure 3-16). Par conséquent, l'élément que l'on souhaite prédire à l'aide d'une méthode de

sous-structuration est la caractérisation aux deux points d'interface avec les mains (ensemble I) en fonction de l'excitation par la base (ensemble A).

La formulation généralisée (3.21) peut être reformulée pour décrire spécifiquement le cas d'étude proposé ici.

$$[\mathbf{Y}_{IA}^{ab}] = [\mathbf{Y}_{IA}^a] - [\mathbf{Y}_{II}^a][\mathbf{Y}_{II}^a + \mathbf{Y}_{II}^b]^{-1}[\mathbf{Y}_{IA}^a] \quad (3.22)$$

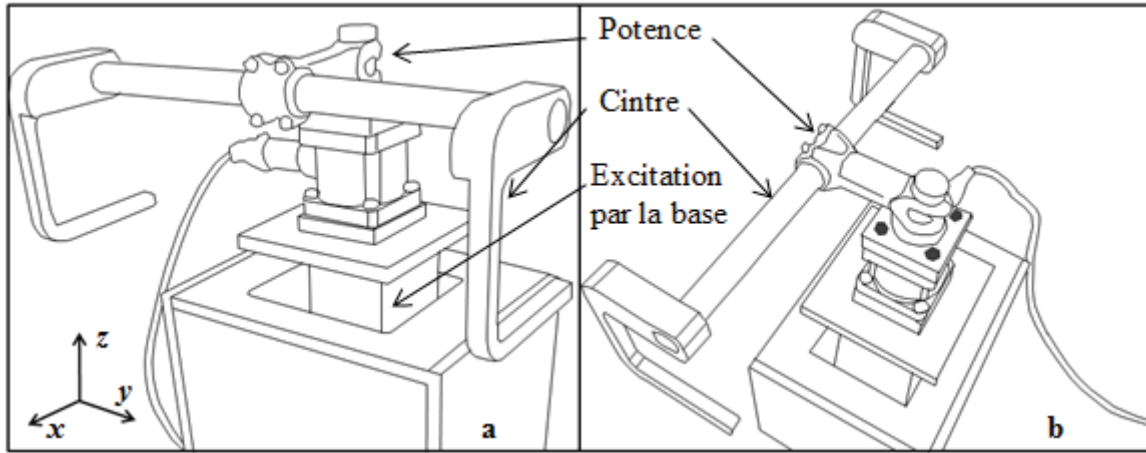


Figure 3-16 : Structure mécanique représentant le cockpit de vélo installé sur le dispositif d'excitation par la base (a: Vue de face ; b: Vue de dessus)

L'équation (3.22) décrit la matrice de mobilité mécanique déterminée par une force d'excitation appliquée dans l'ensemble A pour l'assemblage « ab » en fonction des caractérisations en mobilité de chacune des sous-structures séparément. Elle peut être développée pour révéler les points d'interface avec la main gauche $I1$ et la main droite $I2$.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{I1A}^{ab} \\ \mathbf{Y}_{I2A}^{ab} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{I1A}^a \\ \mathbf{Y}_{I2A}^a \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{I1I1}^a & \mathbf{Y}_{I1I2}^a \\ \mathbf{Y}_{I2I1}^a & \mathbf{Y}_{I2I2}^a \end{bmatrix} \left[\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{I1I1}^a & \mathbf{Y}_{I1I2}^a \\ \mathbf{Y}_{I2I1}^a & \mathbf{Y}_{I2I2}^a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{I1I1}^b & \mathbf{Y}_{I1I2}^b \\ \mathbf{Y}_{I2I1}^b & \mathbf{Y}_{I2I2}^b \end{bmatrix} \right]^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{I1A}^a \\ \mathbf{Y}_{I2A}^a \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

De plus, la main gauche et la main droite sont dynamiquement indépendantes. Lorsqu'une main est soumise à une sollicitation vibratoire, l'autre main ne vibre pas. On fait donc l'hypothèse qu'il n'existe aucune interaction entre les deux mains du cycliste.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{I1A}^{ab} \\ \mathbf{Y}_{I2A}^{ab} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{I1A}^a \\ \mathbf{Y}_{I2A}^a \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{I1I1}^a & \mathbf{Y}_{I1I2}^a \\ \mathbf{Y}_{I2I1}^a & \mathbf{Y}_{I2I2}^a \end{bmatrix} \left[\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{I1I1}^a & \mathbf{Y}_{I1I2}^a \\ \mathbf{Y}_{I2I1}^a & \mathbf{Y}_{I2I2}^a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{I1I1}^b & 0 \\ 0 & \mathbf{Y}_{I2I2}^b \end{bmatrix} \right]^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{I1A}^a \\ \mathbf{Y}_{I2A}^a \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

L'équation (3.24) décrit la formulation FBS dans le cas d'une excitation par la base au sein de l'ensemble A avec une réponse aux points de contact $I1$ et $I2$ sur l'assemblage « ab ». Trois postures cyclistes distinctes sont analysées en termes de couplage lors de cette excitation de type vertical.

3.3.2 Mesures expérimentales sur assemblage pour diverses postures

Ces mesures expérimentales réalisées sur l'assemblage sont utilisées pour évaluer la précision des prédictions obtenues pour la structure mécanique couplée avec les deux mains en utilisant la méthode FBS (Équation (3.24)). La structure mécanique représentant le cockpit est composée d'un cintre, d'une potence et d'un support. Le dispositif d'excitation est un système d'excitation hydraulique capable de supporter des chargements importants et conçu pour produire une excitation verticale. L'excitation ayant lieu suivant l'axe vertical z , la réponse est également mesurée selon l'axe z . Ainsi, les mesures expérimentales sur l'assemblage « ab » sont effectuées selon l'axe vertical z afin de déterminer les termes \mathbf{Y}_{I1zAz}^{ab} et \mathbf{Y}_{I2zAz}^{ab} .

Afin d'obtenir la mobilité de l'assemblage (structure avec mains), l'excitation est caractérisée en utilisant un capteur de forces/moments 6D (AMTI MC3-6-500) installé entre le système d'excitation et le support et permettant de mesurer les six degrés de liberté. Des accéléromètres sont fixés sur le cintre au plus proche des mains. La vitesse est obtenue par intégration de l'accélération dans le domaine fréquentiel. Un signal vibratoire reproduisant les caractéristiques dynamiques d'une route est fourni au système d'excitation (Lépine *et al.*, 2013a). Le système d'acquisition est le LMS SCADAS Mobile géré par le logiciel Test.Lab 12A. Pour ce cas d'étude, seuls les résultats concernant l'axe vertical z sont présentés. La figure suivante illustre la structure installée sur le dispositif d'excitation utilisé pour recueillir les mesures sur l'assemblage.

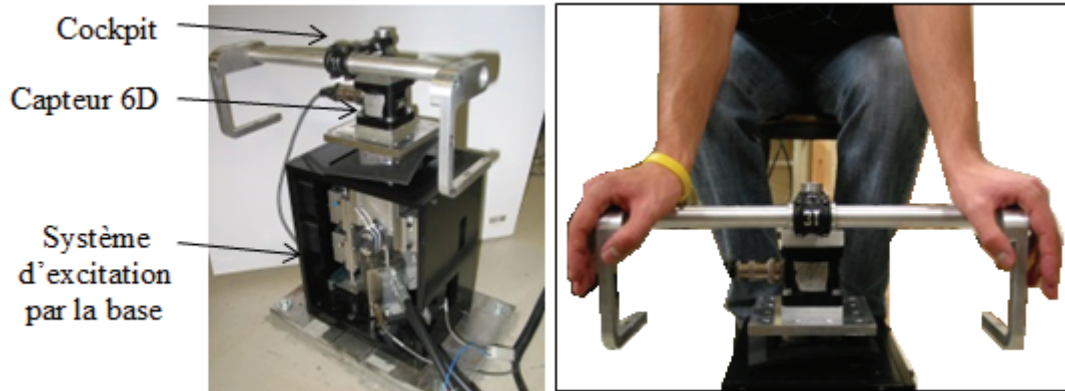


Figure 3-17 : Cockpit avec le capteur AMTI 6D installés sur le dispositif d'excitation par la base (Gauche) et assemblage au complet avec les mains du cycliste (Droite)

Trois postures différentes du système main-bras sont testées (figure 3-18). Chacune d'entre elles requiert que les bras soient maintenus tendus. Pour chaque posture, il est demandé au sujet de tenir le cintre sans appliquer aucune force de préhension en se déposant simplement sur la structure. Les forces de poussée appliquées par le sujet sur la structure selon les axes x et z sont mesurées à l'aide du capteur AMTI 6D afin de contrôler la posture pendant l'acquisition des données. Il est demandé au sujet de maintenir ces forces de poussée constantes pendant les tests en utilisant les valeurs DC affichées par le capteur AMTI 6D selon les axes x et z . Pour chaque posture, les forces de poussée appliquées selon x et selon z sont enregistrées pour une utilisation ultérieure lors des mesures de caractérisation des systèmes mains-bras droit et gauche.

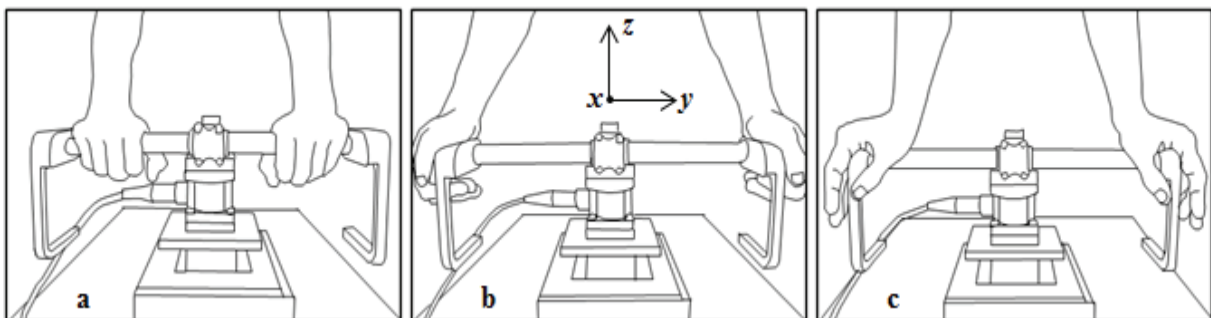


Figure 3-18 : Trois postures de tests pour les mains sur le cockpit
 Posture a) avec valeurs de forces statiques de 10 N suivant x et -70 N suivant z
 Posture b) avec valeurs de forces statiques de 15 N suivant x et -85 N suivant z
 Posture c) avec valeurs de forces statiques de 25 N suivant x et -105 N suivant z

3.3.3 Caractérisation du système main-bras

Dans l'équation (3.24) de couplage entre le cockpit et les mains selon la formulation FBS, $\mathbf{Y}_{1/1}^b$ correspond à la matrice de mobilité du système main-bras gauche et $\mathbf{Y}_{2/2}^b$ correspond à la matrice de mobilité du système main-bras droit. De ces deux matrices, seuls les termes correspondants à une excitation et une réponse selon l'axe z sont conservés.

Lors d'une caractérisation en impédance, la structure est sollicitée en vitesse en un point et doit être bloquée aux autres points d'intérêt. Ceci permet de mesurer la force de réaction. Lors d'une caractérisation en mobilité, la structure est sollicitée en force en un point et doit être en condition libre – libre (dite aussi condition suspendue). Ceci permet de mesurer la réponse en vitesse aux autres points d'intérêt. Il faut donc considérer deux éléments importants lors d'une caractérisation dynamique; les points d'intérêt et les conditions de maintien de la structure.

Dans le cas du système main-bras couplé avec une structure mécanique, le seul point d'intérêt est le point d'interface. Concernant les conditions de caractérisation, le fait que l'humain soit en condition libre – libre, en position assise ou debout les deux pieds posés sur le sol ne changent aucunement la réponse dynamique du système main-bras. Ceci est vrai car l'humain est une structure particulièrement amortie qui dissipe les vibrations transmises à travers le corps. Les vibrations transmises au niveau de la main ne se rendent donc pas jusqu'aux pieds, ni même aux fesses. Ainsi, que ce soit pour une caractérisation en impédance ou en mobilité, les deux seuls éléments importants à considérer dans le cas du système main-bras sont la force et la vitesse au point d'interface.

La caractérisation du système main-bras est effectuée au point d'excitation selon l'axe vertical z en mesurant la force et la vitesse. Typiquement, les caractéristiques dynamiques du système main-bras sont présentées sous la forme d'impédance mécanique. Dans ce cas d'étude, le système main-bras doit être caractérisé sous forme de mobilité au point d'excitation. On obtient la mobilité du système main-bras en faisant le ratio entre la vitesse et la force au point d'interface. La caractérisation étant uniaxiale et effectuée au point d'excitation, on obtiendrait l'impédance équivalente du système main-bras en faisant le ratio entre la force et la vitesse.

La mobilité mécanique du système main-bras est obtenue en utilisant deux poignées de mesures spécialement conçues pour reproduire les surfaces de contact des mains avec le cintre lors des différentes postures étudiées. L'une des poignées possède un corps cylindrique et l'autre un corps cubique reproduisant le plus possible les formes des surfaces de contact avec le cintre (figure 3-19).

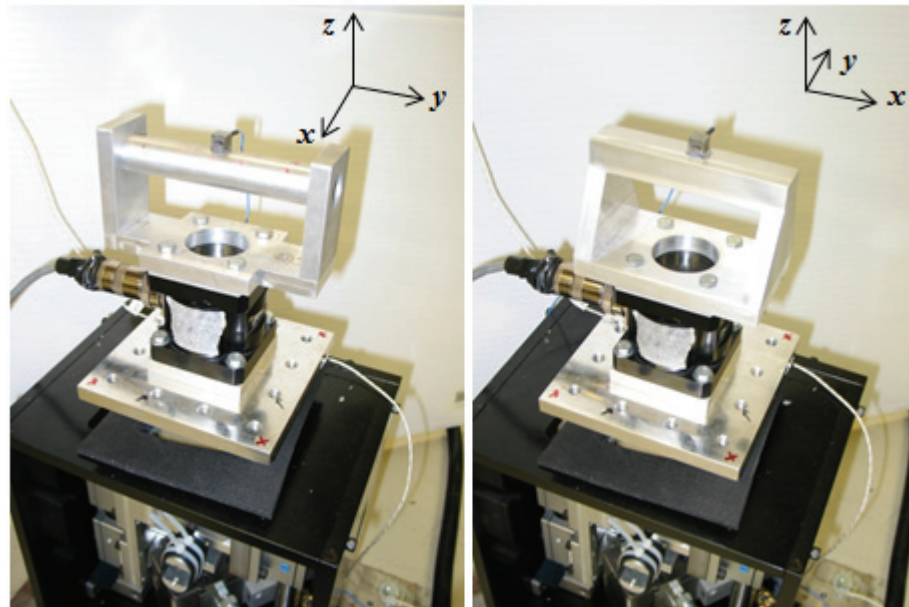


Figure 3-19 : Poignées de mesures de l'impédance du système main-bras (Gauche : Poignée avec corps cylindrique pour posture a ; Droite : Poignée avec corps cubique pour postures b et c)

Pour chaque mesure, la poignée est équipée d'un accéléromètre et est montée sur le capteur AMTI 6D. Cet ensemble est installé sur le dispositif d'excitation par la base. Les caractéristiques dynamiques de la route sont fournies au système d'excitation à l'aide du générateur de signal inclus dans le système LMS. Le dispositif de mesure de la réponse du système main-bras s'apparente à celui présenté sur la figure 3-5 en remplaçant le pot vibrant par le dispositif d'excitation par la base.

Tout comme il a été mentionné dans la section 3.1.4 lors des mesures du système main-bras pour le couplage uniaxial avec la poutre, les poignées sont rigides sur la bande de fréquences considérée. Il est possible de soustraire directement l'impédance des poignées à l'impédance totale (main sur poignée) pour obtenir l'impédance mécanique du système main-bras. Les mesures sont alors réalisées avec et sans main sur les poignées. Les données d'impédance

uniaxiale peuvent ensuite être inversées pour obtenir la mobilité du système main-bras et être utilisées directement dans l'équation (3.24).

L'étude est menée sur un seul sujet afin d'éviter toute variabilité inter-individus. Lors des mesures, il est demandé au sujet de se déposer sur la structure sans appliquer aucune force de préhension et de se positionner dans les mêmes postures que celles utilisées lors des mesures sur le cockpit. Une fois la posture correctement établie, il lui est demandé de contrôler les forces de poussée selon l'axe x et l'axe z à l'aide de l'afficheur du capteur AMTI 6D. Puisque chaque main est mesurée séparément, on impose que les forces de poussée appliquée selon l'axe x et l'axe z soient la moitié de celles mesurées sur le cockpit avec les deux mains. La figure suivante illustre les mesures d'impédance pour les deux mains reproduisant la posture c.

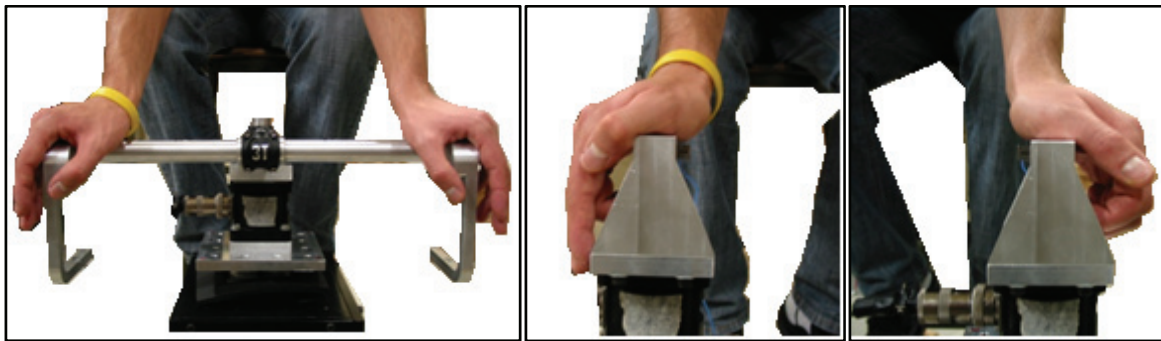


Figure 3-20 : Mains sur le cockpit selon la posture c (Gauche) et reproduction de cette posture pour les mesures d'impédance de chaque main séparément (Droite)

3.3.4 La structure mécanique représentant un cockpit de vélo

Concernant la structure mécanique en aluminium composée d'un cintre, d'une potence et d'un support, les FRFs nécessaires au processus de couplage utilisant la formulation FBS sont obtenues numériquement à l'aide d'un modèle éléments finis (FRFs EF). De ce fait, les degrés de liberté de translation ainsi que les degrés de liberté de rotation sont intrinsèquement disponibles. Ce modèle EF a préalablement été recalé par comparaison avec des FRFs expérimentales mesurées en divers endroits sur le cockpit en conditions libre – libre. La validation du modèle numérique a été effectuée sur la base d'une comparaison de modes par analyse modale également en conditions libre – libre.

Pour caractériser la structure mécanique « a » dans l'équation (3.24), les FRFs EF sont obtenues à l'aide de la section « Réponse harmonique » du logiciel ANSYS 14 Workbench. La résolution fréquentielle de chacune des réponses harmoniques de la structure est de 1 Hz sur une plage de fréquences allant de 1 à 100 Hz. Compte tenu que trois postures différentes sont étudiées, l'information requise en termes de points sur la structure n'est pas identique pour chaque configuration. La figure suivante illustre la localisation des points d'intérêt à l'interface entre la structure et les mains pour chacune des postures.

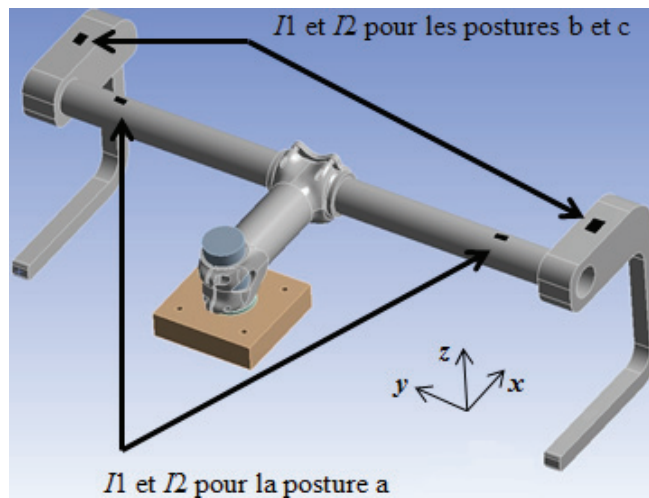


Figure 3-21 : Localisation des points d'intérêt sur le modèle EF du cockpit pour les différentes postures

3.3.5 Comparaison entre mesures expérimentales sur les structures couplées et prédictions de couplage hybride

Dans Matlab, les FRFs EF de la structure mécanique « a » sont couplées aux FRFs expérimentales des deux systèmes mains-bras droit et gauche « b » afin d'obtenir une prédiction FBS pour chaque posture.

Les prédictions FBS pour les mains couplées avec la structure mécanique selon les trois postures testées sont comparées aux mesures expérimentales réalisées directement sur l'assemblage lorsque les mains étaient posées sur le cintre avec les mêmes postures et les mêmes forces de poussée. Les comparaisons sont présentées sous forme de mobilité selon l'axe z obtenue au point d'interface $I2$ correspondant à la main droite (figure 3-22 à figure 3-24). L'échelle utilisée est une échelle en décibels. Afin d'observer l'influence des mains sur la structure mécanique, le comportement dynamique de la structure seule est également présenté sur ces figures.

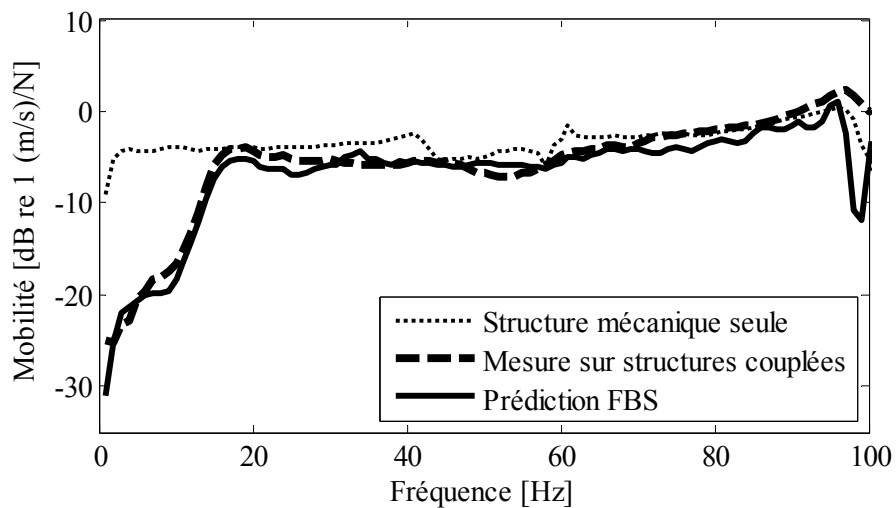


Figure 3-22 : Comparaison entre mesure sur structures couplées (mains sur structure mécanique) et prédiction de couplage utilisant la formulation FBS pour la posture a

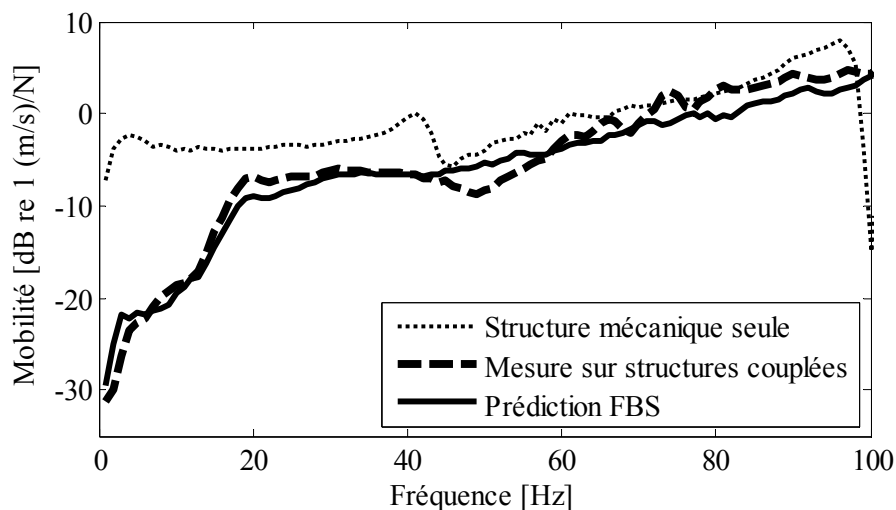


Figure 3-23 : Comparaison entre mesure sur structures couplées (mains sur structure mécanique) et prédiction de couplage utilisant la formulation FBS pour la posture b

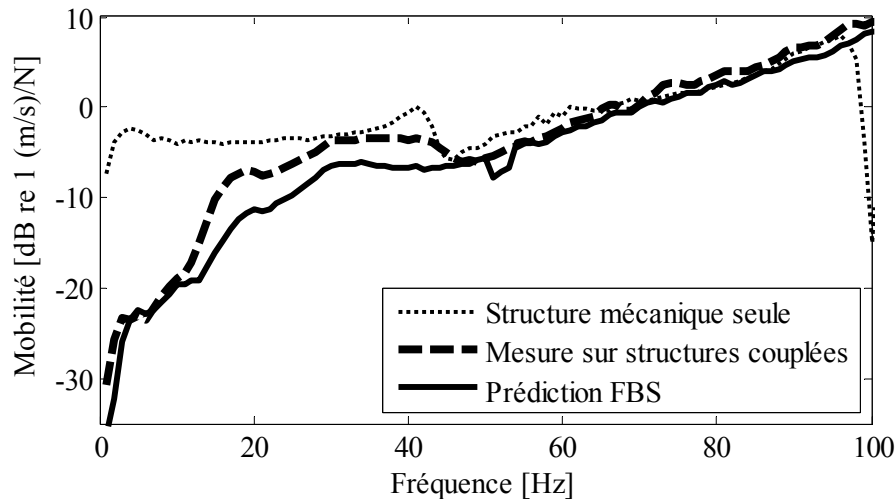


Figure 3-24 : Comparaison entre mesure sur structures couplées (mains sur structure mécanique) et prédiction de couplage utilisant la formulation FBS pour la posture c

Les résultats de la figure 3-22 montrent que les mains en posture « a » ont une influence sur le comportement dynamique de la structure relativement importante avant 18 Hz. Au-dessus de 18 Hz, l'influence des mains sur le comportement dynamique de la structure mécanique est minime voire inexistante. Les résultats de la figure 3-22 montrent également que des écarts de quelques décibels existent entre la mesure sur structures couplées et la prédiction FBS correspondante.

Les résultats de la figure 3-23 montrent que les mains en posture « b » ont une influence sur le comportement dynamique de la structure relativement importante jusqu'à 45 Hz. Au-delà de 45 Hz, l'influence des mains sur le comportement dynamique de la structure mécanique est plus minime. Ces résultats montrent également que des écarts de quelques décibels existent entre la mesure sur structures couplées et la prédiction FBS, notamment aux alentours de 20 Hz et au-dessus de 50 Hz.

Les résultats de la figure 3-24 montrent que les mains en posture « c » ont une influence sur le comportement dynamique de la structure qui est relativement importante jusqu'à 30 Hz. Après 30 Hz, l'influence des mains sur le comportement dynamique de la structure mécanique est plus minime. Cette fois-ci, des écarts de l'ordre de 5 dB en mobilité sont observés entre 15 et 45 Hz.

Cette formulation en mobilité nécessite la réalisation d'une inversion matricielle afin de prédire le comportement dynamique de l'assemblage. De faibles erreurs de caractérisation des deux structures séparément ont alors pu être amplifiées par cette inversion. Ceci explique en partie les écarts observés sur chacune des figures. Néanmoins, concernant la posture « a » et la posture « b », la tendance de la prédiction est bonne. Le couplage FBS prédit l'influence des mains en postures « a » et « b » sur le comportement dynamique du cockpit avec quelques légères disparités comparées aux mesures sur l'assemblage dans les postures correspondantes.

Pour la posture « c » (figure 3-24), la prédiction FBS surestime l'influence des mains sur le comportement dynamique de l'assemblage « mains – structure mécanique ». Ceci pourrait s'expliquer par une mauvaise considération de la surface de contact entre chaque main et la structure mécanique. Dans la formulation du couplage FBS, le contact entre chaque main et la structure mécanique est un contact ponctuel (figure 3-21). La réponse biodynamique de chaque main est couplée ponctuellement à la structure mécanique. En réalité, il s'agit plutôt d'une surface de contact, voir même de plusieurs surfaces de contact dans le cas de cette posture (figure 3-20). Cette constatation permet certainement d'expliquer la surestimation de l'influence des mains sur le comportement dynamique de l'assemblage de la part du couplage FBS pour la posture « c ». Ces résultats indiquent donc que la surface de contact entre les deux structures doit être caractérisée de manière précise par rapport à la condition réelle au risque de voir se dégrader la fiabilité des prédictions obtenues.

Ce cas d'étude démontre qu'il est possible de prédire le comportement dynamique d'un assemblage comprenant deux mains à l'aide d'une méthode de sous-structuration de type FBS. Cette réalisation montre qu'il est possible de réaliser des couplages de manière hybride. D'après les résultats obtenus, la fiabilité d'un couplage hybride réside à la fois dans la fiabilité du modèle numérique mais surtout dans une considération appropriée de la surface de contact où les données numériques sont extraites.

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, l'approche de couplage par sous-structuration a été mise en œuvre avec la réponse biodynamique du système main-bras. Plusieurs cas d'étude ont été proposés. Deux méthodes ont été présentées : la méthode de couplage par impédance et la méthode FBS (Frequency-Based Substructuring). Dans chacun des cas, le développement mathématique des équations a été effectué. Ces différents cas d'étude ont permis de montrer que le couplage par sous-structuration entre le système main-bras et une structure mécanique est possible que ce soit expérimentalement ou de manière hybride, de manière uniaxiale ou bi-axiale, avec une ou deux mains et selon plusieurs postures distinctes.

La réalisation de ces différents couplages par sous-structuration a ainsi permis de répondre à l'objectif secondaire « Prédire le comportement dynamique d'un assemblage comprenant une main par sous-structuration ». L'ensemble de ces couplages montre les avantages liés à l'utilisation d'une méthode de couplage par sous-structuration :

- Combinaison de structures quand uniquement les données d'interface sont disponibles
- Calculs directs et relativement simples
- Réduction de la taille du modèle pour que seuls les degrés de liberté d'intérêt soient considérés
- Utilisation directe des données expérimentales obtenues par pot vibrant
- Utilisation hybride de données expérimentales et numériques (FRFs expérimentales et FRFs EF)

Les résultats montrent qu'il est important de contrôler plusieurs paramètres lors de la réalisation de couplages par sous-structuration avec le système main-bras car le comportement dynamique de celui-ci est sensible à plusieurs facteurs tels que la posture, la force de poussée, etc. Lors d'un couplage hybride, la fiabilité des prédictions obtenues dépend également d'une caractérisation adéquate de la surface de contact entre les deux structures ainsi que de la formulation mathématique associée.

L'utilisation de cette approche de couplage par sous-structuration avec le système main-bras est une première. Aucune étude n'avait réalisé de couplage par sous-structuration entre le système main-bras et une structure mécanique par le passé. Cette démonstration est donc une originalité du doctorat.

Les résultats issus de ce chapitre montrent que cette approche par sous-structuration semble adéquate afin de prédire le comportement dynamique d'un assemblage en postures cyclistes où la structure mécanique est en contact avec les deux mains. Le chapitre suivant propose d'étudier plus spécifiquement la réponse biodynamique du système main-bras, notamment en postures cyclistes pour plusieurs sujets.

4 RÉPONSE BIODYNAMIQUE DU SYSTÈME MAIN-BRAS

Après avoir démontré la possibilité de coupler le système main-bras avec une structure simple par sous-structuration, la réponse biodynamique du système main-bras de plusieurs sujets est mesurée afin de répondre à l'objectif secondaire « Mesurer la réponse biodynamique du système main-bras de plusieurs sujets afin d'évaluer la variabilité des réponses ».

Tout d'abord, un protocole de mesures est préalablement établi. Tel que présenté dans la revue de l'état de l'art, la réponse dynamique du système main-bras varie en fonction de certains paramètres. Lors des mesures de réponses biodynamiques du système main-bras de plusieurs sujets, un certain nombre de ces paramètres est fixé afin de correspondre au contexte du projet – la transmission des vibrations sur vélo de route.

Les réponses biodynamiques de dix sujets sont mesurées en utilisant ce protocole. Dans un premier temps, la réponse biodynamique du système main-bras de chaque sujet est mesurée selon deux postures dites « standards ». Ces postures sont appelées « standards » car ce sont les postures que l'on retrouve majoritairement dans la littérature sur le système main-bras. Dans un second temps, la réponse biodynamique du système main-bras de ces sujets est mesurée selon trois postures cyclistes.

Pour conclure ce chapitre, une analyse des réponses biodynamiques du système main-bras de ces sujets est effectuée. Une étude de variabilité des différentes réponses biodynamiques est présentée. Deux types de variabilité sont considérés ; l'intravariabilité, c'est-à-dire la variabilité existante parmi les réponses biodynamiques d'un même sujet, et l'intervariabilité, c'est-à-dire la variabilité de réponses biodynamiques entre sujets.

4.1 Les facteurs influençant la réponse du système main-bras

Dans le cadre de ce projet de doctorat, une des complexités majeures provient de la présence du cycliste. En effet, celui-ci peut positionner son corps de différentes manières sur le vélo. Cette différence de positionnement peut mener à des modifications du comportement dynamique de l'assemblage « vélo – cycliste ». D'un point de vue mécanique, le corps humain et plus particulièrement le système main-bras est difficile à étudier, analyser et modéliser. Plusieurs paramètres influencent le comportement dynamique du système main-bras. Dans ce projet, le système main-bras est étudié dans des configurations de types « cyclistes » permettant ainsi de fixer plusieurs paramètres.

La réponse biodynamique du système main-bras a déjà été investiguée par le passé. Cependant, des divergences existent entre auteurs et aucune étude n'a spécifiquement évalué la réponse du système main-bras dans un contexte cycliste. Ainsi, l'objectif ici est d'étudier la variabilité qui existe entre sujets quand certains de ces paramètres sont fixés pour correspondre à un contexte cycliste.

4.1.1 Dépendance en fonction de la fréquence et de l'excitation

Lorsqu'un cycliste roule sur son vélo de route, la plupart des vibrations sont verticales. En effet, des mesures accélérométriques sur route révèlent que deux axes principaux de vibration existent. Le premier axe est l'axe vertical et le second est l'axe horizontal antéro-postérieur. Ces mesures montrent que le ratio de vibration en accélération est d'environ un tiers entre l'axe vertical et l'axe horizontal antéro-postérieur (Lépine *et al.*, 2011, 2013a). En laboratoire à l'aide d'une méthode basée sur les fonctions de transfert, il est possible de reproduire le spectre d'accélération mesuré sur la route suivant l'axe vertical. Cependant, sur le banc de tests en laboratoire, le niveau d'accélération mesuré suivant l'axe horizontal est moindre que celui mesuré pour le même axe sur la route. En laboratoire, le ratio de vibration en accélération entre l'axe vertical et l'axe horizontal est d'environ un dixième (Lépine *et al.*, 2011, 2013a). Pour ces raisons, l'excitation utilisée est une excitation selon la direction

verticale lors des mesures de réponses biodynamiques du système main-bras. Le type d'excitation est une excitation aléatoire entre 5 et 150 Hz qui possède le même niveau d'accélération (RMS) que le signal mesuré lors des essais sur route au Mont-Orford. La route mesurée au Mont-Orford est une route de type granuleuse. Cette route est la route de référence qui est reproduite au sein du laboratoire VÉIUS pour tester les vélos selon une excitation verticale.

4.1.2 Postures du système main-bras et forces de contact

L'excitation et la plage de fréquences étant désormais fixées, certains paramètres tels que la posture et la force de poussée sont étudiés dans ce chapitre. Le système main-bras possédant un comportement non-linéaire, ces paramètres devront être contrôlés de manière rigoureuse afin d'obtenir des résultats fiables de variabilité entre sujets et non pas de variabilité en fonction de paramètres qui aurait pu fluctuer lors des mesures.

Les postures à l'étude sont décrites de manière détaillée dans les sections 4.2 et 4.3 correspondantes respectivement aux postures dites « standards » et aux postures « cyclistes ». Concernant les forces de contact, deux types de forces sont envisageables : la force de préhension et la force de poussée. La force de poussée étant également à l'étude dans ce chapitre, les différentes configurations de force de poussée sont décrites dans les sections 4.2 et 4.3. Cependant, aucune force de préhension n'est appliquée pendant les tests. Il existe deux raisons à cela. Premièrement, lorsqu'un cycliste roule sur son vélo ses mains sont déposées sur la structure la majeure partie du temps. La seconde est une raison technique. En effet, nos poignées de mesures ne sont pas équipées pour pouvoir mesurer la force de préhension. Étant donné que la force de préhension a une influence sur la réponse biodynamique du système main-bras et qu'il nous est impossible de la contrôler, il est préférable de n'appliquer aucune force de préhension lors des tests. Il est donc demandé aux sujets de déposer la main sur la poignée sans force de préhension et de contrôler leurs postures et les forces de poussées qu'ils appliquent.

4.1.3 Les paramètres morphologiques des différents sujets

Dans cette étude, dix sujets sont testés. Des formulaires de consentement ont été signés par chacun des sujets ayant participé à cette étude de mesures vibratoires du système main-bras.

La réponse biodynamique de leurs systèmes mains-bras droits est mesurée selon différentes configurations. Uniquement la main droite est mesurée lors des tests. La main gauche pourrait également être caractérisée pour évaluer les différences de réponses biodynamiques entre main droite et main gauche mais ce n'est pas l'objet de l'étude présentée ici.

Le tableau suivant présente les détails morphologiques de base de l'ensemble des sujets.

Tableau 4-1 : Détails morphologiques de base de chacun des sujets

Sujets	Taille (cm)	Masse (kg)
Sujet 1	193	84
Sujet 2	182	107
Sujet 3	183	78
Sujet 4	173	73
Sujet 5	180	94
Sujet 6	178	70
Sujet 7	176	73
Sujet 8	180	70
Sujet 9	189	84
Sujet 10	176	59

4.2 Le système main-bras en postures « standards »

Les deux postures présentées dans cette section (figure 4-1) sont appelées « standards » car elles correspondent à deux postures étudiées par les chercheurs lors d'investigations sur la réponse biodynamique du système main-bras. Ces deux postures « standards » sont préliminaires à l'étude de la réponse du système main-bras en postures « cyclistes ». Il a été ainsi possible de se familiariser avec la réponse biodynamique du système main-bras et sa variabilité.



Figure 4-1 : Visualisation des deux postures « standards »

4.2.1 Les différentes configurations de mesures

Pour les deux postures « standards », le bras est en complète extension (bras tendu) et le poignet, le coude et l'épaule sont parfaitement alignés et en position neutre; c'est-à-dire qu'il n'y a pas de torsion ni de rotation de ces différentes parties du système main-bras.

L'excitation lors de ces tests est une excitation verticale. D'après les coordonnées du système main-bras présentées précédemment (figure 2-9), cette excitation verticale correspond à deux coordonnées distinctes d'excitation du système main-bras au niveau de la main. Une excitation verticale pour la posture « standard a » correspond à une excitation du système main-bras selon la coordonnée z_h . Une excitation verticale pour la posture « standard b » correspond à une excitation du système main-bras selon la coordonnée x_h .

4.2.2 Le protocole de réalisation des mesures

La procédure permettant d'extraire la réponse biodynamique du système main-bras provenant des mesures avec poignée instrumentée est identique à celle précédemment décrite dans le chapitre 3 : PRÉDICTION DU COMPORTEMENT VIBRATOIRE D'UNE STRUCTURE COUPLÉE AU SYSTÈME MAIN-BRAS.

La même poignée cylindrique que précédemment (figure 3-19) est utilisée pour la réalisation des mesures. Lors des mesures pour ces deux postures, il est demandé à chaque sujet d'agripper la poignée de mesures sans appliquer de force de préhension. Par la suite, chaque sujet applique une force de poussée verticale sur la poignée instrumentée. Deux forces de poussée (40 N et 80 N) sont appliquées par chaque sujet afin d'évaluer l'influence de cette force de poussée sur les réponses biodynamiques du système main-bras. La force verticale appliquée par le sujet est contrôlée à l'aide du capteur AMTI 6D positionné sous la poignée. Pour tous les sujets, chaque configuration est répétée cinq fois dans le but d'évaluer l'incertitude sur les mesures.

4.2.3 Les résultats en fonction des sujets

La réponse biodynamique du système main-bras est décrite sur les figures suivantes en impédance pour chaque sujet. Chaque figure présente la réponse biodynamique d'un sujet spécifiquement. À gauche de chaque figure se trouve la réponse du système main-bras pour la posture « standard a » et à droite se trouve la réponse pour la posture « standard b ». Pour chaque posture, les courbes en traits pleins représentent les moyennes des cinq mesures de répétabilité du système main-bras pour les deux forces de poussée. Les courbes en traits pointillés autour de chacune des courbes en trait plein décrivent l'intervalle de confiance à 95%. Cet intervalle de confiance est obtenu à l'aide d'analyses statistiques effectuées sur les mesures de répétabilité pour chaque configuration. L'échelle d'affichage des différents graphiques est identique afin de pouvoir comparer la réponse biodynamique du système main-bras pour les deux postures « standards » et pour les différents sujets.

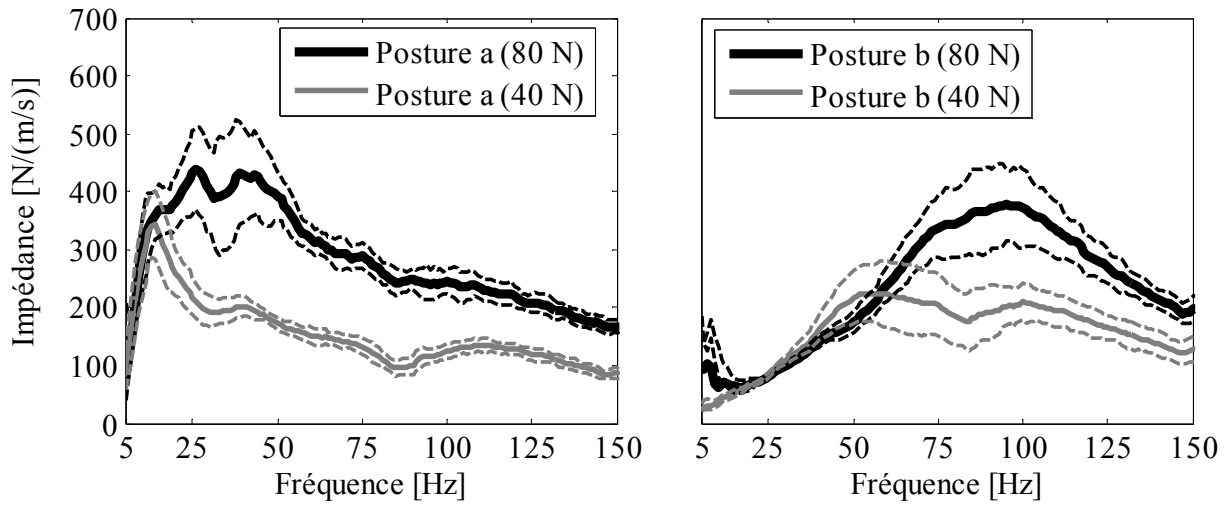


Figure 4-2 : Impédance du système main-bras en postures « standards » pour le sujet 1

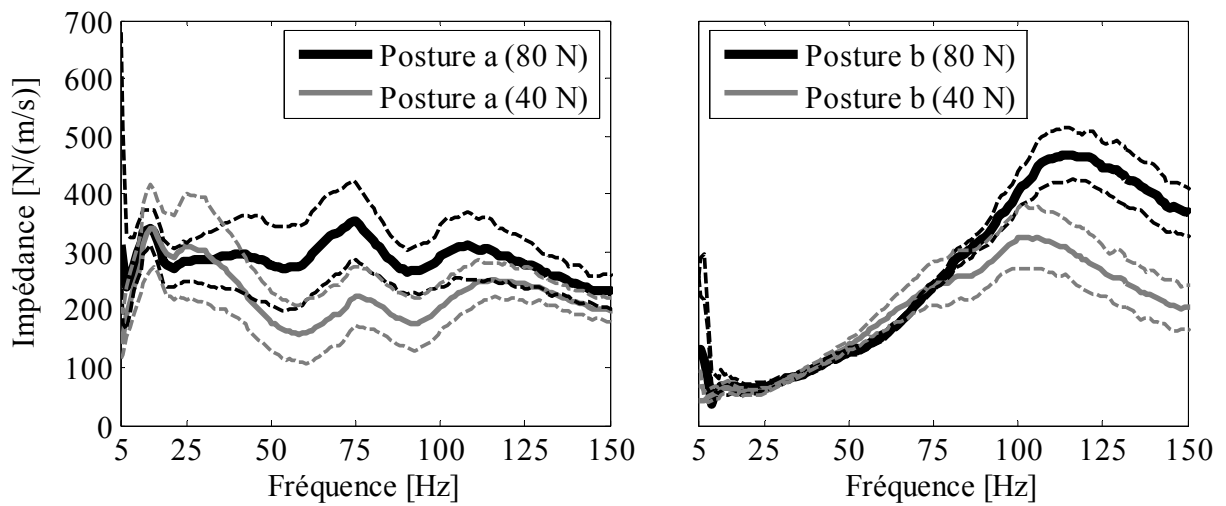


Figure 4-3 : Impédance du système main-bras en postures « standards » pour le sujet 2

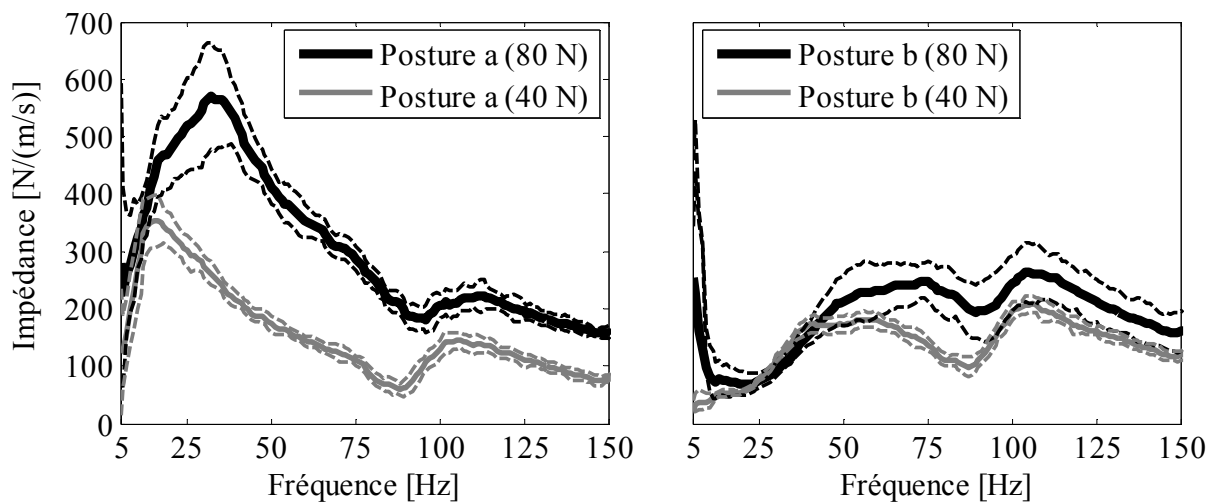


Figure 4-4 : Impédance du système main-bras en postures « standards » pour le sujet 3

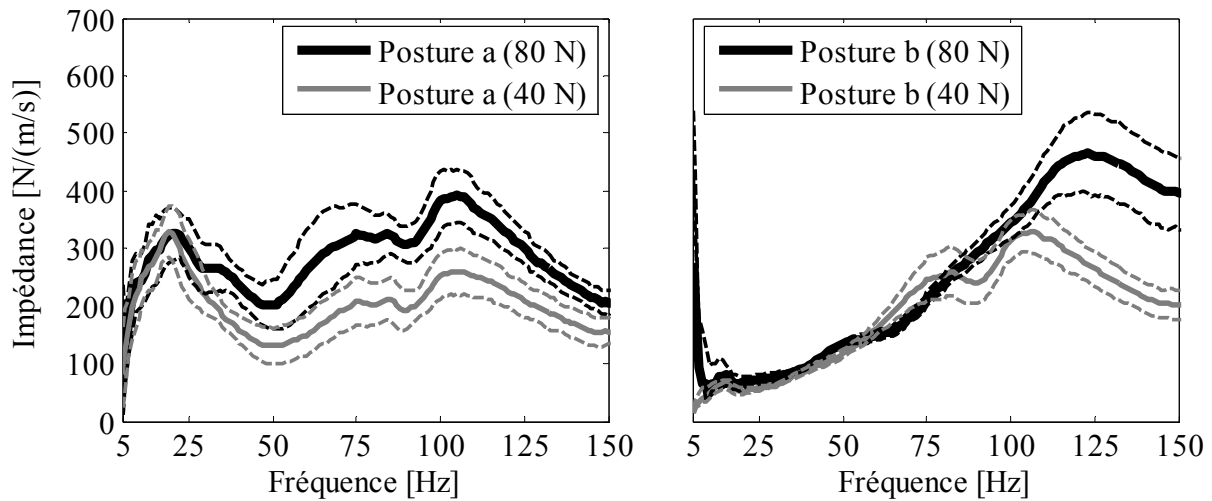


Figure 4-5 : Impédance du système main-bras en postures « standards » pour le sujet 4

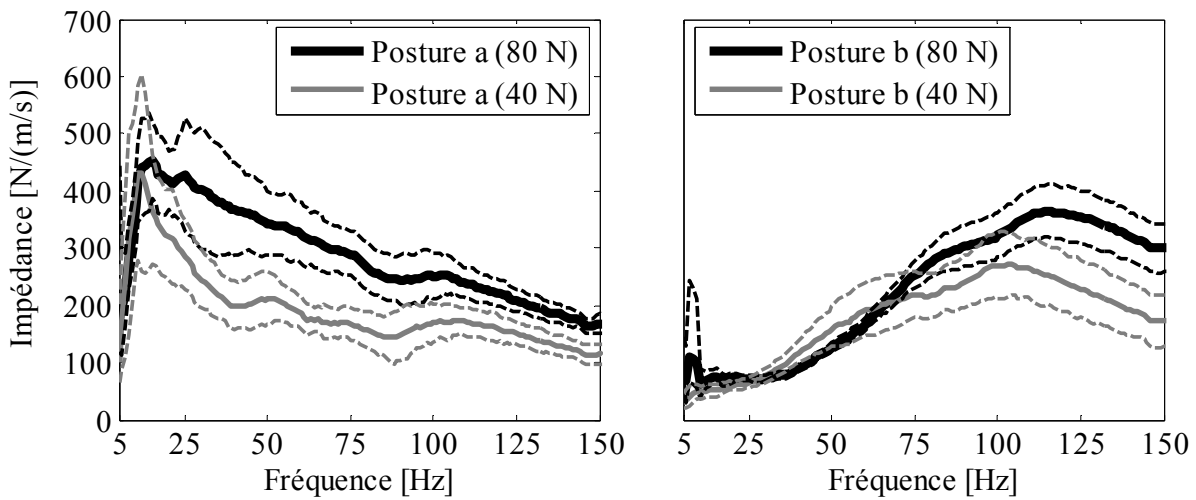


Figure 4-6 : Impédance du système main-bras en postures « standards » pour le sujet 5

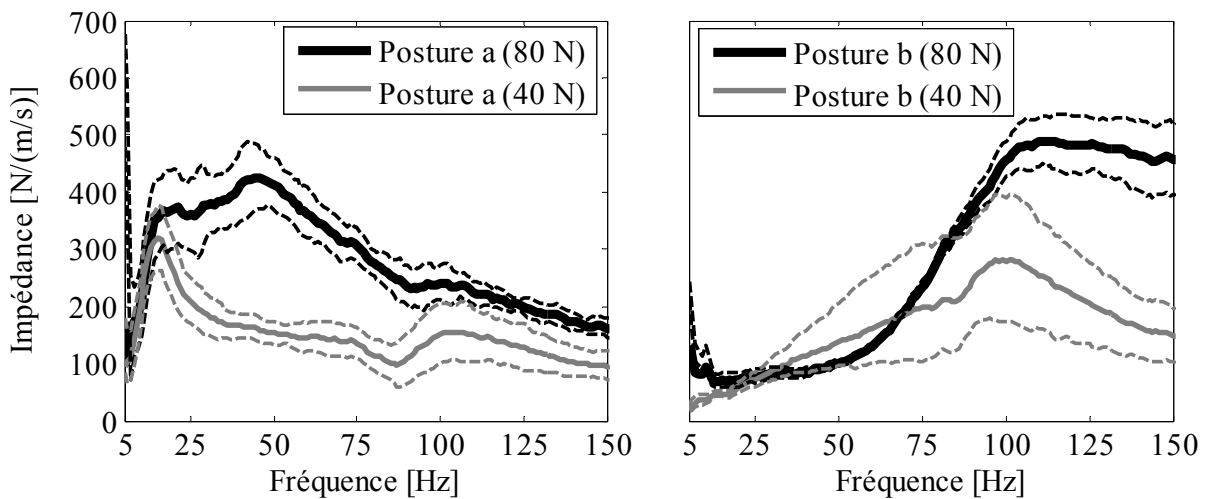


Figure 4-7 : Impédance du système main-bras en postures « standards » pour le sujet 6

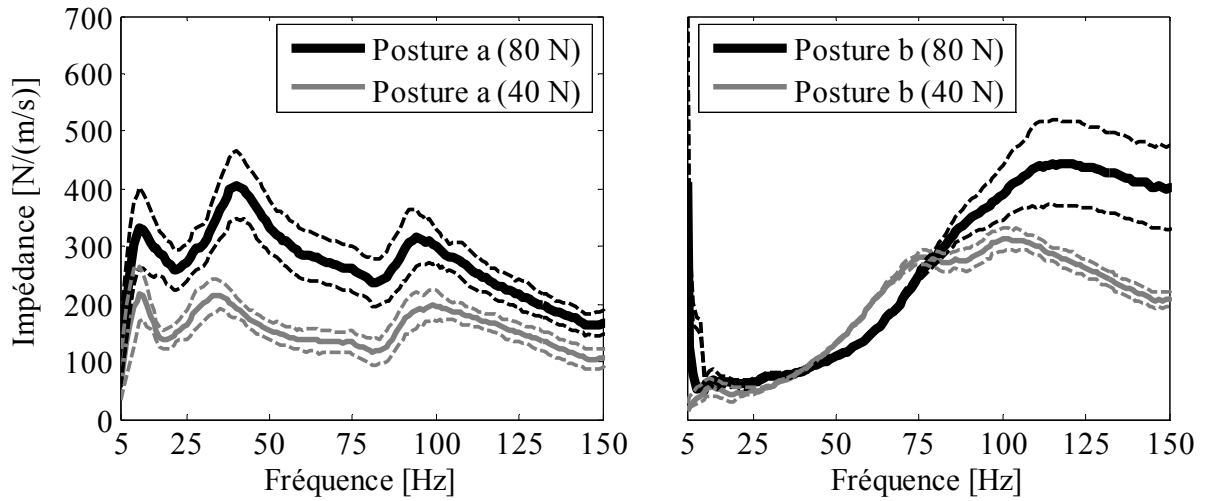


Figure 4-8 : Impédance du système main-bras en postures « standards » pour le sujet 7

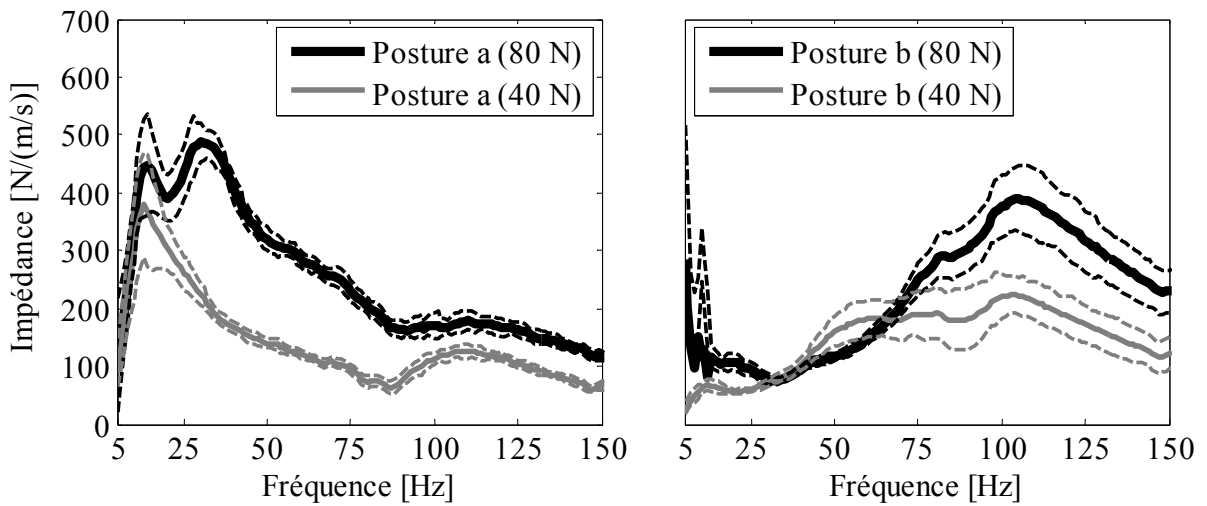


Figure 4-9 : Impédance du système main-bras en postures « standards » pour le sujet 8

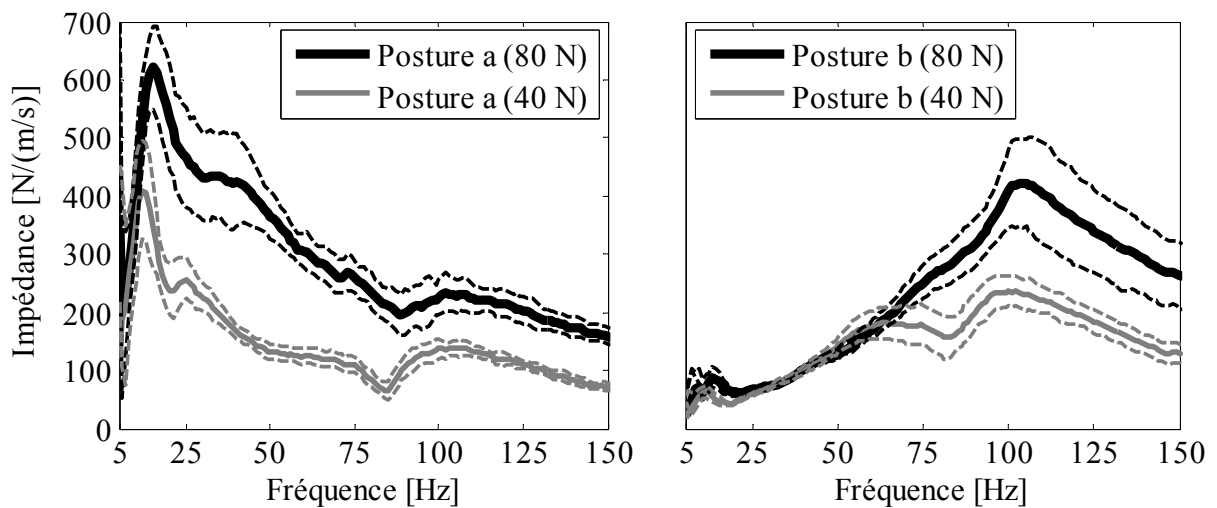


Figure 4-10 : Impédance du système main-bras en postures « standards » pour le sujet 9

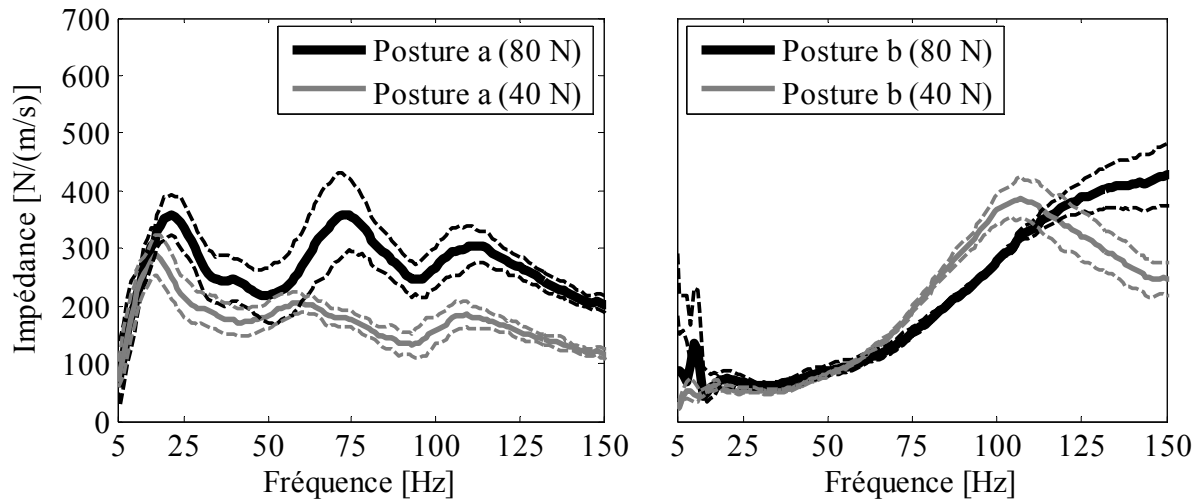


Figure 4-11 : Impédance du système main-bras en postures « standards » pour le sujet 10

D'après les résultats présentés ci-dessus pour la réponse biodynamique du système main-bras de dix sujets selon deux postures distinctes, on constate que les résultats en impédance sont extrêmement dépendants de la fréquence et de la posture utilisée. On remarque que l'impédance augmente lorsque la force de poussée appliquée augmente quel que soit le sujet étudié. Il est également possible de remarquer que l'incertitude liée à la mesure augmente également avec la force de poussée appliquée par le sujet. Par ailleurs, il est possible de remarquer que la réponse du système main-bras en posture « standard a » possède une dynamique forte sur la plage fréquentielle [5 ; 75] Hz pour la plupart des sujets. En revanche, la réponse du système main-bras en posture « standard b » possède une dynamique forte sur la plage fréquentielle [75 ; 150] Hz. Ces deux postures « standards » sont préliminaires à l'étude de la réponse du système main-bras en postures « cyclistes ». Elles permettent ainsi de se familiariser avec la dépendance fréquentielle de la réponse biodynamique du système main-bras et sa variabilité avec la force de poussée appliquée par le sujet. Une analyse plus détaillée de la réponse biodynamique du système main-bras pour dix sujets est effectuée dans la section 4.4 : Étude d'intra- et intervariabilité du système main – bras.

4.3 Le système main-bras en postures « cyclistes »

4.3.1 Les différentes configurations de mesures

Trois postures cyclistes sont choisies pour étude. Ces postures sont des postures relativement typiques pour n'importe quel cycliste sur route. En effet, ces trois postures sont :

- Mains sur la partie supérieure du cintre à proximité de la potence ;
- Mains aux extrémités basses du cintre ;
- Mains sur les cocottes.

La figure suivante illustre les localisations de la main pour chacune des postures.

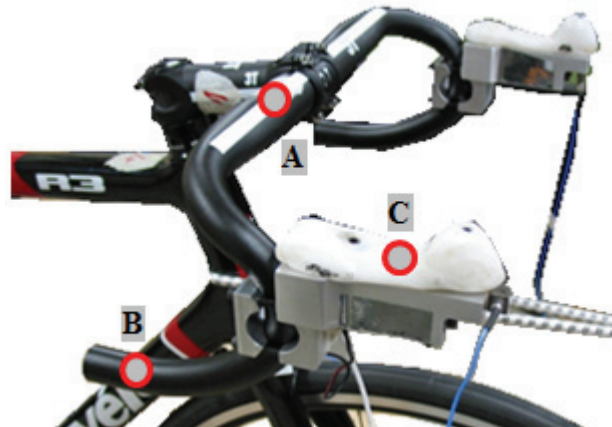


Figure 4-12 : Localisations de la main pour chacune des trois postures cyclistes (A : Mains à proximité de la potence ; B : Mains aux extrémités basses du cintre ; C : Mains sur les cocottes)

Pour ces trois postures, les bras des sujets sont en complète extension. Comme l'ensemble des tests sur le système main-bras, l'excitation est une excitation verticale.

4.3.2 Le protocole de réalisation des mesures

D'après les résultats de caractérisation du système main-bras en postures « standards » (section 4.2), il apparaît que la posture a une influence importante sur la réponse biodynamique du système main-bras des différents sujets. Il faut alors contrôler rigoureusement la posture des différents sujets lors de la réalisation des mesures en postures « cyclistes ». Afin de reproduire exactement les trois configurations « cyclistes » à l'aide d'un banc de mesures adéquat, les distances entre les différents composants d'un vélo de route sont mesurées. Ces distances concernent les composants en contact avec le cycliste; les pédales, la selle et les trois localisations différentes pour les mains (figure 4-13 et figure 4-14).

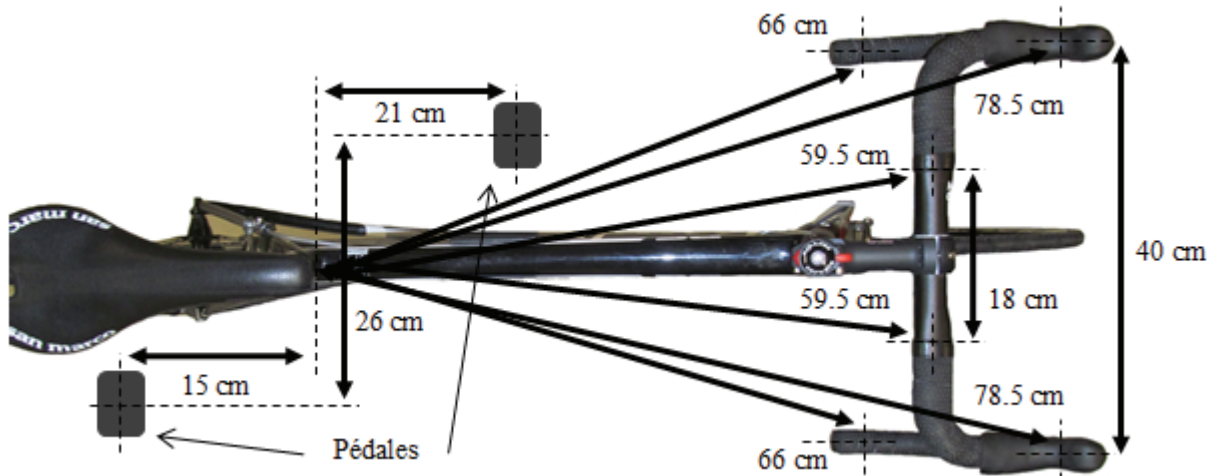


Figure 4-13 : Distances horizontales entre les composants en contact avec le cycliste

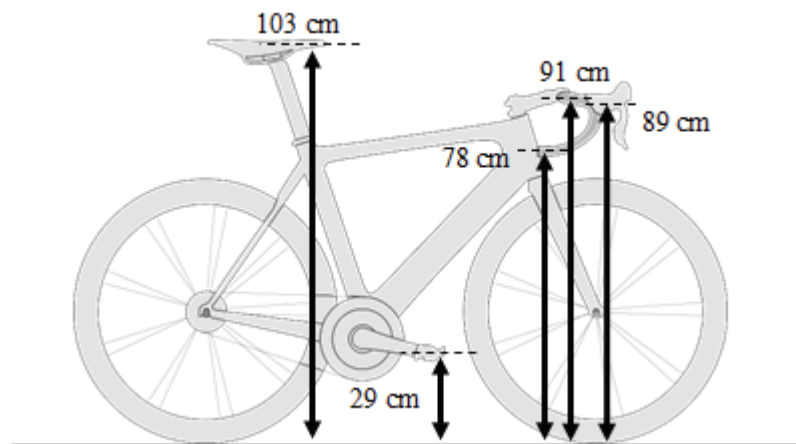


Figure 4-14 : Distances entre le sol et les composants en contact avec le cycliste

Une fois ces mesures collectées, un banc de test est fabriqué reproduisant exactement les distances entre composants (figure 4-15).

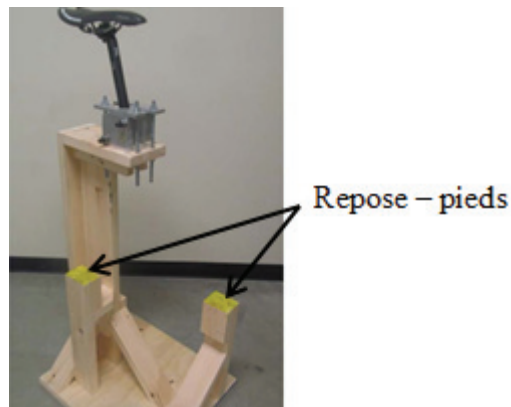


Figure 4-15 : Banc reproduisant l'arrière d'un vélo de route

Les deux poignées de mesures présentées précédemment (figure 3-19) sont utilisées pour reproduire le plus fidèlement possible les surfaces de contacts entre les mains et le cintre. La poignée cylindrique est utilisée pour les postures A et B. La poignée cubique est utilisée pour la posture C. Un support en plastique est ajouté à cette poignée pour reproduire la forme de la cocotte (figure 4-16).

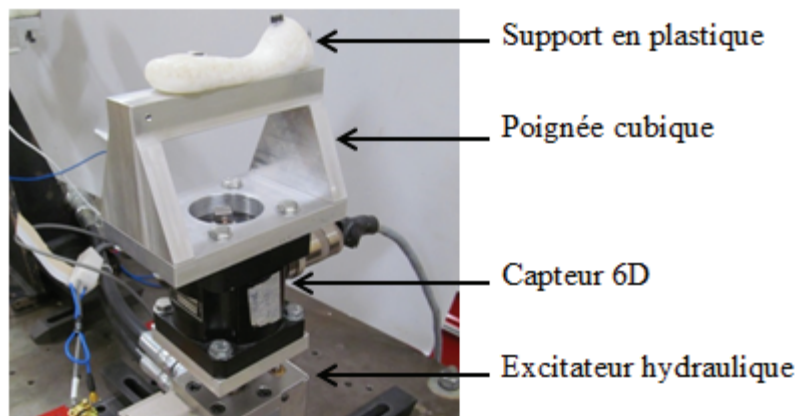


Figure 4-16 : Poignée instrumentée cubique avec support plastique pour la réalisation des mesures en posture C

Lors des mesures, il est demandé à chaque sujet de s'installer sur le banc de test reproduisant une posture de vélo de route et de déposer ses mains sur les supports sans appliquer de force de préhension. Pour chaque posture, le support pour la main droite est en réalité la poignée de mesures correspondante (figure 4-17 à figure 4-19).



Figure 4-17 : Posture cycliste A (Mains à proximité de la potence) pour différents sujets

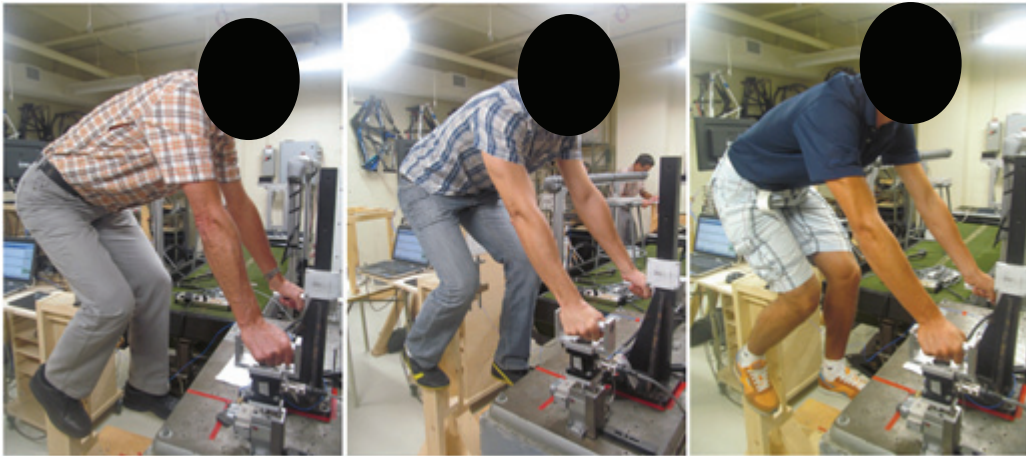


Figure 4-18 : Posture cycliste B (Mains aux extrémités basses du cintre) pour différents sujets

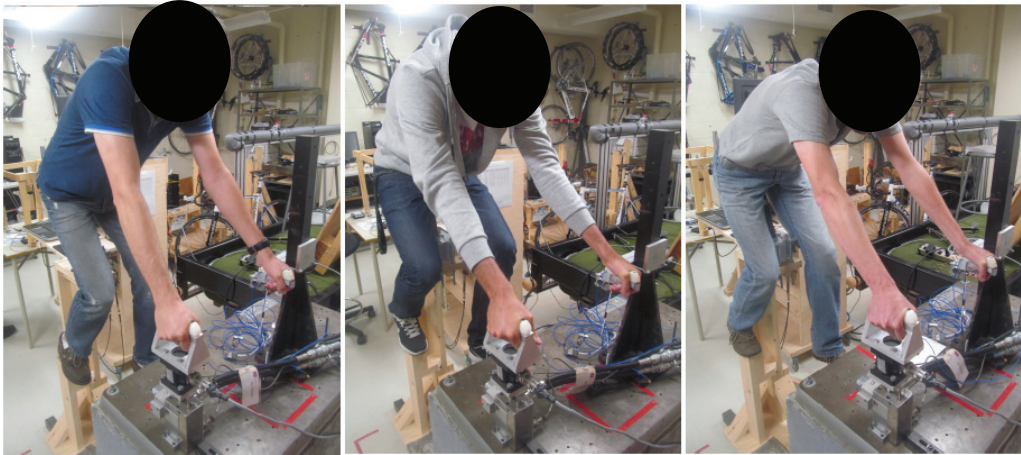


Figure 4-19 : Posture cycliste C (Mains sur les cocottes) pour différents sujets

Une fois installé, chaque sujet applique simultanément une force de poussée horizontale et une force de poussée verticale sur la poignée instrumentée. Le capteur AMTI 6D installé sous la poignée étant capable de mesurer six degrés de liberté (trois forces et trois moments), la force horizontale et la force verticale peuvent être mesurées et affichées. On demande aux sujets de contrôler ces deux forces simultanément. Deux configurations sont testées pour chaque posture. La première est une combinaison entre une force de poussée horizontale de 20 N et une force de poussée verticale de 40 N. La seconde est une combinaison entre une force de poussée horizontale de 20 N et une force de poussée verticale de 80 N.

Pour tous les sujets, chaque configuration est répétée cinq fois dans le but d'évaluer l'incertitude sur les mesures.

La procédure permettant d'extraire la réponse biodynamique du système main-bras provenant des mesures avec poignées instrumentées est identique à celle précédemment décrite dans le chapitre 3 : PRÉDICTION DU COMPORTEMENT VIBRATOIRE D'UNE STRUCTURE COUPLÉE AU SYSTÈME MAIN-BRAS.

4.3.3 Les résultats en fonction des sujets

La réponse biodynamique du système main-bras est décrite sur les figures suivantes en impédance pour chaque sujet. Chaque figure présente la réponse biodynamique d'un sujet spécifiquement. Sur chaque figure se trouve la réponse biodynamique en postures « cyclistes » A, B et C (de haut en bas). Comme pour la réponse biodynamique en postures « standards » (section 4.2), les courbes en traits pleins représentent les moyennes des cinq mesures de répétabilité du système main-bras pour les deux configurations de forces de poussée. Les courbes en traits pointillés autour de chacune des courbes en trait plein décrivent l'intervalle de confiance à 95%. Cet intervalle de confiance est obtenu à l'aide d'analyses statistiques effectuées sur les mesures de répétabilité pour chaque configuration. L'échelle d'affichage des différents graphiques est identique afin de pouvoir comparer la réponse biodynamique du système main-bras pour ces trois postures « cyclistes » et pour les différents sujets.

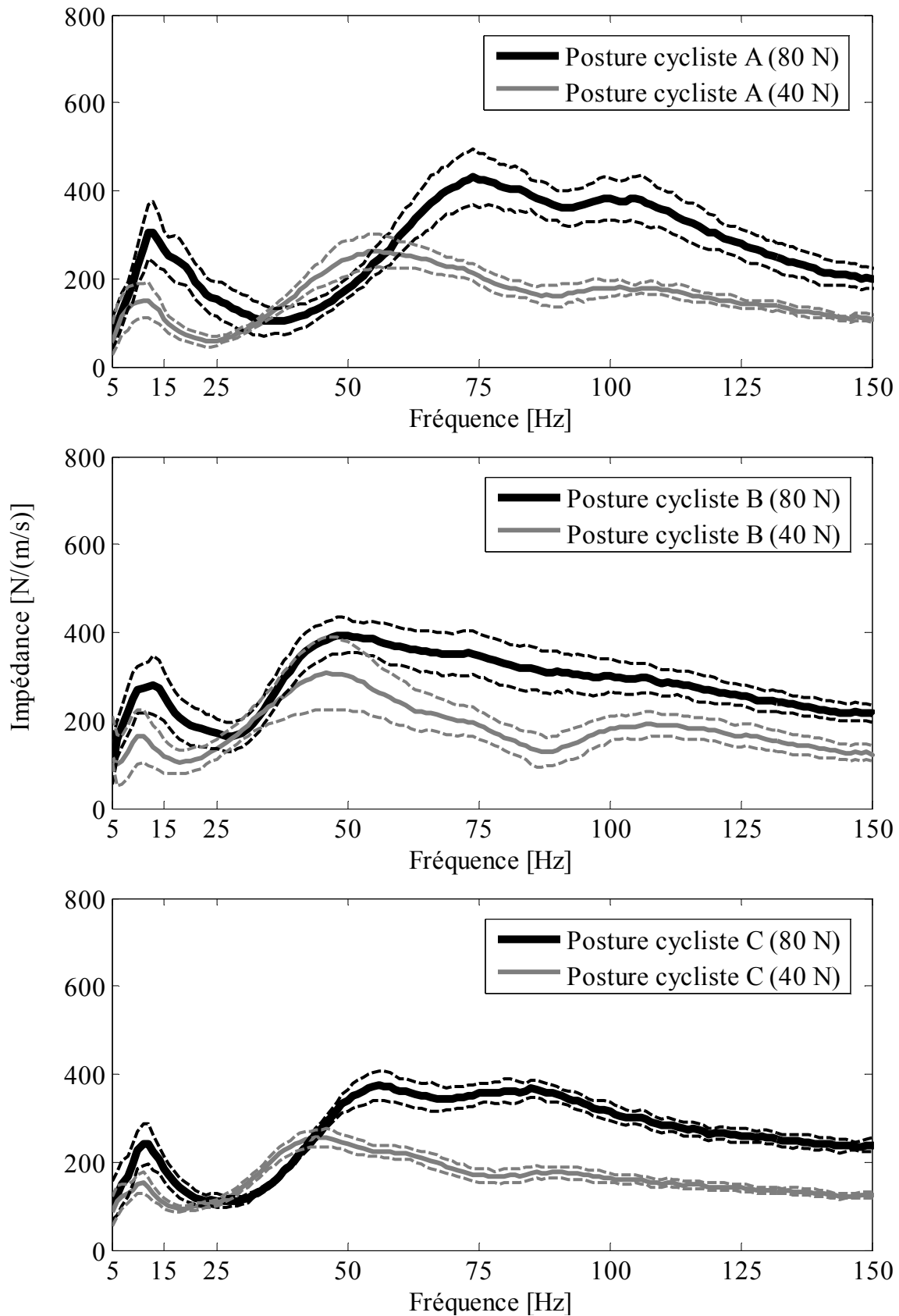


Figure 4-20 : Impédance du système main-bras en postures « cyclistes » pour le sujet 1

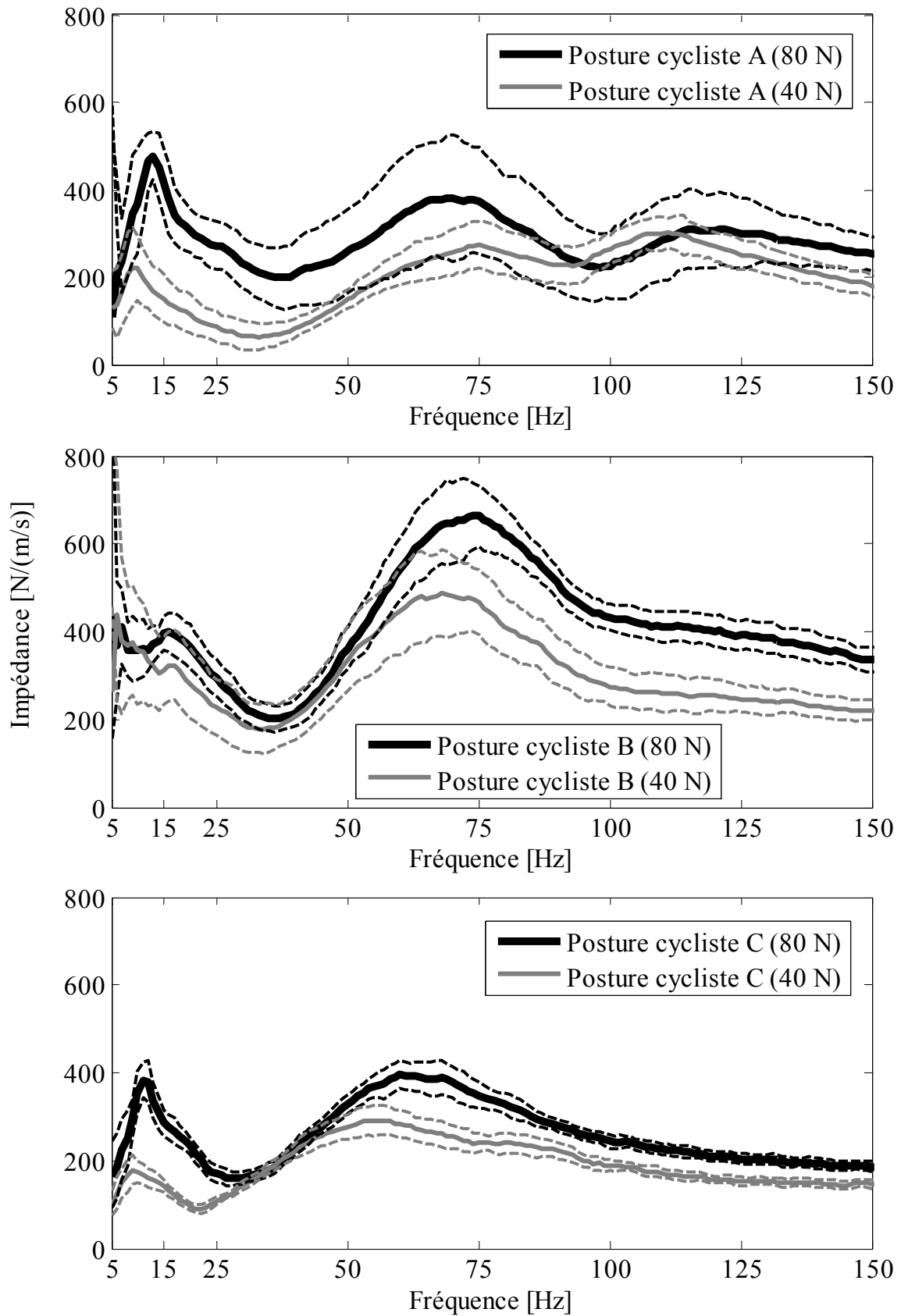


Figure 4-21 : Impédance du système main-bras en postures « cyclistes » pour le sujet 2

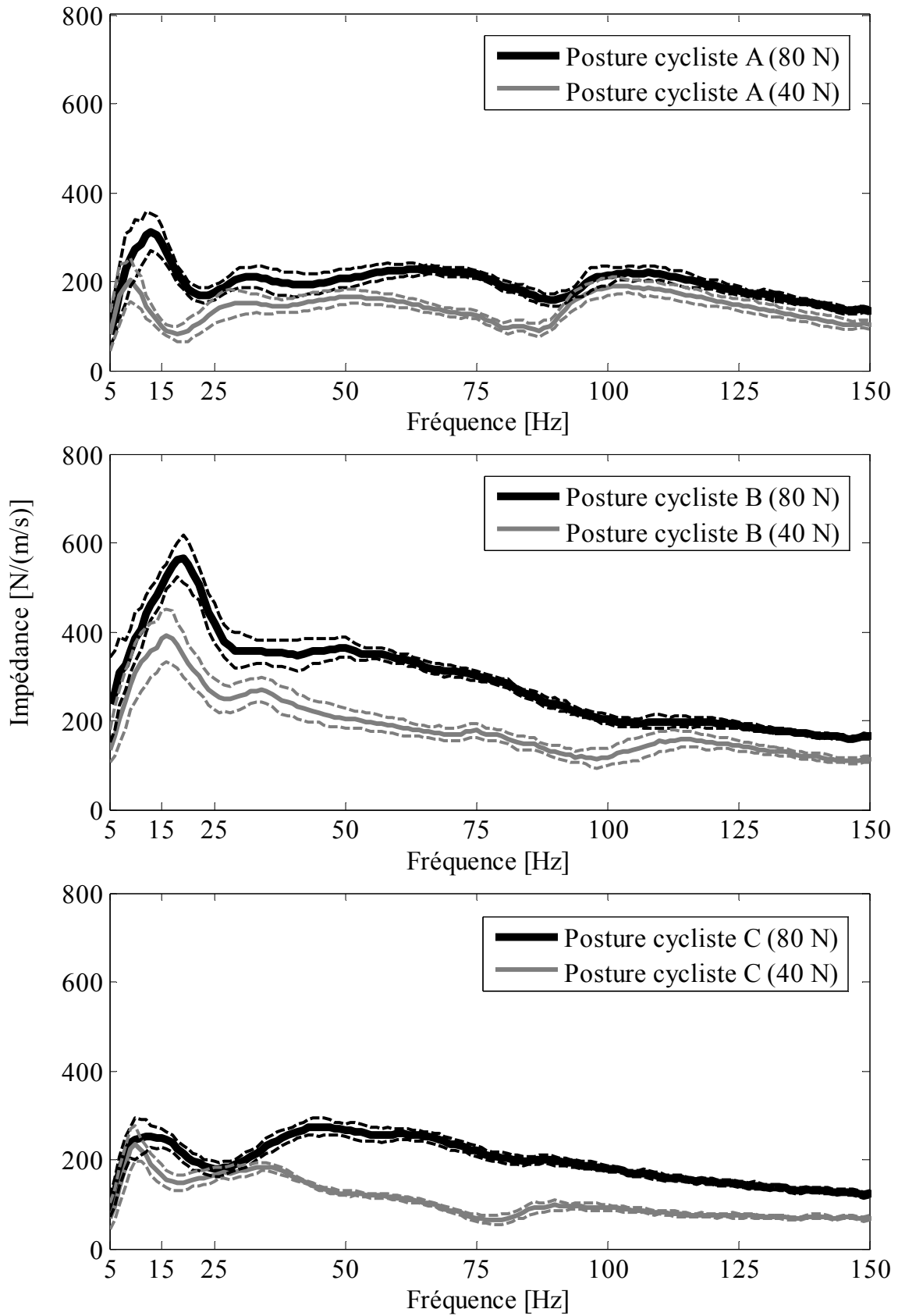


Figure 4-22 : Impédance du système main-bras en postures « cyclistes » pour le sujet 3

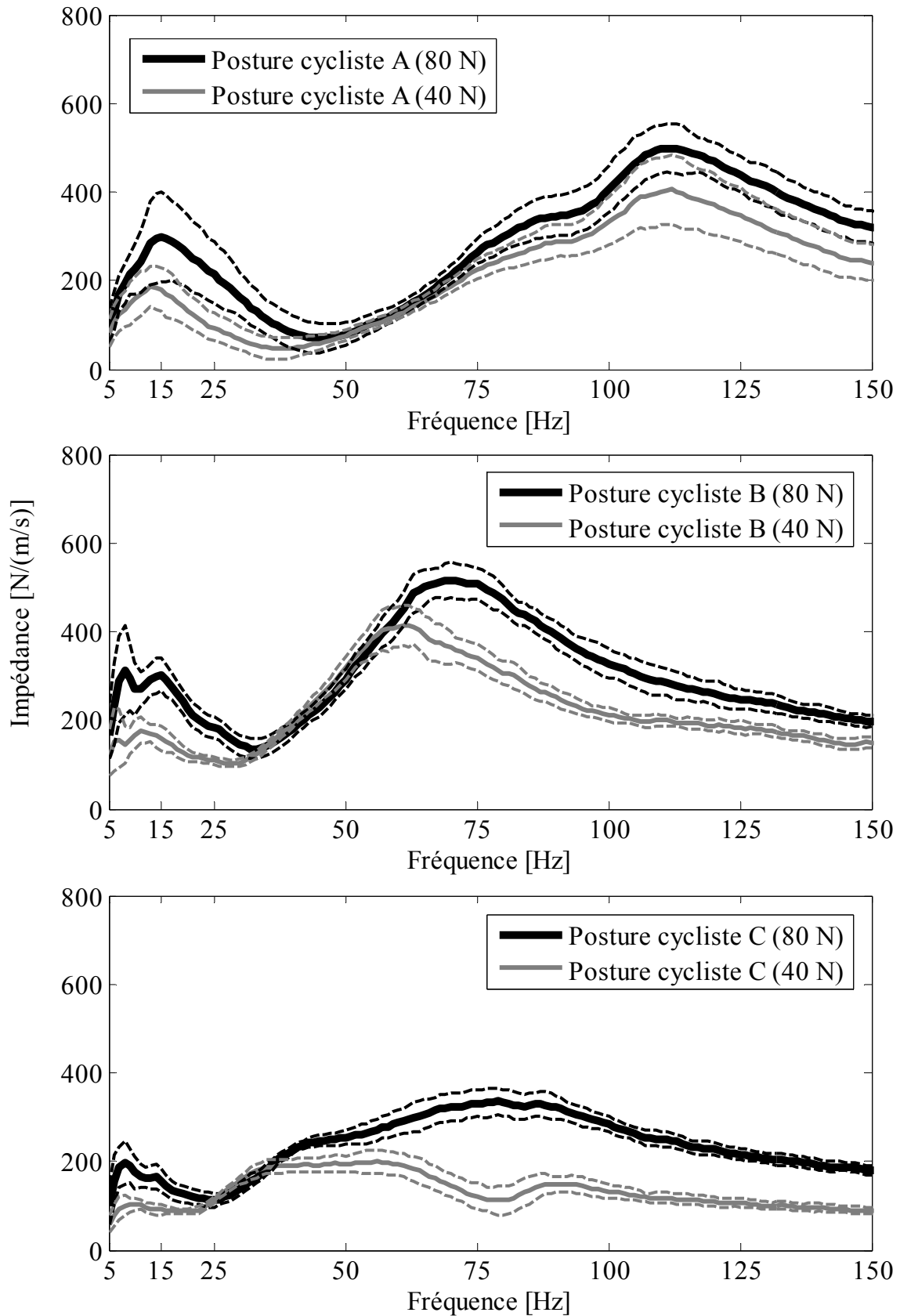


Figure 4-23 : Impédance du système main-bras en postures « cyclistes » pour le sujet 4

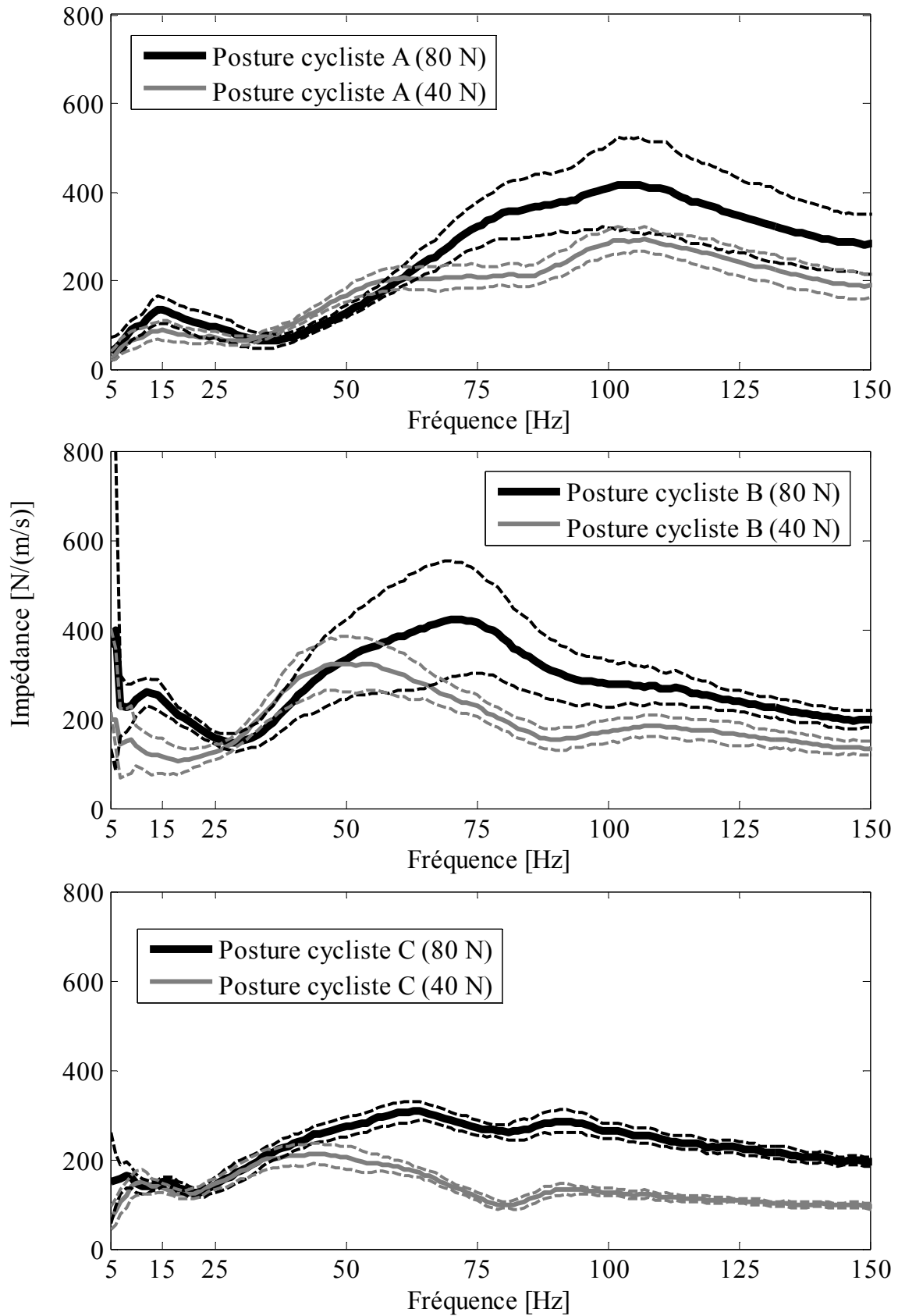


Figure 4-24 : Impédance du système main-bras en postures « cyclistes » pour le sujet 5

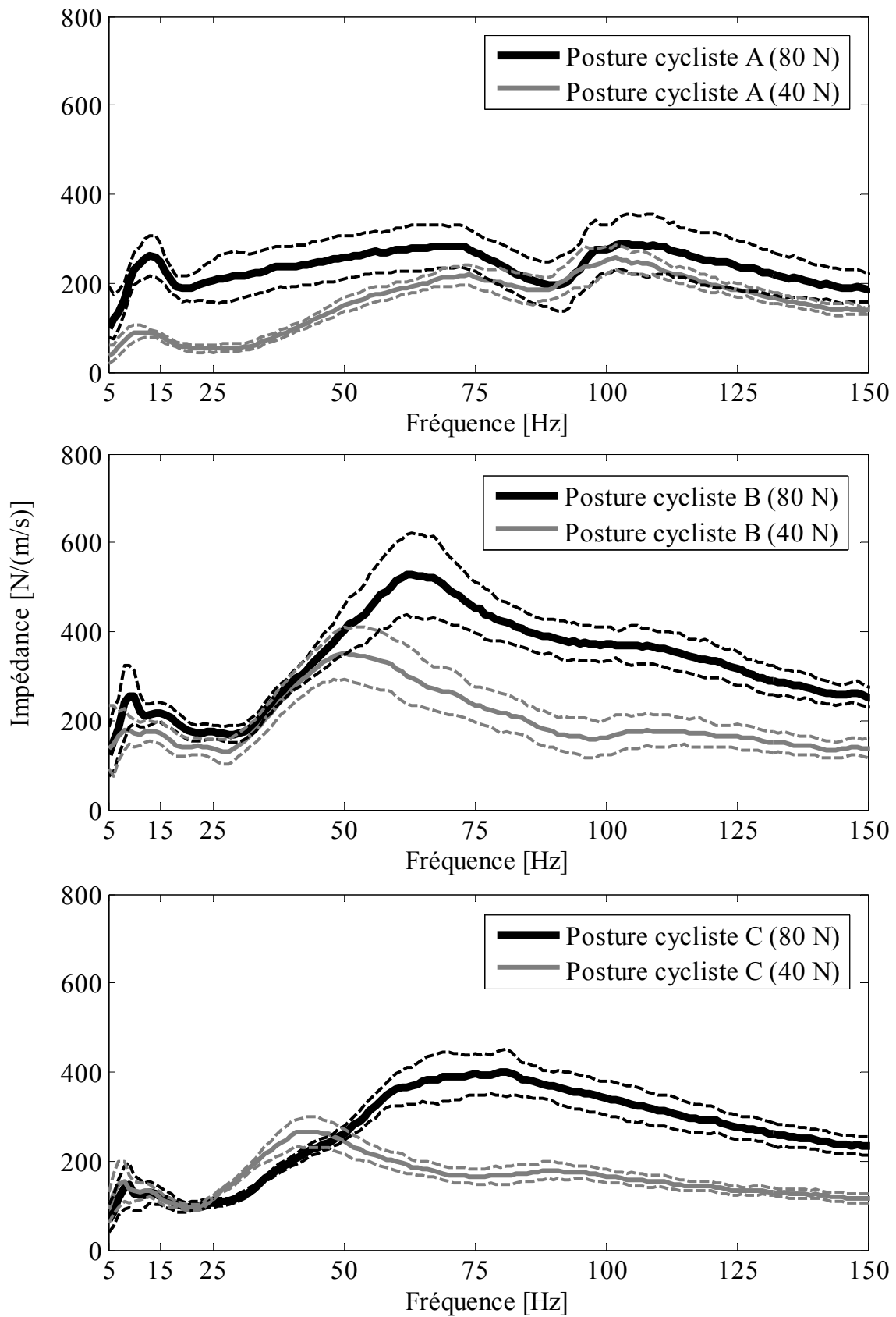


Figure 4-25 : Impédance du système main-bras en postures « cyclistes » pour le sujet 6

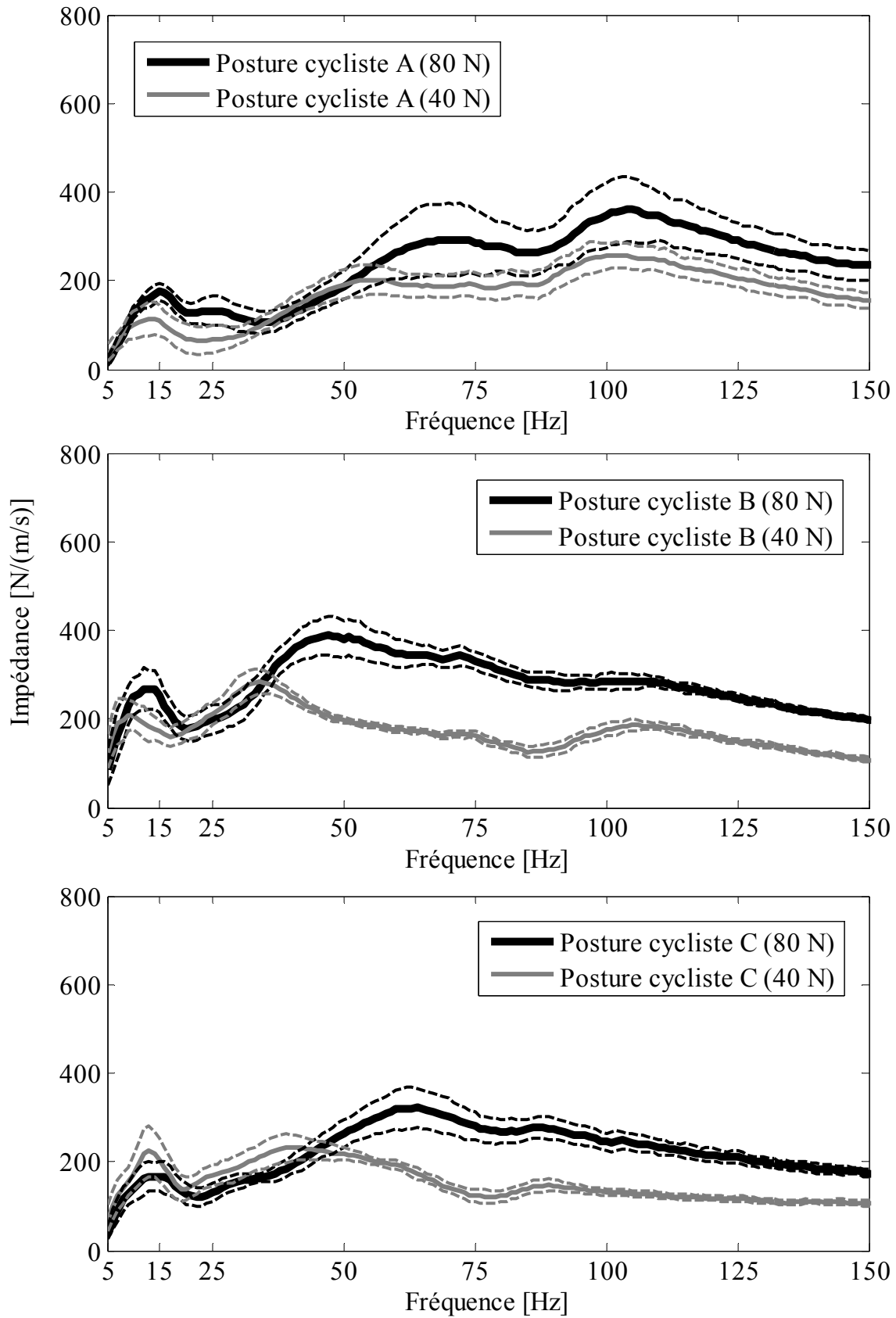


Figure 4-26 : Impédance du système main-bras en postures « cyclistes » pour le sujet 7

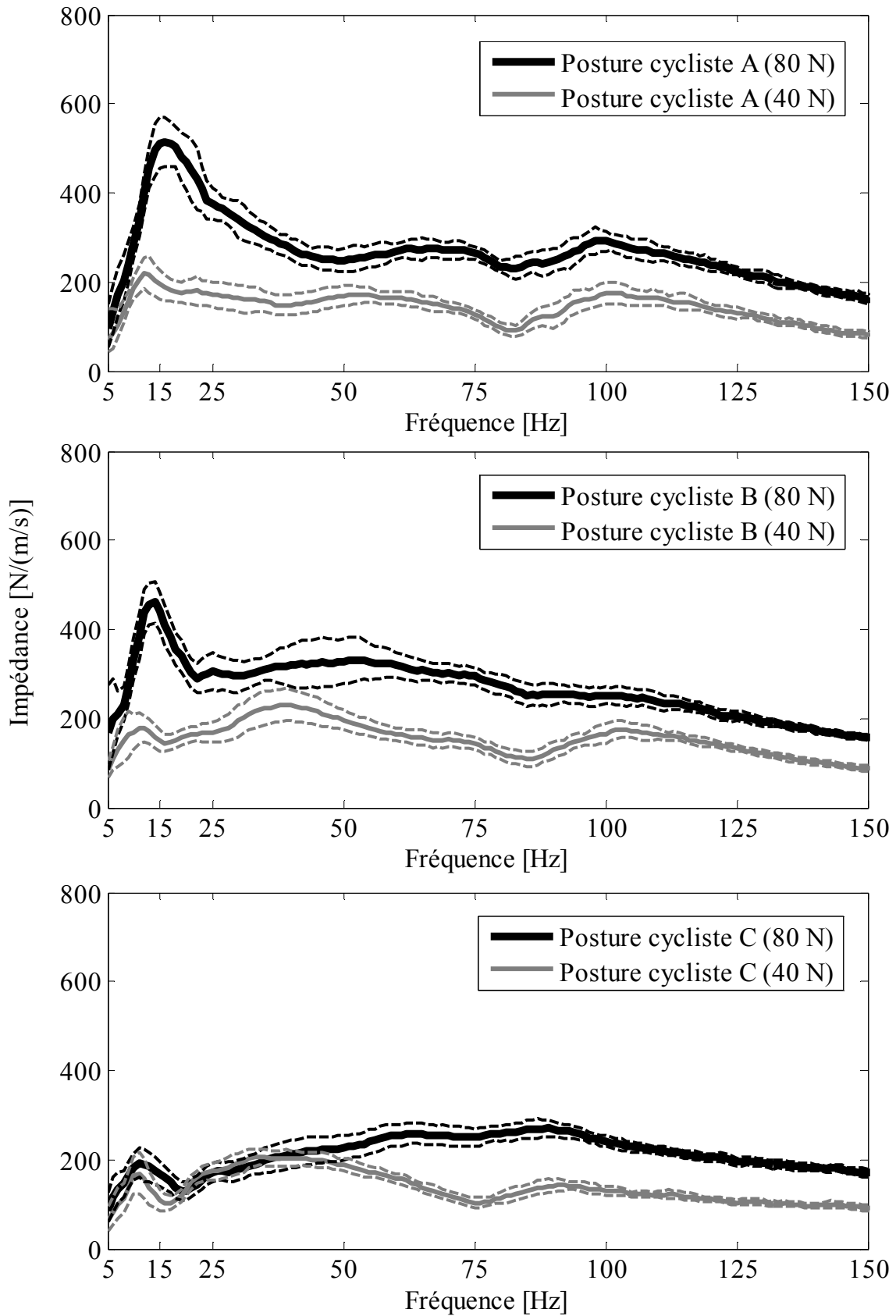


Figure 4-27 : Impédance du système main-bras en postures « cyclistes » pour le sujet 8

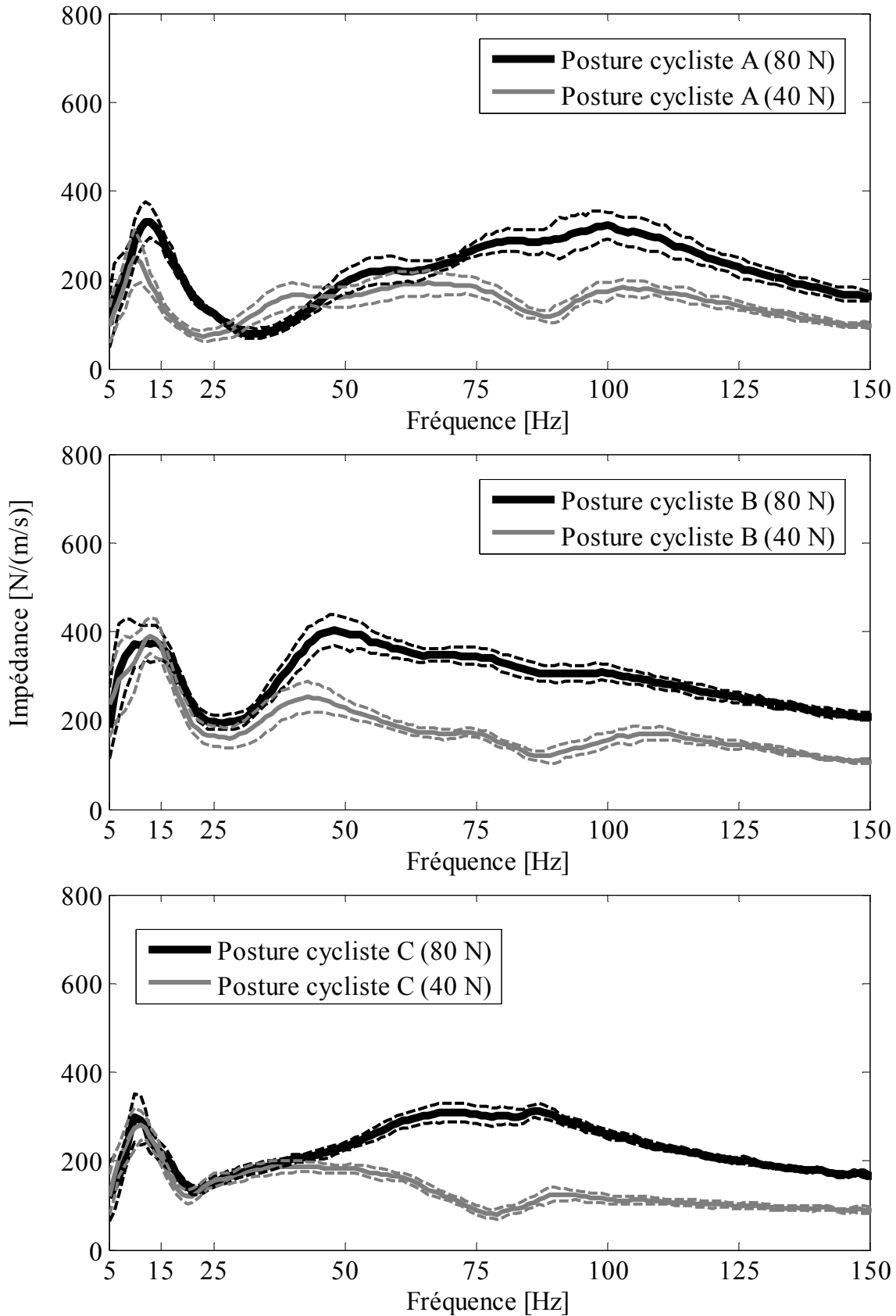


Figure 4-28 : Impédance du système main-bras en postures « cyclistes » pour le sujet 9

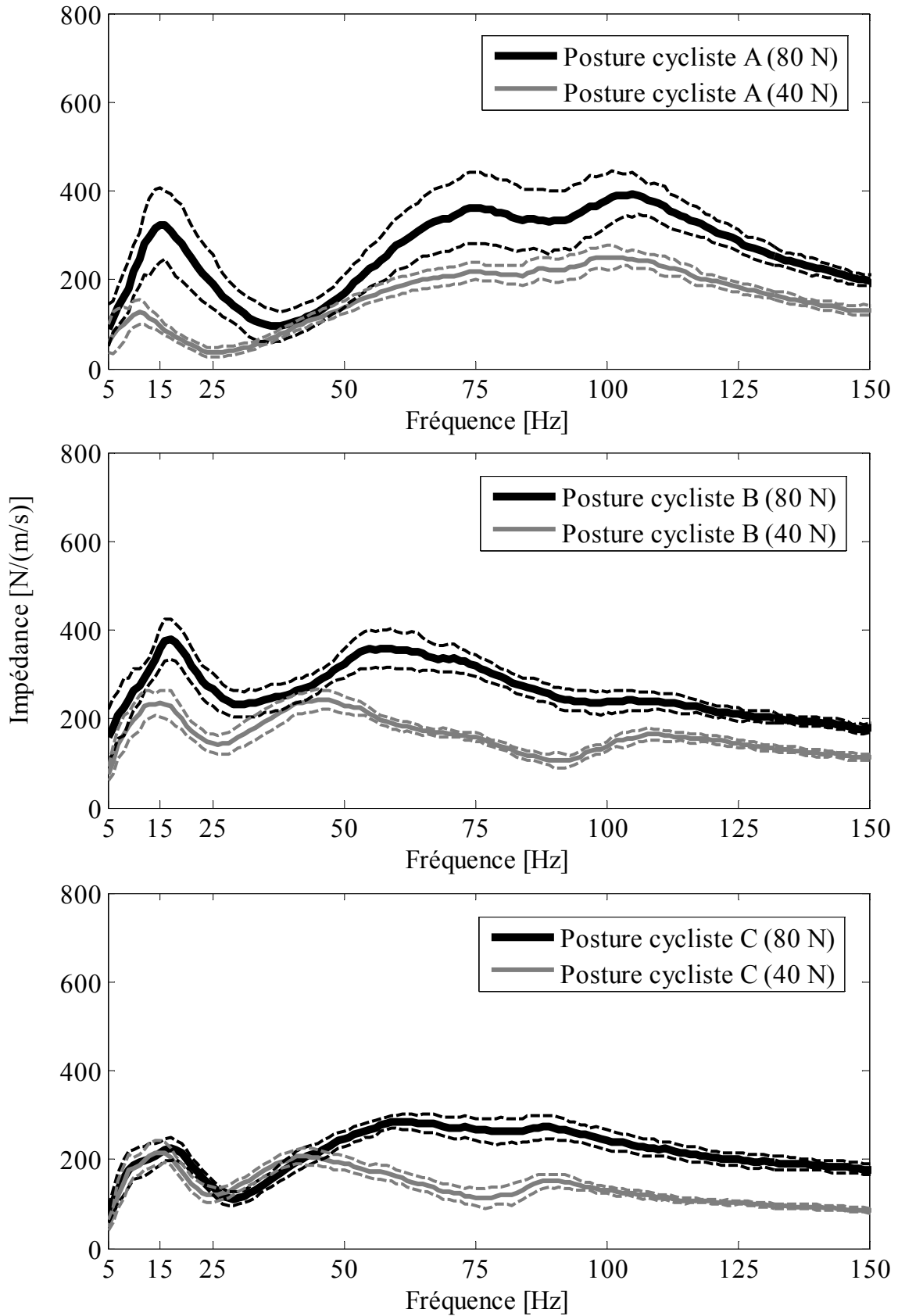


Figure 4-29 : Impédance du système main-bras en postures « cyclistes » pour le sujet 10

L'interprétation des résultats obtenus en postures « cyclistes » est relativement similaire à celle effectuée pour les résultats obtenus en postures « standards ». En effet, d'après les résultats de réponse biodynamique du système main-bras pour les dix sujets selon les trois postures « cyclistes » distinctes, on constate que les résultats en impédance sont extrêmement dépendants de la fréquence et de la posture utilisée. On remarque que l'impédance augmente lorsque la force de poussée augmente quel que soit le sujet étudié et que l'incertitude liée à la mesure augmente avec la force de poussée appliquée par le sujet. En revanche, contrairement aux différences notables que l'on peut observer entre les deux postures « standards », la différence entre les postures « cyclistes » est moindre. Bien que cette différence soit moindre, elle n'en reste pas moins non négligeable. Une analyse plus détaillée de la réponse biodynamique du système main-bras en postures « cyclistes » pour dix sujets est proposée dans la section suivante.

4.4 Étude d'intra- et intervariabilité du système main – bras

Sachant que chaque individu possède sa propre réponse biodynamique, il est intéressant d'évaluer l'intra- et l'intervariabilité entre les réponses biodynamiques des différents sujets. Pour chaque sujet, il est possible de comparer les courbes d'impédance représentatives des différentes postures et des forces de poussée étudiées. Est-il possible d'identifier des caractéristiques communes dans la réponse du système main-bras de plusieurs sujets ?

A l'aide des courbes d'impédance en postures « standards » (figure 4-2 à figure 4-11), on constate que la réponse biodynamique du système main-bras est spécifique à l'individu. Afin de présenter cette affirmation sous forme synthétique, un tableau permettant de localiser les minimas et maximas (locaux ou globaux) sur chacune des courbes d'impédance est développé. Le tableau suivant présente les minimas et maximas identifiés sur les courbes d'impédance du système main-bras de chacun des sujets pour chaque posture « standard » et chacune des forces de poussée. Chaque ligne de ce tableau correspond à une analyse d'intravariabilité pour un sujet spécifiquement en fonction des différentes postures et forces de poussée. La combinaison de l'ensemble des lignes constitue une analyse d'intervariabilité entre dix sujets en termes d'identification de minimas et maximas.

Tableau 4-2 : Détermination des maxima et minima sur les courbes d'impédance du système main-bras en postures « standards » pour les dix sujets

Sujets	Forces de poussée	Posture « standard » a		Posture « standard » b	
		Minima	Maxima	Minima	Maxima
1	40 N	85 Hz	14 Hz	10 Hz 83 Hz	55 Hz 100 Hz
	80 N	/	26 Hz 41 Hz	20 Hz	95 Hz
2	40 N	57 Hz 92 Hz	14 Hz 24 Hz 75 Hz 115 Hz	20 Hz	102 Hz
	80 N	21 Hz 54 Hz 90 Hz	14 Hz 75 Hz 108 Hz	25 Hz	115 Hz
3	40 N	88 Hz	16 Hz	15 Hz 87 Hz	56 Hz 106 Hz
	80 N	96 Hz	32 Hz	21 Hz 89 Hz	73 Hz 105 Hz
4	40 N	50 Hz 89 Hz	19 Hz 84 Hz 105 Hz	20 Hz	82 Hz 106 Hz
	80 N	49 Hz 90 Hz	20 Hz 75 Hz 105 Hz	20 Hz	123 Hz
5	40 N	/	11-12 Hz	15 Hz	103 Hz
	80 N	/	15 Hz	25 Hz	115 Hz
6	40 N	87 Hz	15 Hz	10 Hz	102 Hz
	80 N	/	21 Hz 45 Hz	20 Hz	111 Hz
7	40 N	18 Hz 81 Hz	11 Hz 35 Hz 99 Hz	20 Hz	75 Hz 101 Hz
	80 N	21 Hz 82 Hz	11 Hz 40 Hz 94 Hz	25 Hz	117 Hz
8	40 N	87 Hz	13 Hz	20 Hz	104 Hz
	80 N	/	14 Hz 30 Hz	33 Hz	104 Hz
9	40 N	84 Hz	12 Hz	18 Hz 82 Hz	65 Hz 100 Hz
	80 N	89 Hz	15 Hz	20 Hz	105 Hz
10	40 N	42 Hz 93 Hz	17 Hz 58 Hz 109 Hz	30 Hz	107 Hz
	80 N	48 Hz 95 Hz	21 Hz 74 Hz 111 Hz	35 Hz	150 Hz

4.4.1 La biodynamique du système main-bras : une caractéristique spécifique à l'individu

A l'aide des résultats de minima et maxima présentés dans le tableau 4-2, on constate qu'aucune conclusion commune aux différents sujets n'est identifiable. En effet, les minima et maxima ne coïncident pas pour tous les sujets. De plus, les minima de certains sujets se trouvent dans les mêmes zones fréquentielles que les maxima de certains autres sujets. Cette opposition dans le comportement dynamique du système main-bras de différents sujets est une condition qui rend impossible toute conclusion commune entre sujets. Par exemple, pour la posture « standard a » et une force de poussée de 40 N, le sujet 1 affiche un minimum à 85 Hz alors que le sujet 4 affiche un maximum à seulement 1 Hz d'écart, soit 84 Hz. Toujours pour la posture « standard a » et une force de poussée de 40 N, le sujet 10 affiche son premier maximum à 17 Hz alors que le sujet 7 affiche son premier minimum à 18 Hz. Pour la posture « standard b », il existe également des oppositions entre minima et maxima de différents sujets. C'est le cas de la fréquence 82 Hz qui correspond à un minimum pour le sujet 9 lors d'une force de poussée à 40 N et un maximum pour le sujet 4 lors d'une force de poussée identique.

Ces résultats montrent qu'aucune conclusion commune à plusieurs sujets ne peut être obtenue même dans des conditions où les paramètres sont contrôlés et identiques. À l'aide des résultats du tableau 4-2, on constate bel-et-bien que la réponse biodynamique du système main-bras est une caractéristique spécifique à l'individu. Cette hypothèse de spécificité a déjà été formulée par le passé. Nos résultats pour les postures « standards » confirment cette hypothèse. Il est impossible d'identifier des caractéristiques communes dans les réponses biodynamiques de différents sujets en postures « standards ».

D'un point de vue mécanique, le fait que les réponses dynamiques changent aussi drastiquement d'un sujet à l'autre dépend certainement de paramètres tels que la morphologie du système main-bras de chacun des individus, la composition osseuse, le niveau de contraction musculaire, et autres.

4.4.2 Intravariabilité et Intervariabilité en postures « cyclistes »

Nous avons montré qu'il est impossible d'identifier des caractéristiques communes dans les réponses biodynamiques de différents sujets en postures « standards ». Qu'en est-il dans le cas des postures « cyclistes » ? Sachant qu'aucune étude n'a investigué la réponse biodynamique du système main-bras en postures cyclistes par le passé, cette analyse de variabilité est une originalité du doctorat.

La représentation suivante propose d'illustrer ce propos pour une posture cycliste et chaque force de poussée étudiée. Un spectrogramme est représenté avec en abscisse les fréquences, en ordonnées les dix sujets, et en couleur l'impédance correspondante. Cette représentation permet de comparer visuellement et rapidement la réponse biodynamique du système main-bras pour les dix sujets pour une posture cycliste particulière.

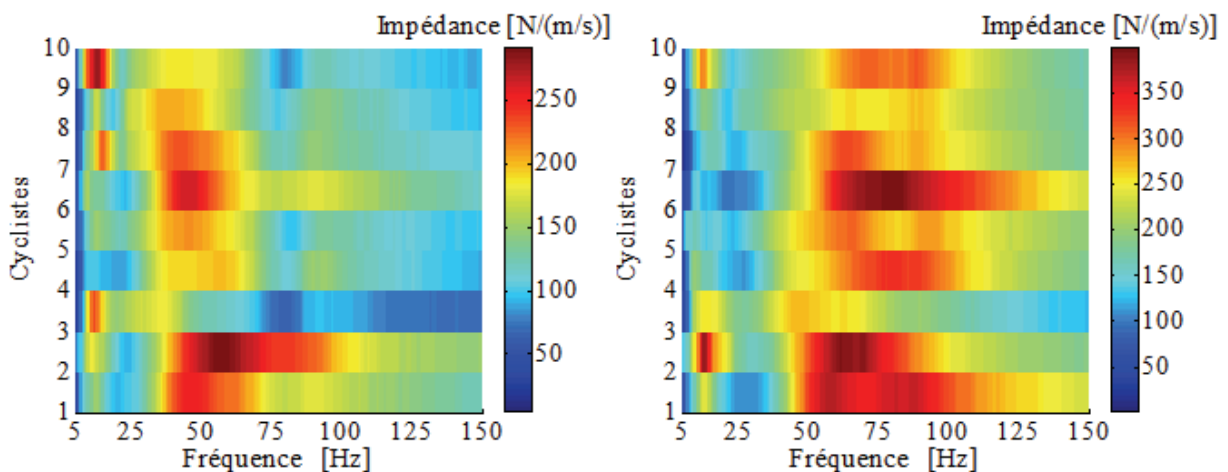


Figure 4-30 : Spectrogrammes de comparaison de la réponse biodynamique du système main-bras des dix sujets en posture « cycliste » C (Gauche : Force de poussée de 40 N ; Droite : Force de poussée de 80 N)

Cette représentation (figure 4-30) permet de visualiser les potentielles caractéristiques communes pour les dix sujets. Pour chaque configuration, certains maxima et minima semblent apparaître dans des zones fréquentielles identiques. C'est le cas par exemple de la zone fréquentielle aux alentours de 50 Hz pour la force de poussée de 40 N ou la zone fréquentielle aux alentours de 75 Hz pour la force de poussée de 80 N. Pour autant, l'amplitude de ces maxima ou minima n'est pas identique pour tous les sujets. Ce type de

représentation permet une analyse visuelle rapide mais pas précise. Afin d'évaluer si des caractéristiques communes existent dans les réponses biodynamiques des différents sujets pour toutes les postures « cyclistes », une analyse plus fine est réalisée.

Une analyse d'intra- et d'intervariabilité parmi les réponses biodynamiques du système main-bras de plusieurs sujets en postures « cyclistes » est effectuée afin de répondre à cette interrogation. À l'aide des courbes d'impédance (figure 4-20 à figure 4-29) des dix sujets en postures « cyclistes », un tableau permettant de localiser les minimas et maximas (locaux ou globaux) sur chacune de ces courbes est développé. Comme il a été présenté pour les postures « standards », le tableau suivant présente les minimas et maximas identifiés sur les courbes d'impédance du système main-bras de chacun des sujets pour chaque posture « cycliste » et chacune des forces de poussée.

Tableau 4-3 : Détermination des maxima et minima sur les courbes d'impédance du système main-bras en postures « cyclistes » pour les dix sujets

Sujets	Forces de poussée	Posture « cycliste » A		Posture « cycliste » B		Posture « cycliste » C	
		Minima	Maxima	Minima	Maxima	Minima	Maxima
1	40 N	24 Hz 89 Hz	10 Hz 55 Hz 102 Hz	18 Hz 89 Hz	11 Hz 48 Hz 108 Hz	18 Hz	11 Hz 45 Hz
	80 N	36 Hz 91 Hz	12 Hz 74 Hz 100 Hz	28 Hz	13 Hz 50 Hz	27 Hz	12 Hz 56 Hz 85 Hz
2	40 N	33 Hz 93 Hz	9 Hz 75 Hz 111 Hz	34 Hz	17 Hz 68 Hz	22 Hz	9 Hz 57 Hz
	80 N	35 Hz 98 Hz	13 Hz 69 Hz 115 Hz	36 Hz	16 Hz 75 Hz	28 Hz	11 Hz 60 Hz
3	40 N	18 Hz 87 Hz	9 Hz 104 Hz	28 Hz 98 Hz	16 Hz 34 Hz 116 Hz	18 Hz 79 Hz	10 Hz 34 Hz
	80 N	23 Hz 89 Hz	12 Hz 66 Hz 108 Hz	/	19 Hz	26 Hz	12-13 Hz 46 Hz
4	40 N	38 Hz	13 Hz 112 Hz	28 Hz	11 Hz 61 Hz	20 Hz 79 Hz	10 Hz 56 Hz 93 Hz
	80 N	45 Hz	15 Hz 112 Hz	33 Hz	8 Hz 15 Hz 70 Hz	25 Hz	8 Hz 79 Hz
5	40 N	29 Hz	15 Hz 107 Hz	18 Hz 90 Hz	9 Hz 50 Hz 109 Hz	19 Hz 82 Hz	44 Hz 92 Hz
	80 N	36 Hz	14 Hz 104 Hz	29 Hz	12 Hz 70 Hz	21 Hz 81 Hz	63 Hz 92 Hz
6	40 N	23 Hz 86 Hz	11 Hz 74 Hz 102 Hz	27 Hz	8 Hz 50 Hz	21 Hz	8 Hz 42 Hz
	80 N	20 Hz 91 Hz	13 Hz 72 Hz 104 Hz	28 Hz	9 Hz 62 Hz	20 Hz	9 Hz 81 Hz
7	40 N	23 Hz 79 Hz	14 Hz 56 Hz 103 Hz	17 Hz 87 Hz	10 Hz 34 Hz	20 Hz 78 Hz	13 Hz 41 Hz
	80 N	34 Hz 86 Hz	15 Hz 72 Hz 103 Hz	20 Hz	12 Hz 47 Hz	23 Hz	13 Hz 64 Hz
8	40 N	39 Hz 82 Hz	13 Hz 55 Hz 102 Hz	86 Hz	11 Hz 39 Hz 103 Hz	17 Hz 75 Hz	11 Hz 33 Hz 91 Hz
	80 N	50 Hz 82 Hz	16 Hz 67 Hz 99 Hz	/	14 Hz	19 Hz	11 Hz 63 Hz 89 Hz
9	40 N	23 Hz 89 Hz	10 Hz 62 Hz 103 Hz	28 Hz 88 Hz	13 Hz 43 Hz	20 Hz 79 Hz	11 Hz 41 Hz
	80 N	32 Hz	12 Hz 100 Hz	26 Hz	12 Hz 48 Hz	22 Hz	10 Hz 71 Hz 87 Hz
10	40 N	25 Hz	11 Hz 75 Hz 103 Hz	26 Hz 93 Hz	15 Hz 46 Hz 108 Hz	25 Hz 77 Hz	15 Hz 43 Hz 89 Hz
	80 N	36 Hz	15 Hz 76 Hz 105 Hz	31 Hz	17 Hz 59 Hz	29 Hz	17 Hz 59 Hz 89 Hz

A l'aide du tableau 4-3, on constate que contrairement aux postures « standards », il ne semble pas exister de conflit entre les différents sujets concernant les zones fréquentielles où

apparaissent leurs minimas et maximas. Il semble possible d'identifier dans les réponses du système main-bras des caractéristiques communes entre sujets en postures « cyclistes ». Contrairement aux postures « standards », le buste est incliné vers l'avant en postures « cyclistes ». Cette différence doit réduire la variabilité entre sujets.

Si des caractéristiques communes existent pour ces dix sujets, on peut émettre l'hypothèse que ces caractéristiques communes existent quels que soient les sujets considérés. On parle de caractéristiques universelles du système main-bras. Cette hypothèse est une originalité du doctorat. Elle permet d'envisager une réduction de vibration qui soit valable quel que soit le sujet à partir de l'analyse de la réponse biodynamique du système main-bras. Cette notion est appelée « Gain Universel ».

4.4.3 La possibilité d'un Gain Universel en postures « cyclistes »

Dans le contexte d'interactions Humain – structure, le « Gain Universel » peut être défini en deux parties. Premièrement, « Gain » signifie une amélioration de performance (c.-à-d. une réduction des vibrations transmises). Deuxièmement, « Universel » signifie que le gain est atteint pour n'importe quel sujet. Par conséquent, dans notre cas d'étude, le concept de « Gain Universel » est la capacité d'obtenir une réduction des vibrations transmises au système main-bras pour n'importe quel sujet.

Afin de comprendre la démarche d'identification d'un potentiel « Gain Universel », le lien entre impédance du système main-bras et puissance vibratoire transmise au niveau de la main est rappelé dans l'équation suivante :

$$P_{main}(\omega) = \operatorname{Re} \left[Z_{II}^{main}(\omega) \right] |V_I(\omega)|^2 \quad (4.1)$$

Où $V_I(\omega)$ est la vitesse rms à l'interface avec la main.

D'un point de vue biodynamique, une analyse d'intra- et d'intervariabilité est préalable à l'identification d'un potentiel « Gain Universel ». Lors de l'analyse des réponses biodynamiques du système main-bras de plusieurs sujets, les minima et maxima qui se

produisent à la même fréquence doivent être identifiés. À vitesse constante, les minima d'impédance correspondent à des zones fréquentielles où la puissance transmise sera plus faible que les zones fréquentielles environnantes et les maxima correspondent à des zones où la puissance vibratoire transmise sera plus élevée que les zones fréquentielles environnantes.

Formulation du concept

S'il existe au moins un maximum qui soit identique pour tous les sujets, cela signifie que cette zone fréquentielle correspond à une zone où la puissance vibratoire transmise au système main-bras est plus élevée que les zones fréquentielles environnantes pour tous les sujets. Dans un contexte d'interaction entre Humain et structure vibrante, cette zone fréquentielle correspond à une zone où le comportement dynamique de la structure doit être amélioré afin de réduire les vibrations transmises quel que soit le sujet. Inversement, s'il existe au moins un minimum qui soit identique pour tous les sujets, cela signifie que cette zone fréquentielle correspond à une zone où la puissance vibratoire transmise au système main-bras est plus faible que les zones fréquentielles environnantes pour tous les sujets. Cette zone de fréquences pourrait être favorisée dans un contexte d'optimisation du comportement dynamique de la structure en contact avec le corps humain.

Afin d'identifier un potentiel « Gain Universel », deux étapes préalables sont nécessaires. L'analyse d'intravariabilité permet d'identifier tout gain potentiel pour un individu (Gain Individuel). L'analyse d'intervariabilité permet d'identifier tout gain potentiel pour un ensemble d'individus (Gain Interindividuel). Une fois l'identification d'un Gain Interindividuel effectuée, ce gain devient « Universel » s'il conserve ses caractéristiques pour tous sujets potentiellement ajoutés à l'étude.

Mathématiquement, la variabilité d'impédance du système main-bras pour un sujet et une configuration spécifique (posture, forces de contact, ...) peut être définie par le terme suivant :

$$\Delta Z_{II}^{\text{main}_-1}(\omega) \quad (4.2)$$

Où $\Delta Z_{II}^{\text{main}_-1}(\omega)$ représente la variabilité de l'impédance du système main-bras pour le sujet 1 obtenue grâce à plusieurs mesures successives pour la même configuration.

L'intravariabilité pour ce sujet, en termes d'impédance de son système main-bras pour k configurations différentes, peut être définie par l'ensemble suivant :

$$\left\{ \Delta Z_{II}^{\text{main}_1}_{\text{configuration}_1}(\omega); \Delta Z_{II}^{\text{main}_1}_{\text{configuration}_2}(\omega); \dots; \dots; \Delta Z_{II}^{\text{main}_1}_{\text{configuration}_k}(\omega) \right\} \quad (4.3)$$

Lors de l'analyse des minima et des maxima pour ce sujet, il est possible d'identifier un « gain individuel ». Ce gain individuel correspond à l'ensemble des minima et maxima communs qui seraient identifiés en fonction des k configurations testées. Il peut être défini comme l'union mathématique des différents termes de l'ensemble de l'équation (4.3) précédente :

$$\bigcup_{i=1}^k \Delta Z_{II}^{\text{main}_1}_{\text{configuration}_i}(\omega) \quad (4.4)$$

L'intervariabilité entre n sujets, en termes d'impédance de leurs systèmes main-bras pour une configuration spécifique i peut être définie par l'ensemble suivant :

$$\left\{ \Delta Z_{II}^{\text{main}_1}_{\text{configuration}_i}(\omega); \Delta Z_{II}^{\text{main}_2}_{\text{configuration}_i}(\omega); \dots; \dots; \Delta Z_{II}^{\text{main}_n}_{\text{configuration}_i}(\omega) \right\} \quad (4.5)$$

Lors de l'analyse des minima et des maxima, il est possible d'identifier un « gain interindividuel ». Ce gain interindividuel correspond à l'ensemble des minima et maxima communs qui seraient identifiées en fonction des k configurations testées pour les n sujets. Il peut être défini comme l'union des gains individuels identifiés pour tous les sujets :

$$\bigcup_{j=1}^n \left(\bigcup_{i=1}^k \Delta Z_{II}^{\text{main}_j}_{\text{configuration}_i}(\omega) \right) \quad (4.6)$$

A partir du tableau 4-3 et de la définition donnée par l'équation (4.4), il est possible d'identifier les gains individuels en termes de maxima et minima d'impédance du système main-bras en postures « cyclistes » pour les dix sujets. Le tableau suivant présente l'identification des gains individuels en termes de minimas et maximas pour l'ensemble des postures « cyclistes » et des forces de poussée. Chaque ligne de ce tableau correspond à un gain individuel.

Tableau 4-4 : Identification des zones de minima et maxima communes à toutes les configurations en fonction des différents sujets (Identification des gains individuels)

Sujets	Ensemble des postures cyclistes A, B et C et ensemble des forces de poussée	
	Minima	Maxima
1	18-36 Hz ; 89-91 Hz	10-13 Hz ; 45-74 Hz ; 85 Hz ; 100-108 Hz
2	22-36 Hz ; 93-98 Hz	9-17 Hz ; 57-75 Hz ; 111-115 Hz
3	18-28 Hz ; 79-98 Hz	9-18 Hz ; 34-79 Hz ; 104-116 Hz
4	20-45 Hz ; 79 Hz	8-15 Hz ; 56-79 Hz ; 93-112 Hz
5	18-36 Hz ; 81-90 Hz	9-15 Hz ; 44-70 Hz ; 92-109 Hz
6	20-28 Hz ; 86-91 Hz	8-13 Hz ; 42-81 Hz ; 102-104 Hz
7	17-34 Hz ; 78-87 Hz	10-15 Hz ; 34-72 Hz ; 103 Hz
8	17-19 Hz ; 39-50 Hz ; 75-86 Hz	11-15 Hz ; 33-39 Hz ; 55-67 Hz ; 89-103 Hz
9	20-32 Hz ; 79-89 Hz	10-13 Hz ; 41-48 Hz ; 87-103 Hz
10	25-36 Hz ; 77-93 Hz	11-17 Hz ; 43-76 Hz ; 89-108 Hz

Le tableau 4-4 présente l'identification des zones fréquentielles où les minima et maxima apparaissent pour chaque sujet. L'identification est effectuée en considérant l'ensemble des configurations de postures « cyclistes » et de forces de poussée. On constate qu'il est possible d'identifier un gain individuel pour chaque sujet. Ce gain individuel correspond à des caractéristiques communes à l'ensemble des postures « cyclistes » et des forces de poussée étudiées.

A partir du tableau 4-4 et de la définition donnée par l'équation (4.6), il est possible d'identifier un gain interindividuel en fonction des gains individuels pour les dix sujets. En effet, la combinaison de l'ensemble des lignes du tableau 4-4 constitue l'identification d'un gain interindividuel en postures « cyclistes ». Le tableau suivant présente l'identification du gain interindividuel en termes de minimas et maximas pour l'ensemble des postures « cyclistes », des forces de poussée et des sujets.

Tableau 4-5 : Identification des zones de minima et maxima communes à toutes les configurations et à tous les sujets (Identification du gain interindividuel)

Gain Interindividuel pour les 10 sujets	Ensemble des postures cyclistes A, B et C et ensemble des forces de poussée		
	Minima	Zones de transition	Maxima
	19-32 Hz ; 81-84 Hz	17-18 Hz ; 33-50 Hz 77-81 Hz ; 85-98 Hz	8-16 Hz ; 51-76 Hz ; 99-116 Hz

Il est possible d'identifier à l'aide du tableau 4-5 des zones fréquentielles où les minima se produisent pour l'ensemble des configurations et l'ensemble des dix sujets testés. Il en est de même pour les maxima. Cependant, certaines zones fréquentielles correspondent à la fois à des zones de minima pour certains sujets et des zones de maxima pour d'autres. Ces zones sont appelées zones de transition. Elles correspondent à des zones où aucune conclusion ne peut être obtenue pour l'ensemble des sujets.

Ces résultats montrent que des caractéristiques communes peuvent être obtenues en postures « cyclistes » pour les dix sujets testés, ce qui n'était pas le cas pour les postures « standards ». Avec l'obtention de ces zones fréquentielles communes pour l'ensemble des sujets, un « Gain Universel » en postures « cyclistes » est envisageable. Comme il a été mentionné auparavant, ce « Gain Universel » correspondrait à l'identification de caractéristiques communes pour n'importe quels sujets. Dans notre cas, nous disposons de dix sujets. Afin de réduire le facteur chance associé à la détermination de caractéristiques communes, deux nouveaux sujets sont ajoutés à l'étude. Le Tableau 4-6 présente les détails morphologiques de ces nouveaux sujets.

Tableau 4-6 : Détails morphologiques de base des deux sujets ajoutés à l'étude

Sujets	Taille (cm)	Masse (kg)
Sujet 11	188	77
Sujet 12	180	70

Pour ces deux nouveaux sujets, seules les postures « cyclistes » sont testées. La procédure de tests est identique à celle utilisée pour les dix sujets précédents. L'ajout de ces deux individus a pour but de renforcer le gain interindividuel identifié pour les dix sujets précédents et ainsi confirmer la possibilité d'existence d'un « Gain Universel » en postures « cyclistes ». Les figures suivantes illustrent les réponses biodynamiques du système main-bras de ces deux sujets pour chacune des configurations en postures « cyclistes ».

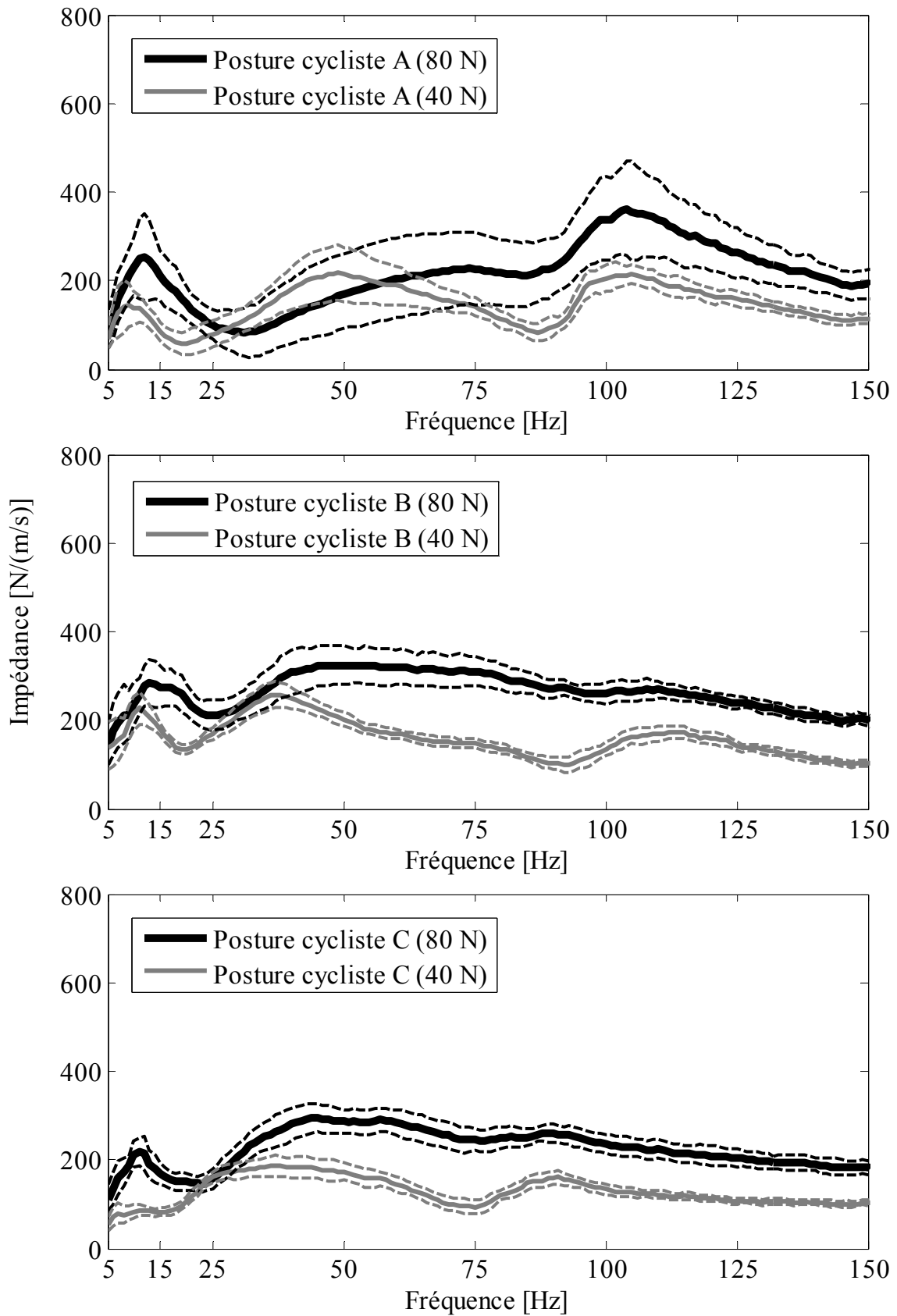


Figure 4-31 : Impédance du système main-bras en postures « cyclistes » pour le sujet 11

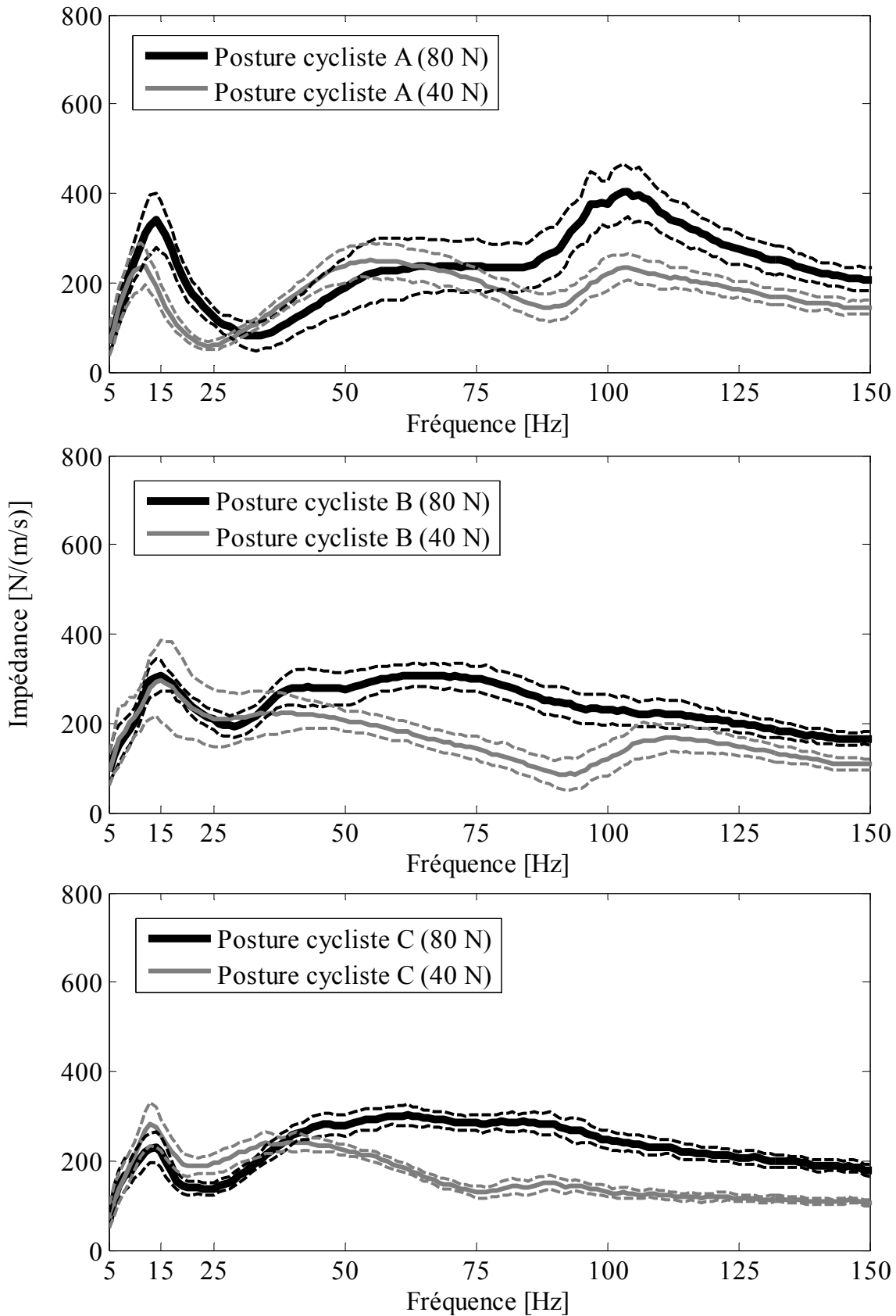


Figure 4-32 : Impédance du système main-bras en postures « cyclistes » pour le sujet 12

Comme pour les dix autres sujets, un tableau permettant de localiser les minimas et maximas sur ces courbes d'impédance est développé (figure 4-31 et figure 4-32).

Tableau 4-7 : Détermination des maxima et minima sur les courbes d'impédance du système main-bras en postures « cyclistes » pour les deux nouveaux sujets

Sujets	Forces de poussée	Posture « cycliste » A		Posture « cycliste » B		Posture « cycliste » C	
		Minima	Maxima	Minima	Maxima	Minima	Maxima
11	40 N	19 Hz 87 Hz	9 Hz 49 Hz 105 Hz	20 Hz 92 Hz	11 Hz 37 Hz 113 Hz	75 Hz	36 Hz 91 Hz
	80 N	31 Hz 84 Hz	12 Hz 74 Hz 104 Hz	26 Hz	13 Hz 49 Hz	23 Hz	11 Hz 45 Hz
12	40 N	24 Hz 88 Hz	12 Hz 53 Hz 104 Hz	30 Hz 90 Hz	15 Hz 40 Hz 112 Hz	21 Hz 77 Hz	13 Hz 41 Hz 89 Hz
	80 N	32 Hz	14 Hz 104 Hz	29 Hz	14 Hz 40 Hz 67 Hz	24 Hz	14 Hz 62 Hz

En comparant l'identification des minima et maxima pour ces deux sujets (tableau 4-7) avec l'identification des zones de gain interindividuel pour les dix sujets précédents (tableau 4-5), on constate que seulement un minimum (celui à 75 Hz) n'est ni dans la zone de minima, ni dans la zone de transition du tableau d'identification de gain interindividuel pour les dix sujets. En revanche, l'ensemble des maxima des deux nouveaux sujets est soit dans la zone de maxima du gain interindividuel, soit dans la zone de transition. Ceci signifie qu'une légère modification des zones fréquentielles doit être effectuée pour pouvoir obtenir un gain interindividuel valable pour les douze sujets. La zone de transition de 77-81 Hz devient la zone de transition de 75 à 81 Hz et la zone de maxima de 51-76 Hz devient la zone de maxima de 51-74 Hz. Le tableau suivant présente la synthèse de ces résultats pour les douze sujets.

Tableau 4-8 : Gain Interindividuel pour les douze sujets en postures "cyclistes"

Gain Interindividuel pour les 12 sujets	Ensemble des postures cyclistes A, B et C et ensemble des forces de poussée		
	Minima	Zones de transition	Maxima
	19-32 Hz 81-84 Hz	17-18 Hz 33-50 Hz 75-81 Hz 85-98 Hz	8-16 Hz 51-74 Hz 99-116 Hz

4.5 Conclusion

Ce chapitre a étudié spécifiquement la réponse biodynamique du système main-bras de plusieurs sujets. Diverses mesures sur le système main-bras ont été effectuées en respectant un protocole de tests préalablement établi. La réponse biodynamique du système main-bras est connue pour varier en fonction de nombreux paramètres. L'objectif ici n'étant pas d'évaluer l'influence de ces paramètres sur la réponse du système main-bras, certains paramètres ont été fixés pour correspondre à notre contexte de transmission de vibrations vers les mains du cycliste. Le protocole de mesures définissait une excitation verticale de type aléatoire possédant le même niveau d'accélération (RMS) qu'un signal mesuré sur la route, cinq postures d'étude dont trois postures « cyclistes », plusieurs configurations de forces de poussée et dix sujets.

La réalisation des mesures biodynamiques du système main-bras de plusieurs sujets à l'aide de ce protocole a permis de répondre à l'objectif secondaire « Mesurer la réponse biodynamique du système main-bras de plusieurs sujets afin d'évaluer la variabilité des réponses ». Dans un premier temps, les mesures de réponses biodynamiques du système main-bras des dix sujets ont été réalisées dans des postures dites « standards ». Dans un second temps, les mesures de réponses biodynamiques du système main-bras des dix sujets ont été réalisées dans trois postures « cyclistes ». Ces différentes mesures ont été analysées afin d'étudier la variabilité de réponses entre sujets.

Cette analyse de variabilité de réponses biodynamiques du système main-bras pour les deux postures « standards » révèle que chaque sujet possède une réponse qui lui est spécifique. Cela signifie qu'aucune conclusion commune à un ensemble de sujets ne peut être obtenue pour ces deux postures. Cette conclusion avait déjà été formulée par certains auteurs mentionnant que « tout comme la masse et la taille, les réponses dynamiques du système main-bras sont spécifiques à l'individu » (Dong *et al.*, 2009). Cependant, l'analyse de variabilité pour les trois postures « cyclistes » révèle que des caractéristiques communes aux dix sujets peuvent être identifiées. Sur les courbes d'impédance des sujets, des zones fréquentielles communes ont été identifiées par la présence de minima ou de maxima. Grâce au lien existant entre impédance et

puissance vibratoire, ces minima et maxima d'impédance correspondent respectivement à des minima et maxima de puissance vibratoire potentiellement transmise au corps humain lorsque la vitesse au point de contact entre le système main-bras et la structure vibrante est constante.

L'identification de ces zones communes pour plusieurs sujets conduit à l'hypothèse d'existence d'un « Gain Universel », c.à.d. la possibilité d'identifier des zones fréquentielles communes quels que soient les sujets considérés. L'identification d'un tel « Gain Universel » permettrait d'envisager l'optimisation du comportement dynamique de la structure vibrante comme moyen de réduire les vibrations transmises au corps humain. L'ajout des réponses biodynamiques du système main-bras de deux sujets montre qu'un « Gain Universel » est effectivement envisageable en postures « cyclistes ».

5 PRÉDICTION DE LA PUISSANCE AUX MAINS DU CYCLISTE ET DIFFÉRENCES ENTRE VÉLOS

Ce chapitre introduit la notion de puissance vibratoire. Dans le cadre de ce doctorat, la puissance vibratoire est utilisée comme indicateur afin d'évaluer les vibrations transmises au corps humain et plus particulièrement au système main-bras du cycliste. L'utilisation de la puissance vibratoire permet de répondre à l'objectif secondaire « Identifier un indicateur qui puisse être obtenu par sous-structuration et qui témoigne des vibrations transmises au système main-bras ».

Dans ce chapitre, la puissance vibratoire est utilisée pour caractériser le transfert de vibrations à la main du cycliste. Des mesures sont effectuées sur l'assemblage vélo – cycliste. La puissance transmise mesurée au système main-bras du cycliste est comparée avec les prédictions de puissance par sous-structuration. L'influence du cycliste est alors discutée.

L'approche par sous-structuration est également utilisée afin de mettre en œuvre une méthode permettant de caractériser et classer les vélos en fonction de leur transmissibilité. Cette méthode de caractérisation des vélos seuls est alors analysée. Ceci permet de répondre à l'objectif secondaire « Développer une méthode de caractérisation de la réponse vibratoire des vélos seuls ».

Des mesures de puissance transmise au système main-bras sont effectuées pour 8 vélos. Le protocole expérimental et les montages nécessaires sont présentés. Un classement des différents vélos est obtenu. Ce classement en puissance est utilisé à des fins de validation de la méthode de caractérisation des vélos seuls. Les résultats en transmissibilité de la méthode de caractérisation des vélos seuls sont analysés et comparés avec les résultats en puissance de la méthode expérimentale avec cycliste.

La figure suivante illustre de manière schématique l'organisation des réalisations présentées dans ce chapitre.

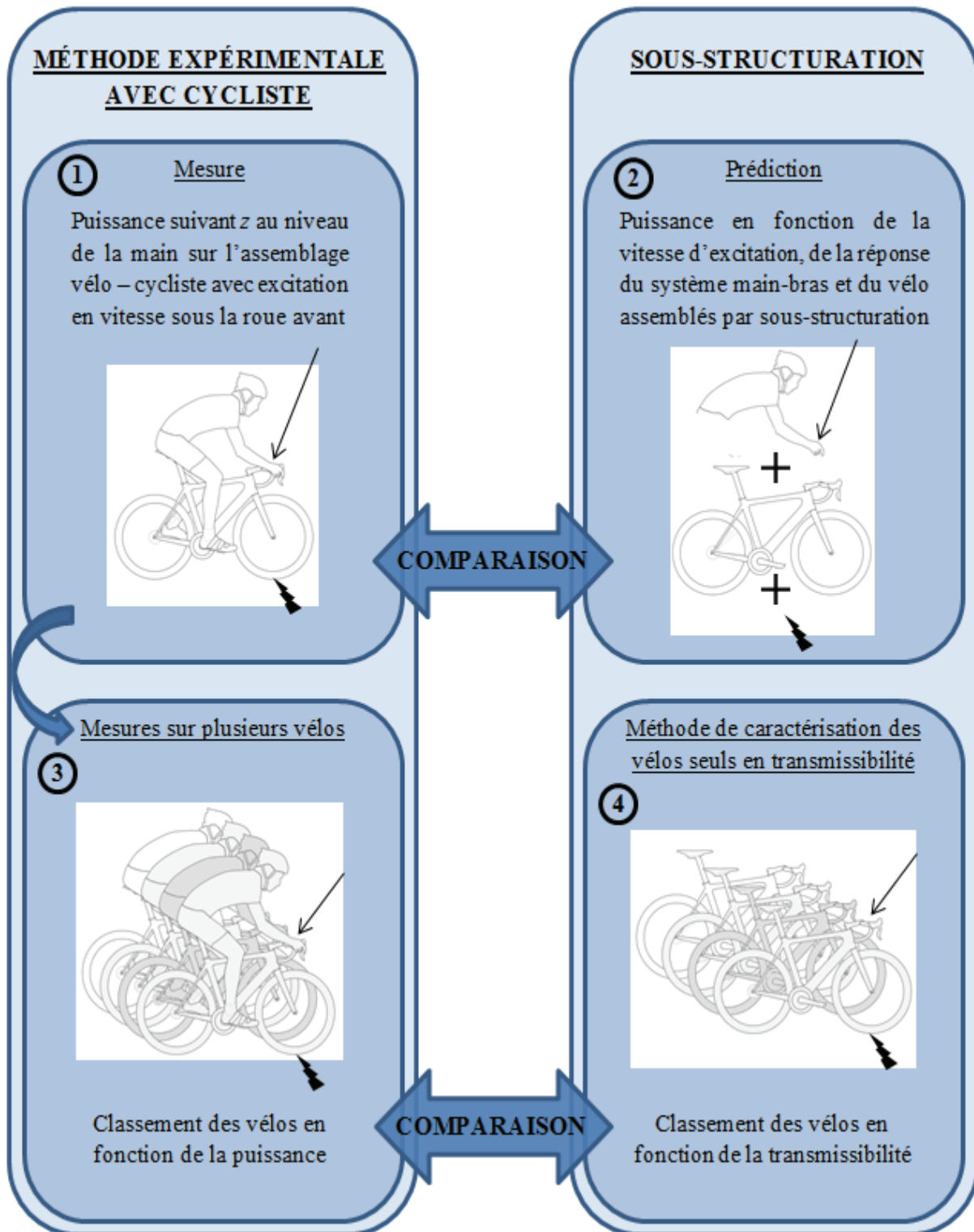


Figure 5-1 : Schéma de l'organisation du chapitre 5

5.1 La puissance : un critère révélateur des vibrations transmises

La puissance vibratoire semble un bon critère d'évaluation des vibrations transmises. En effet, une corrélation raisonnablement bonne entre la puissance vibratoire absorbée par le corps humain exposé à une sollicitation de type « vibrations du corps entier » (Whole-Body Vibration) et une sensation subjective de confort a été rapportée par le passé (Pradko *et al.*, 1965). Une étude récente émet l'hypothèse que la dépendance fréquentielle de la réponse biodynamique du système main-bras pourrait jouer un rôle important dans la détermination d'une courbe de pondération représentative des effets liés à une sollicitation vibratoire (Dong *et al.*, 2012). Par exemple, il a été démontré que la dépendance fréquentielle de la puissance vibratoire absorbée par le système main-bras (Dong *et al.*, 2006) est similaire à l'actuelle pondération en fréquences servant à l'évaluation des risques liés à l'exposition aux vibrations transmises à la main (ISO-5349, 2001). Cette pondération fut principalement déterminée sur la base de courbes de sensation de confort de l'ensemble du système main-bras (Miwa, 1967).

5.1.1 Développement des équations de la puissance vibratoire

Dans cette section, la définition mathématique de la puissance vibratoire est présentée. Les équations d'obtention de la puissance vibratoire sont développées sous plusieurs formats. La dualité temps – fréquences des mesures de puissance vibratoire est exposée. Le lien existant entre impédance et puissance est également présenté sous forme d'équation. Ce lien mathématique permet l'utilisation sous forme de puissance des mesures de réponses biodynamiques effectuées dans le chapitre précédent en impédance. La puissance transmise aux systèmes mains-bras des différents sujets peut ainsi être évaluée.

En physique, la puissance est la quantité d'énergie par unité de temps fournie par un système à un autre. L'énergie est la capacité d'un système à produire un travail, entraînant un mouvement. La puissance mécanique d'une force est définie comme l'énergie que l'on peut acquérir ou perdre avec cette force sur un temps donné.

Si le point d'application d'une force \vec{F} (N) se déplace à la vitesse instantanée \vec{v} (m/s), la puissance instantanée se calcule par la produit scalaire de la force par la vitesse :

$$P = \vec{F} \cdot \vec{v} \quad (5.1)$$

Considérons $f(t)$ et $v(t)$ coaxiaux représentant respectivement les signaux temporels de cette force et de cette vitesse, on définit la puissance instantanée par :

$$p(t) = f(t)v(t) \quad (5.2)$$

La puissance moyenne peut être définie de la manière suivante :

$$P_m = \frac{1}{T} \int_0^T f(t)v(t) dt \quad (5.3)$$

Considérons maintenant une excitation harmonique avec :

$$v(t) = V \cos(\omega t) \quad (5.4)$$

$$f(t) = F \cos(\omega t + \varnothing) \quad (5.5)$$

Où ω est la fréquence angulaire et \varnothing la phase entre la force et la vitesse.

A l'aide de l'équation (5.3) et de ces deux formulations (5.4) et (5.5), la puissance moyenne à la fréquence angulaire ω s'exprime après calculs de la manière suivante :

$$P_m(\omega) = \frac{1}{2} FV \cos \varnothing \quad (5.6)$$

Dans le cas de notations complexes telles que :

$$\mathbf{V} = V e^{j\omega t} \quad (5.7)$$

$$\mathbf{F} = F e^{j(\omega t + \varnothing)} \quad (5.8)$$

La puissance moyenne peut s'exprimer de la manière suivante :

$$\mathbf{P}_m(\omega) = \frac{1}{2} \text{Re}[\mathbf{FV}^*] \quad (5.9)$$

Cette formulation permet de faire apparaître le lien existant entre la puissance et l'impédance mécanique. En effet, l'impédance est définie comme le ratio entre force et vitesse. Il est alors possible d'exprimer la force en fonction de l'impédance et de la vitesse :

$$\mathbf{F} = \mathbf{ZV} \quad (5.10)$$

On obtient l'expression de la puissance moyenne en fonction de l'impédance et de la vitesse :

$$\mathbf{P}_m(\omega) = \frac{1}{2} \text{Re}[\mathbf{ZVV}^*] \quad (5.11)$$

Cette relation permet d'établir le lien existant entre puissance et impédance mécanique par l'intermédiaire de la vitesse associée.

$$\mathbf{P}_m(\omega) = \frac{1}{2} \text{Re}[\mathbf{Z}] |\mathbf{V}|^2 \quad (5.12)$$

5.1.2 Équations de prédiction de la puissance par sous-structuration

Dans cette section, les équations propres à une caractérisation en puissance par sous-structuration sont développées. Dans le cas d'un assemblage entre deux structures « a » et « b » (figure 5-2), la puissance moyenne à l'interface entre ces deux structures peut s'exprimer de la manière suivante :

$$\mathbf{P}_I^{ab}(\omega) = \frac{1}{2} \text{Re}[\mathbf{Z}_{II}^{ab}] |\mathbf{V}_I^{ab}|^2 \quad (5.13)$$

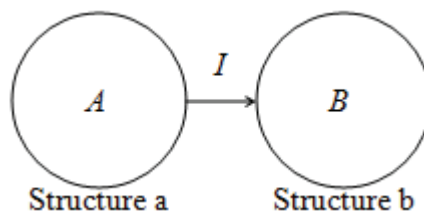


Figure 5-2 : Illustration d'un assemblage de deux structures a et b avec interface I

On parle de transfert de puissance entre ces deux structures. En utilisant la relation (5.14) de couplage par impédance entre deux structures, il est possible d'exprimer la puissance à l'interface entre ces deux structures à l'aide de l'impédance des deux structures séparément :

$$\mathbf{Z}_{II}^{ab} = \mathbf{Z}_{II}^a + \mathbf{Z}_{II}^b \quad (5.14)$$

$$\mathbf{P}_I^{ab}(\omega) = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left[\mathbf{Z}_{II}^a + \mathbf{Z}_{II}^b \right] \left| \mathbf{V}_I^{ab} \right|^2 \quad (5.15)$$

Dans l'équation (5.15), la vitesse à l'interface n'est pas caractérisée pour « a » et « b » séparément mais pour l'assemblage « ab ». Pour prédire la puissance à l'interface par caractérisation du comportement dynamique des deux structures de manière complètement séparée, il est nécessaire d'exprimer la vitesse à l'interface de l'assemblage en fonction de chaque structure de manière complètement indépendante.

Dans le contexte du cycliste sur son vélo, la plupart des vibrations générées par la route et transmises au cycliste ont lieu suivant l'axe z . La prédiction de la puissance à l'interface se fera donc uniquement suivant l'axe vertical z . L'équation (5.15) est reformulée pour présenter uniquement l'axe vertical z :

$$P_{Iz}^{ab}(\omega) = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left[Z_{IzIz}^a + Z_{IzIz}^b \right] \left| V_{Iz}^{ab} \right|^2 \quad (5.16)$$

La structure « a » représente le vélo et la structure « b » représente le cycliste. L'excitation que subit le cycliste sur son vélo provient originellement de l'excitation générée par la route sous les pneus. Cette excitation se propage au sein de la structure « a » générant ainsi une puissance entre la structure « a » et la structure « b » au niveau de l'interface I . Ceci signifie donc que la vitesse d'interface au sein de l'assemblage « ab » dépend à la fois de la vitesse d'excitation de la route et de la dynamique des structures « a » (le vélo) et « b » (le cycliste).

La première étape consiste à décomposer la vitesse à l'interface en fonction de l'excitation générée par la route :

$$P_{Iz}^{ab}(\omega) = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left[Z_{IzIz}^a + Z_{IzIz}^b \right] \left| \frac{V_{Iz}^{ab}}{V_{\text{route}}} \right|^2 \left| V_{\text{route}} \right|^2 \quad (5.17)$$

On constate que le terme $\left| \frac{V_{Iz}^{ab}}{V_{route}} \right|$ est un terme de transmissibilité entre réponse en vitesse au niveau de l'interface et vitesse d'excitation par la route pour l'assemblage « ab ». La seconde étape consiste à exprimer ce terme en fonction des structures « a » et « b » prises séparément.

D'après l'annexe 8.1, dans le cas d'une excitation par la base contrôlée en vitesse sur un assemblage composé de deux structures « a » et « b », il est possible d'exprimer la vitesse à l'interface de l'assemblage « ab » en fonction de la vitesse à l'interface sur la structure « a » seule et de l'impédance à l'interface des deux structures prises séparément. Cette relation est présentée à l'aide de l'équation suivante :

$$\left| V_{Iz}^{ab} \right| = \left| V_{Iz}^a \right| \left| \frac{Z_{IzIz}^a}{Z_{IzIz}^a + Z_{IzIz}^b} \right| \quad (5.18)$$

En insérant la relation (5.18) au sein de l'équation (5.17), on obtient :

$$P_{Iz}^{ab}(\omega) = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left[Z_{IzIz}^a + Z_{IzIz}^b \right] \left| \frac{Z_{IzIz}^a}{Z_{IzIz}^a + Z_{IzIz}^b} \right|^2 \left| \frac{V_{Iz}^a}{V_{route}} \right|^2 \left| V_{route} \right|^2 \quad (5.19)$$

Cette équation (5.19) permet de prédire la puissance à l'interface de l'assemblage « ab » en fonction des deux structures prises séparément. L'obtention de cette équation permet d'atteindre l'objectif secondaire « Identifier un indicateur qui puisse être obtenu par sous-structuration et qui témoigne des vibrations transmises au système main-bras ».

Cette équation permet également d'envisager l'évaluation de la contribution de chacune des structures impliquées dans l'assemblage. En effet, la puissance à l'interface entre deux structures « a » et « b » peut être exprimée en fonction de la structure « a » seule, de la structure « b » seule et des caractéristiques de la route. Si l'on retire les caractéristiques de la structure « a », on obtient la contribution de la structure « b » sur la puissance à l'interface de l'assemblage « ab ». Inversement, si l'on retire les caractéristiques de la structure « b », on obtient la contribution de la structure « a » sur la puissance à l'interface de « ab ».

Par exemple, si Z_{lzlz}^b est petit devant Z_{lzlz}^a , la puissance devient approximativement $P_{lzlz}^{ab}(\omega) = \frac{1}{2} \operatorname{Re} [Z_{lzlz}^a] |V_{lzlz}^a|^2$. Elle ne dépend donc que de la structure « source ». Dans le cas du cycliste sur son vélo, cette approche permet d'évaluer la contribution relative du système main-bras et du vélo sur la puissance à l'interface de la main.

Finalement, cette équation de prédiction peut être utilisée afin de prédire la puissance à l'interface de la main lorsque le cycliste est sur son vélo. Afin de pouvoir valider ces futures prédictions, des mesures de puissance à l'interface avec la main sont effectuées sur l'assemblage vélo – cycliste.

5.1.3 Mesures de la puissance transmise au niveau des mains lors d'une sollicitation verticale sous le vélo de route

Les mesures de puissance à l'interface entre la main du cycliste et le vélo sont décrites dans cette section (Partie 1 de la figure 5-1). Lors de la réalisation de ces mesures, un vélo spécifique est utilisé ainsi qu'un seul cycliste. En effet, l'objectif ici n'est pas d'étudier la variabilité de puissance transmise en fonction du cycliste et du vélo mais plutôt de valider la précision des prédictions obtenues en puissance à l'interface entre la main du cycliste et le vélo. Le vélo utilisé est un Cervélo R3 dont la taille du cadre est 56 cm. Ce vélo est celui dont les dimensions ont été utilisées lors des mesures d'espacement entre composants nécessaires pour la réalisation des mesures biodynamiques du système main-bras en postures cyclistes (4.3 – Le système main-bras en postures « cyclistes »).

Trois postures cyclistes ont été utilisées pour la mesure de la réponse biodynamique du système main-bras droit. Sachant que la prédiction de la puissance dépend des caractéristiques de la route (vitesse), de celles du vélo et de celles du cycliste, seules ces postures peuvent être utilisées. Par ailleurs, afin de valider la prédiction de la puissance obtenue, un capteur de puissance est nécessaire afin de mesurer la puissance réellement transmise à l'interface entre la main du cycliste et le vélo. Le laboratoire VélUS dispose d'un tel capteur composé d'une

cocotte instrumentée permettant de mesurer à la fois force et vitesse nécessaires à la détermination de la puissance. Les descriptions concernant cette cocotte instrumentée sont disponibles en annexe 8.2. Sachant que la réponse biodynamique du système main-bras dépend de nombreux paramètres, la réalisation des mesures de puissance sur l'assemblage vélo – cycliste doit reprendre les mêmes caractéristiques que celles utilisées lors des mesures de la réponse biodynamique du système main-bras en posture cycliste avec mains sur les cocottes. La figure suivante illustre la posture avec mains sur les cocottes lors des mesures de puissance sur vélo.



Figure 5-3 : Illustration du positionnement du cycliste lors des mesures de puissance à la main à l'aide de la cocotte instrumentée

La force de poussée exercée par le cycliste est contrôlée à l'aide de la force statique mesurée par la cocotte instrumentée. La force de poussée verticale utilisée est 80 N. Cette force de poussée correspond à une des configurations testées lors des mesures de réponse biodynamique du système main-bras en postures cyclistes. Étant donné la posture du cycliste, une force de poussée horizontale est nécessairement appliquée par celui-ci. Aucun dispositif de mesures ne permettant au cycliste de contrôler cette force pendant les tests, des essais préliminaires de positionnement à l'aide du capteur AMTI 6 D ont permis de révéler que la force de poussée exercée horizontalement varie entre 20 et 50 N lorsque le cycliste applique 80 N verticalement.

Cependant, des mesures complémentaires ont permis de statuer que cette variation de force horizontale de la part de la main du cycliste n'a pas d'influence sur les mesures verticales au niveau de la cocotte sur le vélo.

Lors de la réalisation des mesures, une excitation est fournie sous la roue avant uniquement à l'aide du système d'excitation XCITE (figure 5-4).

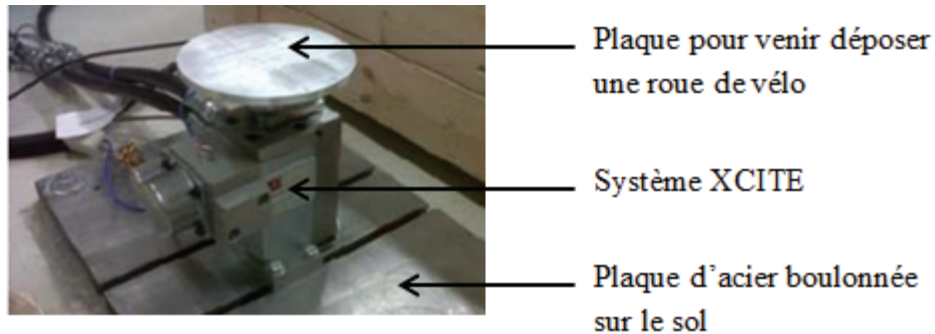


Figure 5-4 : Visualisation d'un piston du système XCITE fixé sur une plaque d'acier boulonnée sur le sol avec une plaque sur le dessus permettant de venir déposer une des roues du vélo

Le signal d'excitation utilisé lors des essais est celui de la route de référence du Mont-Orford.

La figure suivante présente la densité spectrale de puissance de ce signal de route $|V_{route}|^2$.

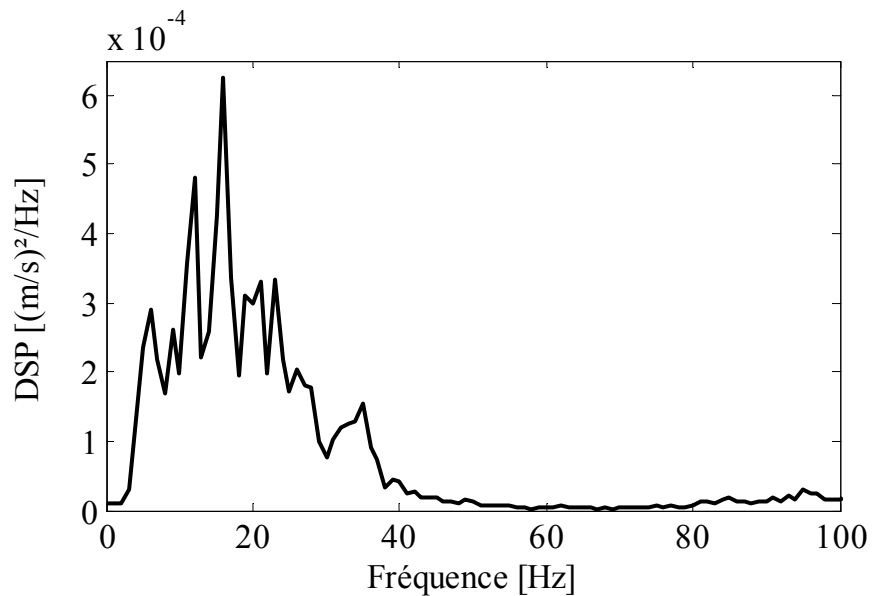


Figure 5-5 : Densité spectrale de puissance (DSP) de la route de référence utilisée au laboratoire VélUS

Pendant les tests, les mesures sont effectuées avec un signal de route de 30 secondes et répétées cinq fois pour évaluer l'incertitude. Les résultats obtenus pour une posture avec mains aux cocottes et une force de poussée de 80 N sont les suivants : la puissance moyenne transmise à la main de ce cycliste sur ce vélo est de 1,64 W. Il est sûr à 95 % que la puissance moyenne transmise à la main soit comprise entre 1,52 et 1,76 W lors de ces tests.

La figure suivante présente le spectre de la puissance moyenne pour la main correspondant aux 30 s de test sur la plage de fréquences [0 ; 100] Hz. La courbe en trait plein représente la moyenne des cinq mesures de répétabilité et les traits pointillés autour de cette courbe en trait plein représentent l'intervalle de confiance à 95 %.

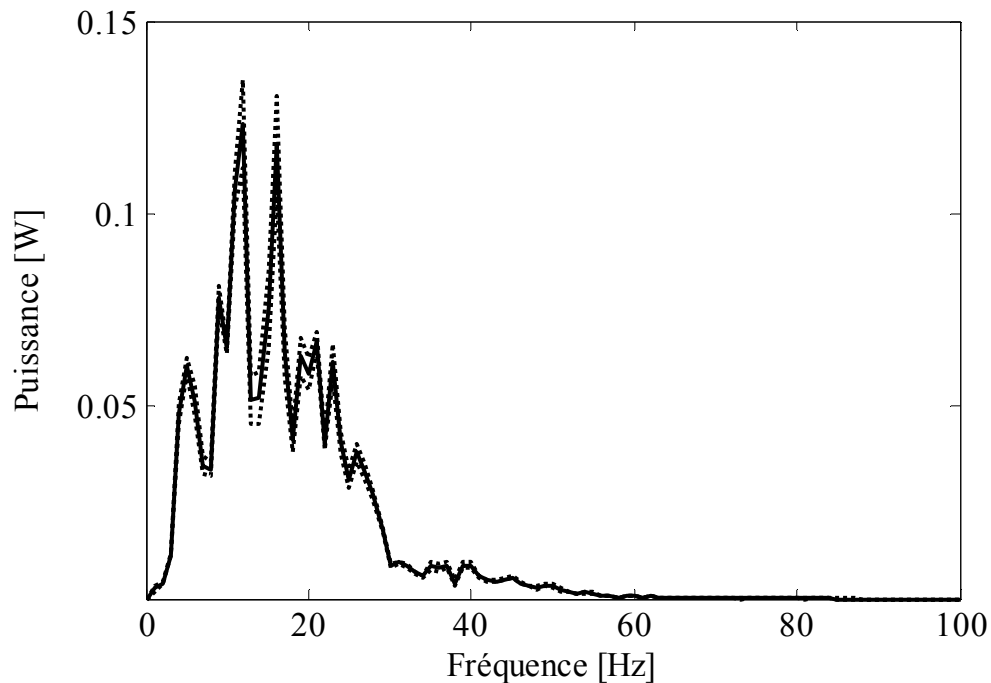


Figure 5-6 : Spectre de puissance moyenne pour la main sur un Cervélo R3

A l'aide de la figure 5-5 et de la figure 5-6, on constate que la forme du spectre de puissance mesurée au niveau de la cocotte instrumentée est fortement semblable à la forme de la densité spectrale de puissance du signal de route injecté au système. Ceci nous informe de la dépendance qu'il existe entre la puissance mesurée au niveau de la main du cycliste et le signal d'excitation utilisé.

Les résultats de la figure 5-6 montrent qu'il y a majoritairement de la puissance transmise au niveau de la main du cycliste entre 0 et 60 Hz. Cette puissance se concentre notamment entre 5 et 30 Hz avec de multiples pics dont les deux ayant la plus grande amplitude se trouvent à 12 et 16 Hz. Cette mesure de puissance devient désormais la valeur cible pour la prédiction de puissance par sous-structuration au niveau de la main entre cycliste et vélo.

5.1.4 Comparaison entre mesures de puissance directement sur l'assemblage vélo – cycliste et prédiction à l'aide d'une méthode de sous-structuration

Cette section correspond à la comparaison entre la partie 1 et la partie 2 du schéma de la Figure 5-1. Dans le cas de l'interface entre la main du cycliste et son vélo, nous connaissons désormais la réponse en puissance grâce à la mesure effectuée directement sur l'assemblage. Nous savons également que le spectre de puissance au niveau de la main est très dépendant du signal de route utilisé.

L'avantage de la formulation par sous-structuration est de pouvoir évaluer l'influence de chacune des structures. Nous avons décrit précédemment que l'équation (5.19) pouvait être utilisée pour évaluer la contribution de chacune des structures impliquée dans l'assemblage. Prenons dans un premier temps le cas où l'excitation de la route (vitesse) serait injectée directement à la main du cycliste. Cette configuration correspondrait au cas où la main serait déposée directement sur un pot vibrant dans la posture associée. La puissance transmise à la main correspondant à cette configuration peut être prédite de la manière suivante :

$$P_{Lz}^{\text{main}}(\omega) = \frac{1}{2} \text{Re} \left[Z_{LzLz}^{\text{main}} \right] |V_{\text{route}}|^2 \quad (5.20)$$

Il n'y a aucun vélo dans la formulation. Les caractéristiques de la route (figure 5-5) ainsi que les caractéristiques biodynamiques du système main-bras correspondant à cette configuration sont insérées dans l'équation (5.20). Cette configuration permet alors de connaître la contribution du système main-bras sur la puissance à l'interface entre le vélo et le cycliste au niveau de sa main.

La figure suivante présente une comparaison entre la puissance moyenne mesurée à l'interface entre la main du cycliste et le Cervélo R3 à l'aide de la cocotte instrumentée (figure 5-6) et la prédiction de puissance en utilisant l'équation (5.20). La réponse biodynamique du système main-bras utilisée pour obtenir la prédiction est l'impédance moyenne obtenue pour la posture cycliste avec les mains sur les cocottes et une force de poussée de 80 N.

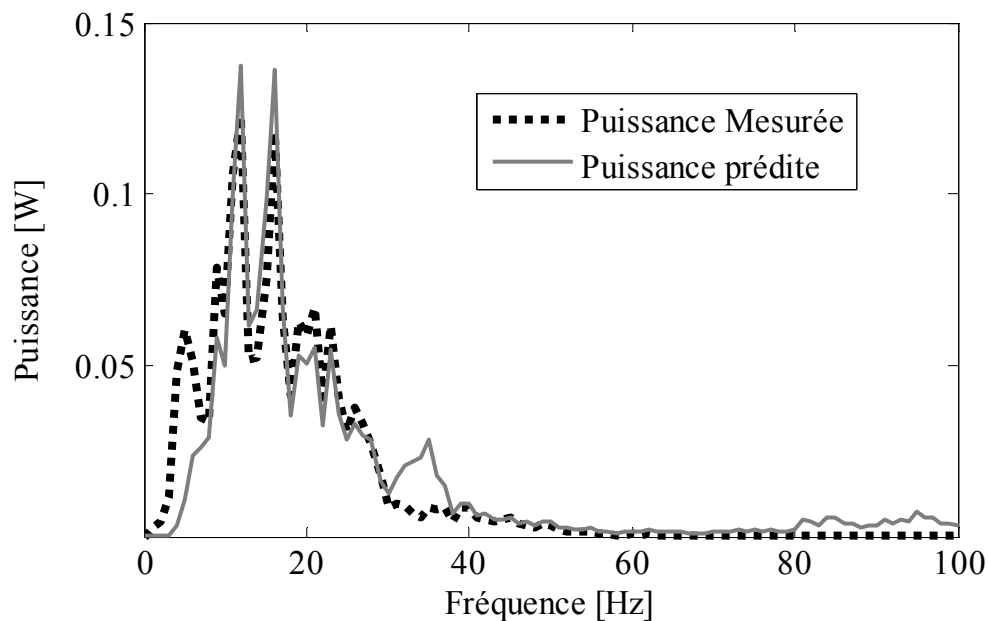


Figure 5-7 : Comparaison entre puissance mesurée au niveau de la cocotte sur l'assemblage cycliste - Cervélo R3 et puissance prédite lorsque seules les caractéristiques dynamiques de la route et du système main-bras du cycliste sont prises en compte

La figure 5-7 montre qu'il est possible d'obtenir une prédiction relativement fiable entre 8 et 30 Hz pour la puissance à l'interface entre la main du cycliste et son vélo en prenant uniquement en compte la vitesse du profil de la route et les caractéristiques du système main-bras dans la configuration associée (posture et force de poussée). La prédiction de puissance moyenne sur la plage de fréquence [0 ; 100] Hz donne 1,69 W pour une valeur moyenne réellement mesurée de 1,64 W, soit seulement 3 % d'erreur.

Il faut noter cependant que la prédiction en termes de fréquences n'est pas parfaite. D'après les résultats obtenus pour la réponse en impédance du système main-bras en postures cyclistes, on sait qu'il existe une zone d'incertitude autour de l'impédance moyenne. La figure 5-8 présente l'intervalle de confiance à 95 % pour la puissance prédite en fonction de l'incertitude sur la réponse biodynamique du système main-bras.

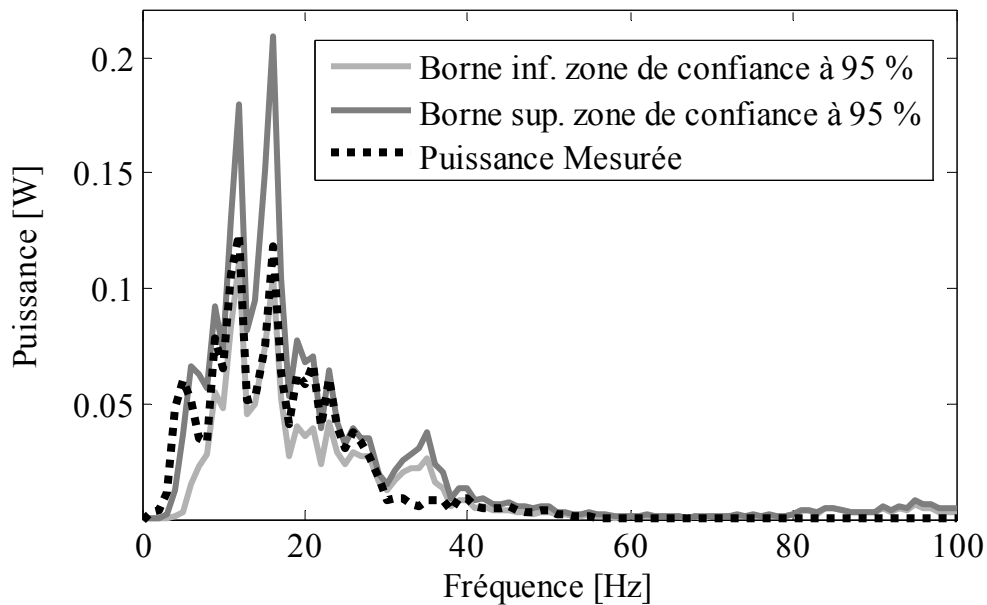


Figure 5-8 : Comparaison entre la puissance mesurée au niveau de la main du cycliste sur son vélo et l'intervalle de confiance à 95 % pour la puissance prédite lorsque seules les caractéristiques de la route et du système main-bras sont utilisées

On constate grâce à la figure 5-8 que l'intervalle de confiance à 95 % pour la prédiction de la puissance englobe majoritairement la mesure de puissance effectuée directement sur l'assemblage vélo – cycliste au niveau de la cocotte instrumentée. Sur la plage de fréquences [0 ; 60] Hz, il y a seulement deux zones fréquentielles où l'intervalle de confiance à 95 % n'englobe pas la mesure de puissance; la zone de fréquences 2 – 5 Hz et la zone de fréquences 30 – 38 Hz. La borne inférieure de l'intervalle de confiance à 95 % prédit une puissance globale transmise à la main de 1,38 W. La borne supérieure prédit une puissance de 2.00 W.

5.1.5 Points saillants

Ces résultats montrent qu'il est possible d'obtenir des données de prédiction de puissance au niveau de la main relativement fiables en prenant uniquement en compte les caractéristiques dynamiques de la route et celles du système main-bras. Puisque des prédictions relativement fiables sont possibles sans prendre en compte le comportement dynamique du vélo, cela signifie que le système main-bras contribue majoritairement à la puissance mesurée au niveau de la cocotte.

Cela ne veut pas nécessairement dire que le comportement dynamique du vélo est négligeable. La section suivante présente la puissance qui est mesurée au niveau de la cocotte en utilisant le même cycliste que précédemment mais sur 8 vélos différents. Ces mesures vont permettre d'identifier si des différences sont mesurables entre les différents vélos en puissance transmise au niveau de la main du cycliste.

5.2 Détermination de la puissance transmise au système main-bras du cycliste sur 8 vélos

D'après la section précédente, on constate qu'il est possible de prédire de manière adéquate la puissance transmise au niveau de la main du cycliste sur son vélo sans même prendre en compte le comportement vibratoire du vélo. On peut légitimement se demander si la conception d'un vélo peut influencer la puissance transmise ? Peut-on observer des différences de puissance transmise entre les vélos ? Cette section présente les mesures de puissance transmise au système main-bras du cycliste pour 8 vélos (Partie 3 de la figure 5-1).

5.2.1 Montage expérimental

Les vélos sélectionnés sont des vélos équipés de leur fourche et de leur cadre d'origine. Les 8 vélos utilisés pour réaliser cette comparaison de puissance transmise au niveau de la cocotte sont :

- Cervélo R3
- Cervélo S5
- Focus Culebro
- Masi Gran Criterium
- Ridley Noah
- Specialized Roubaix
- Trek Domane
- Trek Pilot

Lors des tests, les roues, la potence, le cintre et la selle sont les mêmes pour l'ensemble des configurations. Les seuls éléments distinguant les vélos sont la fourche et le cadre. Il est important de noter que ces vélos possèdent des dimensions similaires. Ceci est relativement important sachant que l'influence de l'Humain peut varier si les configurations sont différentes. L'utilisation de vélos de dimensions similaires permet de s'assurer que les différences identifiées seront dû à l'ensemble fourche – cadre et non pas à une variation dû au positionnement du cycliste. Le positionnement du cycliste sur les différents vélos est identique à celui de la figure 5-3.

Le protocole de mesures utilisé est semblable à celui utilisé dans la section précédente pour mesurer la puissance à l'interface entre la main du cycliste et le Cervélo R3 à l'aide de la cocotte instrumentée. La posture utilisée est la posture cycliste avec mains sur les cocottes. La force de poussée exercée par le cycliste est de 80 N et est contrôlée à l'aide de la force statique mesurée par la cocotte instrumentée. Le signal d'excitation fourni sous la roue avant uniquement à l'aide du système XCITE est celui de la route de référence. Les mesures sont effectuées avec un signal de route de 30 s. Pour chacune des 8 configurations vélos – cyclistes, les mesures sont répétées cinq fois pour évaluer l'incertitude.

5.2.2 Résultats de mesures

La figure suivante présente les spectres de puissance pour chacun des huit vélos. Pour chaque vélo, la courbe illustrée sur la figure 5-9 représente la valeur moyenne de la puissance obtenue pour les cinq mesures de répétabilité.

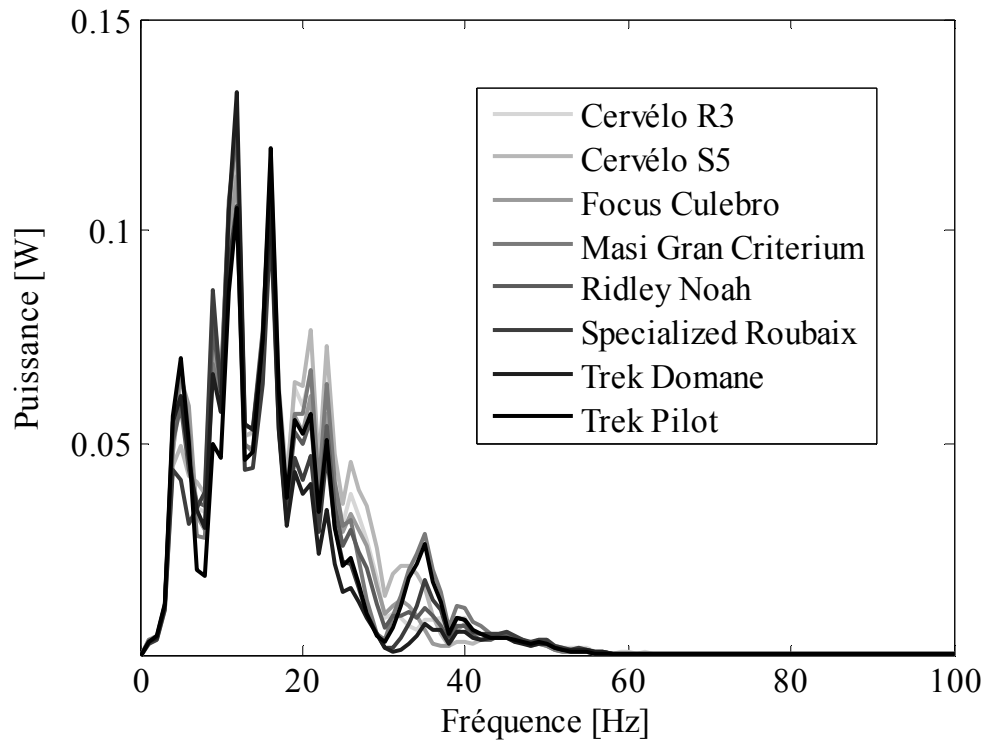


Figure 5-9 : Comparaison des spectres de puissance mesurée au niveau de la cocotte pour chacun des huit vélos

On constate sur la figure 5-9 que les spectres de puissance au niveau de la main du cycliste se ressemblent peu importe le vélo considéré. En fait, la plus grande différence observable entre les vélos se situe entre 18 et 40 Hz.

5.2.3 Classement des vélos en fonction de la puissance mesurée

Afin que les résultats puissent être comparés entre les vélos en termes de puissance moyenne mesurée au niveau de la cocotte sur la plage [0 ; 100] Hz, le tableau suivant présente la valeur moyenne obtenue pour les cinq mesures de répétabilité de chaque configuration. Ce tableau présente également les valeurs de puissance correspondant à l'intervalle de confiance à 95 % obtenu pour les cinq mesures de répétabilité de chaque configuration.

Tableau 5-1 : Comparaison des valeurs de puissance mesurée pour chacun des huit vélos avec l'intervalle de confiance à 95 % correspondant

Vélos	Puissance moyenne	Borne inf. intervalle de confiance à 95 %	Borne sup. intervalle de confiance à 95 %
Cervélo R3	1,64 W	1,52 W	1,76 W
Cervélo S5	1,73 W	1,63 W	1,83 W
Focus Culebro	1,53 W	1,44 W	1,62 W
Masi Gran Criterium	1,62 W	1,49 W	1,75 W
Ridley Noah	1,53 W	1,46 W	1,61 W
Specialized Roubaix	1,35 W	1,26 W	1,44 W
Trek Domane	1,32 W	1,26 W	1,39 W
Trek Pilot	1,45 W	1,29 W	1,61 W

On constate avec une confiance de 95 % que certains vélos sont différenciables en puissance transmise au niveau de la main du cycliste. Ces données permettent d'effectuer un classement en fonction de la puissance mesurée au niveau de la cocotte sur les différents vélos.

Le classement obtenu pour les vélos en fonction de la puissance mesurée au niveau de la main du cycliste est présenté sous forme de diagramme à barres (figure 5-10). L'axe des abscisses affiche le nom des différents vélos classés dans l'ordre croissant de puissance mesurée à la cocotte. Sur l'axe des ordonnées on trouve les puissances correspondantes. Pour chaque vélo, une barre verticale est présentée. Cette barre correspond à l'intervalle de confiance à 95 % de la puissance mesurée. La valeur inférieure de cette barre correspond à la valeur de puissance obtenue pour la borne inférieure de l'intervalle de confiance à 95 %. La valeur supérieure de cette barre correspond à la valeur de puissance obtenue pour la borne supérieure de l'intervalle de confiance à 95 %.

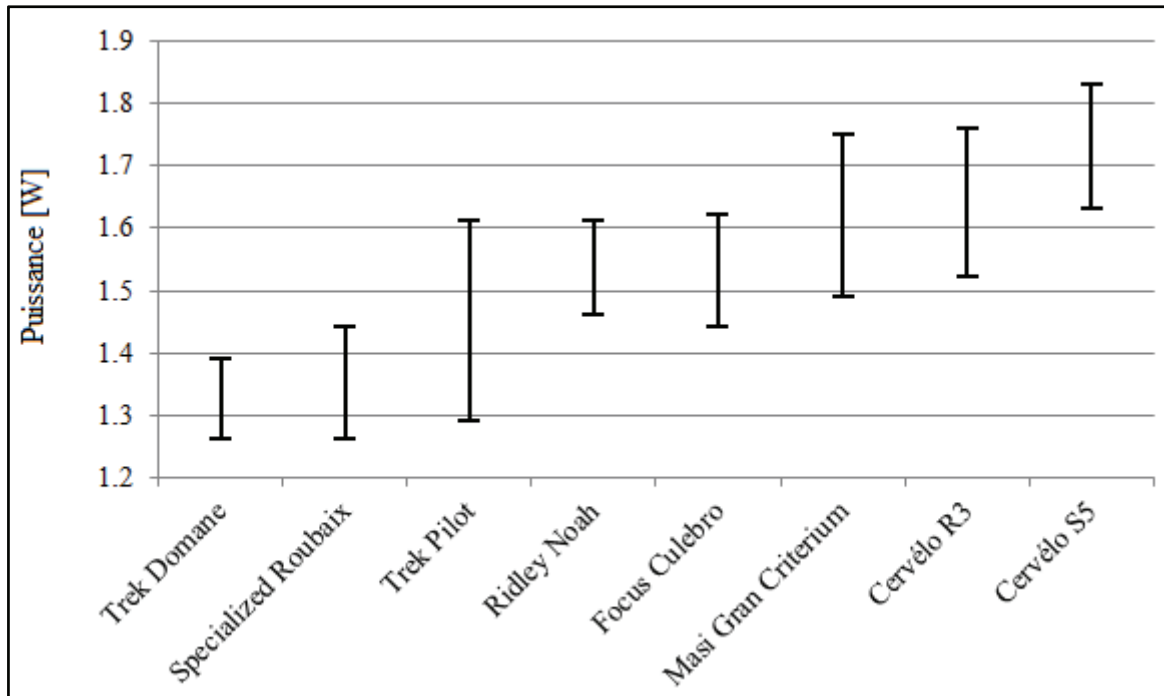


Figure 5-10 : Classement des huit vélos en fonction de la puissance mesurée à la cocotte et intervalle de confiance à 95 % correspondant

Sur la figure 5-10, on constate qu'un classement des différents vélos peut être établi en fonction de la puissance mesurée au niveau de la cocotte sur les assemblages vélos – cycliste. Cependant, il est important de noter que l'incertitude est relativement grande. Ceci est dû à la présence de l'Humain dans l'assemblage. En effet, parmi les structures impliquées, l'Humain est la structure qui possède le plus de variabilité. On peut déduire qu'un nombre important de mesures est nécessaire pour pouvoir affiner la comparaison entre vélos en termes de puissance mesurée au niveau de la main du cycliste.

Néanmoins, à l'aide des résultats de la figure 5-10, un certain nombre d'affirmations peuvent être formulées avec 95 % de confiance :

- Le Trek Domane et le Specialized Roubaix ne sont pas différenciables entre eux
- Le Trek Domane et le Specialized Roubaix transmettent moins de vibration au niveau de la main que le Ridley Noah, le Focus Culebro, le Masi Gran Criterium, le Cervélo R3 et le Cervélo S5
- Le Trek Pilot est seulement différenciable avec le Cervélo S5 et transmet moins de vibration que celui-ci
- Le Ridley Noah, le Focus Culebro, le Masi Gran Criterium et le Cervélo R3 ne sont pas différenciables entre eux
- Le Cervélo S5 transmet plus de vibration que le Trek Domane, le Specialized Roubaix, le Trek Pilot, le Ridley Noah et le Focus Culebro
- Le Cervélo S5 n'est pas différenciable avec le Masi Gran Criterium et le Cervélo R3

5.2.4 Points saillants

Cette section a permis de démontrer que des différences de puissance mesurée au niveau de la cocotte étaient observables entre les vélos. On constate ainsi que le vélo contribue de façon non négligeable au comportement dynamique de l'assemblage vélo – cycliste.

Cependant, les données mesurées sur les huit configurations permettent d'identifier que les différences sont relativement faibles entre les vélos. De plus, les zones de variabilité sont relativement importantes pour chaque vélo dû à la présence de l'Humain dans les mesures. Néanmoins, un classement peut être obtenu à l'aide de mesures de répétabilité et d'outils statistiques.

5.3 Caractérisation de la réponse vibratoire des vélos seuls

Dans ce contexte de différences faibles entre les vélos et de zones de variabilité importante, il pourrait être intéressant de développer une méthode pour comparer les vélos seuls (Partie 4 de la figure 5-1). Cette méthode aurait plusieurs avantages. L'incertitude relativement élevée due à la présence du cycliste n'existerait plus étant donné que les vélos seraient caractérisés seuls. Cette absence de cycliste conduirait également à une simplification du protocole expérimental : il ne serait plus nécessaire de contrôler la posture du cycliste ainsi que les forces de poussée que celui-ci applique sur la structure. On s'attend également à une meilleure répétabilité de mesures étant donné que les vélos sont des structures mécaniques.

Cette méthode devrait permettre d'obtenir les mêmes conclusions que celles qui ont été obtenues lors de mesures de puissance à l'interface entre la main du cycliste et le vélo. Comme mentionné auparavant, la puissance vibratoire semble un bon critère d'évaluation des vibrations transmises.

Jusqu'à maintenant, les résultats de cette thèse ont permis de :

- (1) Montrer que les méthodes de sous-structuration peuvent être utilisées pour prédire le comportement dynamique d'un assemblage comprenant l'Humain;
- (2) Développer les équations de sous-structuration permettant de prédire la puissance à l'interface entre Humain et structure;
- (3) Prédire la puissance à l'interface entre la main du cycliste et le vélo;
- (4) Obtenir un classement de différents vélos à l'aide de mesures de puissance effectuées directement au niveau de la main sur l'assemblage vélo – cycliste.

Ces réalisations vont permettre d'utiliser la théorie de sous-structuration et de développer une méthode de caractérisation des vélos seuls. Cette méthode va être testée et les résultats vont être comparés avec le classement obtenu en puissance mesurée à l'interface avec la main pour les différents vélos.

5.3.1 Une méthode inspirée par la théorie de sous-structuration

Dans ce chapitre, une formulation a été obtenue permettant de prédire la puissance à l'interface entre deux structures en fonction des caractéristiques dynamiques des deux structures impliquées. Dans le cas d'une excitation par la base (comme l'excitation de la route dans notre cas d'étude), la formulation obtenue est la suivante :

$$P_{Iz}^{ab}(\omega) = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left[Z_{IzIz}^a + Z_{IzIz}^b \right] \left| \frac{Z_{IzIz}^a}{Z_{IzIz}^a + Z_{IzIz}^b} \right|^2 \left| \frac{V_{Iz}^a}{V_{route}} \right|^2 |V_{route}|^2 \quad (5.21)$$

Où « a » est le vélo et « b » est le cycliste.

Nous avons vu précédemment que cette équation pouvait être utilisée pour connaître la contribution de chacun des structures impliquée dans l'assemblage. Dans ce contexte de contribution importante du système main-bras sur la puissance à l'interface, il pourrait être intéressant de retirer la contribution de la structure « b » (le système main-bras) afin de connaître la contribution du vélo.

On constate qu'un seul terme est nécessaire pour caractériser le comportement dynamique de la structure « b » (Z_{IzIz}^b). Dans le cas du couplage entre le système main-bras et le vélo au niveau de l'interface à la cocotte, ce terme correspond à l'impédance du système main-bras dans la posture cycliste adéquate. En revanche, deux termes sont nécessaires pour caractériser le comportement dynamique de la structure « a ». Pour le vélo, ces deux termes réfèrent à :

- Z_{IzIz}^a : Impédance du vélo seul mesurée au niveau de la cocotte
- $\frac{V_{Iz}^a}{V_{route}}$: Transmissibilité en vitesse entre une réponse au niveau de la cocotte et une excitation sous le pneu avant

Ainsi, deux termes sont nécessaires afin d'évaluer la contribution du vélo.

Compte tenu de la contribution du système main-bras, comparer les vélos en présence de cycliste revient en quelques sortes à « chercher une aiguille dans une botte de foin ». L'utilisation de ces deux termes permettrait de pouvoir analyser la variabilité entre les vélos sans être masqué par la contribution du cycliste.

Nous voulons développer une méthode qui permet de caractériser la réponse vibratoire des vélos seuls et qui permet d'obtenir des résultats qui soient comparables à ceux obtenus en puissance à l'interface au niveau de la cocotte dans le cas de l'assemblage complet « vélo – cycliste ». Nous voulons également une méthode qui soit simple et rapide à mettre en œuvre, que ce soit du point de vue de la réalisation des mesures ou de l'analyse des données. Pour ces raisons, nous voulons que la méthode puisse caractériser les vélos seuls à l'aide d'une seule et même mesure.

D'après l'équation de sous-structuration (5.21), la caractérisation du vélo nécessite normalement deux termes pour pouvoir assembler les deux structures et prédire la puissance à l'interface; la transmissibilité entre la route et la cocotte, et l'impédance du vélo seul au niveau de la cocotte. Ces deux termes doivent donc être « combinés » afin d'obtenir une information similaire sur le comportement dynamique du vélo à l'aide d'une seule et même mesure. Les deux termes mentionnés précédemment montrent que pour caractériser le vélo seul, la transmissibilité en vitesse de celui-ci entre l'excitation sous le pneu avant et la cocotte ainsi que le comportement dynamique de celui-ci au niveau de la cocotte doivent être connus.

La transmissibilité en vitesse d'un système étant le ratio entre la vitesse de réponse de ce système et la vitesse d'excitation, il est possible d'obtenir les mêmes résultats à l'aide de la transmissibilité en accélération. La transmissibilité ne possède pas d'unité.

La technique proposée pour caractériser le comportement dynamique du vélo seul consiste à mesurer la transmissibilité en accélération entre une excitation sous la roue avant et une réponse au niveau de la cocotte lorsque les cocottes sont chargées à l'aide de masses. De cette manière, la transmissibilité du vélo est caractérisée et les masses font intervenir le comportement dynamique du vélo au niveau des cocottes. Attention, les masses ne sont pas

présentent pour prendre en compte le comportement du cycliste mais pour stimuler le comportement dynamique du vélo au niveau de la cocotte. Ceci vise à obtenir les deux caractéristiques nécessaires pour le vélo (transmissibilité et comportement dynamique à la cocotte) à l'aide d'une seule et même mesure. Cette technique permet alors d'obtenir la contribution du vélo sur la puissance au niveau de l'interface avec la main par caractérisation du vélo seul.

5.3.2 Le montage expérimental

Au sein du laboratoire VélUS, nous disposons d'un système qui permet de maintenir le vélo en place au-dessus des deux excitateurs du système XCITE lors des mesures avec cyclistes. Ce système permet d'exciter les deux roues du vélo et d'effectuer les mesures avec le cycliste tout en permettant à celui-ci de rester en équilibre vertical sur le vélo. La figure suivante illustre comment le vélo est maintenu en position sur les deux excitateurs.



Figure 5-11 : Visualisation de la configuration qui permet de maintenir le vélo en place sur les excitateurs hydrauliques à l'aide de bungees

Cette configuration est également la configuration de base qui est utilisée lors des tests pour caractériser le comportement dynamique des vélos seuls. Une excitation est fournie sous le pneu avant uniquement et la fonction de transmissibilité peut être mesurée entre l'excitation sous la roue et la réponse au niveau de la cocotte.

Un système de précharge du pneu est nécessaire pour la réalisation de ces mesures. Il y a deux raisons à cela. Si l'on fournit une excitation sous le pneu avant dans la configuration où le vélo est installé sur la figure 5-11, le vélo ne restera pas en contact avec l'excitateur et va décoller de la plaque d'excitation. La deuxième raison est d'assurer un comportement linéaire du pneu. En préchargeant le pneu avec la même force que celle qui serait appliquée si le cycliste avait les deux mains sur le cintre, on s'assure que le pneu est dans la même plage de linéarité que lors des tests avec cycliste.

Le système de précharge a posé un défi majeur afin d'obtenir une situation qui soit la plus près possible de la réalité. Le système de précharge du pneu ne doit pas modifier le comportement dynamique du vélo puisque le banc de test est développé pour pouvoir comparer les vélos entre eux. Le système de précharge ne doit donc modifier le comportement dynamique d'aucun composant de vélos. Le système développé est schématisé sur la figure suivante.

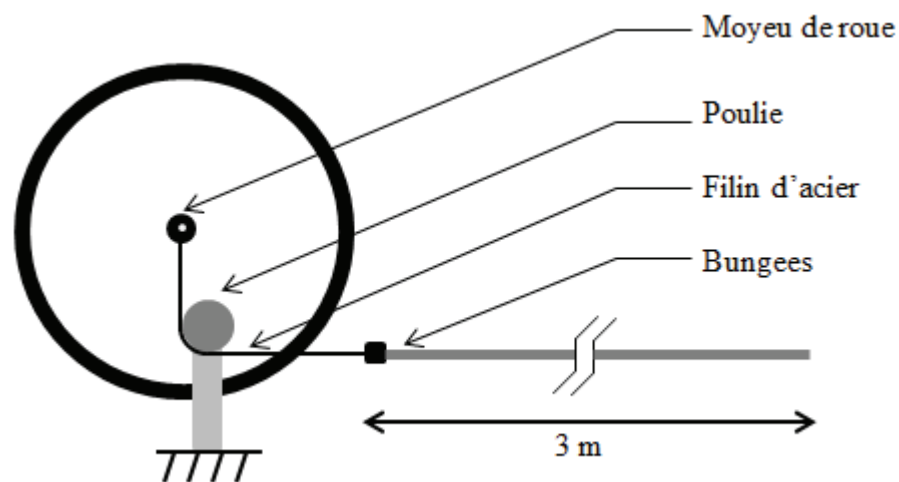


Figure 5-12 : Schéma du système de précharge

Tel qu'illustré sur la figure 5-12, le système de précharge utilise des bungees et des poulies afin de ne pas modifier le comportement dynamique du vélo et permettre une précharge équivalente à celle qui serait exercée par un cycliste sur le vélo. Les poulies sont utilisées pour convertir une force selon la direction horizontale en une force verticale appliquée au niveau du moyeu du vélo. Des filins d'acier sont utilisés pour attacher le moyeu aux bungees et servir de guide autour des poulies. Les bungees étant éloignés, leurs masses ne modifient pas la masse du vélo. Des bungees de faible raideur sont sélectionnés. Ainsi, cette raideur additionnelle en parallèle au pneu a peu d'effet sur la raideur totale du tandem pneu – bungees.

Ce système de précharge permet d'atteindre l'objectif fixé : assurer une force de précharge équivalente à celle qui serait exercée si un cycliste était présent sur le vélo tout en ne modifiant pas le comportement dynamique du vélo. Le système de précharge du pneu est présenté sur la figure suivante lorsque celui-ci est en charge.

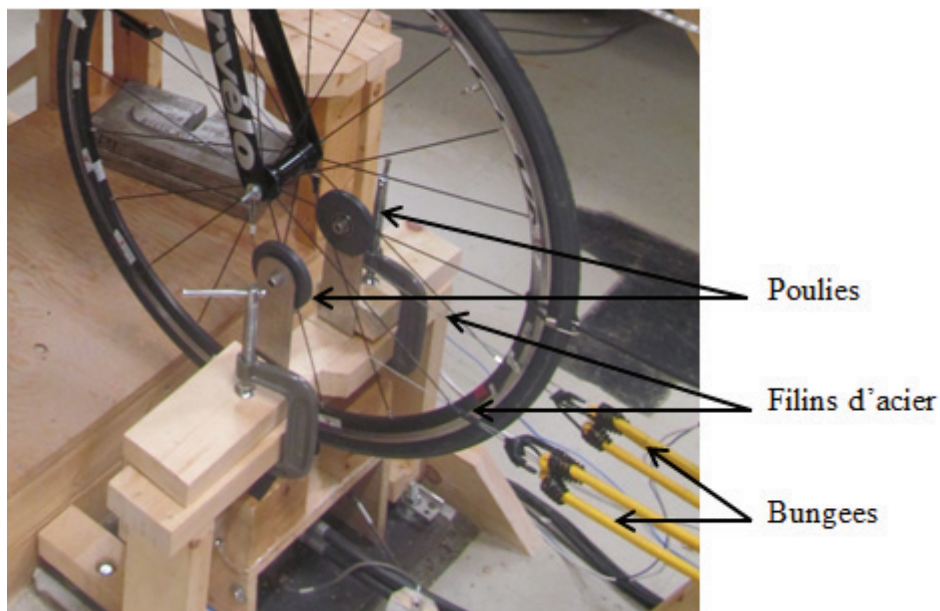


Figure 5-13 : Système de précharge du pneu en phase de charge

La valeur de force utilisée pour précharger le pneu est de 250 N. Avec leurs raideurs faibles, les bungees s'allongent d'environ 1 m pour pouvoir exercer une telle force. Le pneu est désormais préchargé, assurant ainsi qu'il soit dans la même zone de linéarité que lors des tests avec cycliste et qu'il reste en contact avec l'excitateur pendant les tests.

Le deuxième élément nécessaire à la réalisation des mesures de caractérisation des vélos seuls est l'ajout sur les cocottes de masses afin de prendre en compte le comportement dynamique de l'avant du vélo dans la mesure de transmissibilité. Bien que les masses ne servent pas à prendre en compte le cycliste mais uniquement stimuler le comportement dynamique du vélo au niveau de la cocotte, la masse dynamique du système main-bras est évaluée afin de choisir des masses d'un ordre de grandeur intelligent.

A l'aide des mesures de réponse biodynamique en postures cyclistes (section 4.3), il est possible de déterminer la masse dynamique correspondante au système main-bras. La figure suivante présente une réponse typique du système main-bras extraite des données mesurées dans la section 4.3 : Le système main-bras en postures « cyclistes ». Cette figure permet d'avoir une idée de l'ordre de grandeur de la masse dynamique correspondant au système main-bras en posture cycliste sur la plage de fréquences [0 ; 100] Hz.

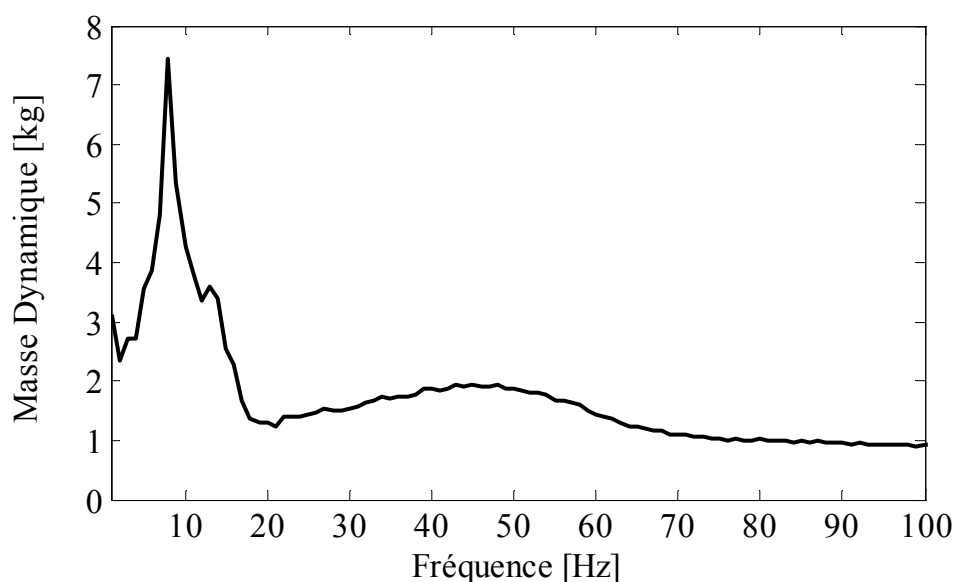


Figure 5-14 : Ordre de grandeur de la masse dynamique du système main-bras en posture cycliste

La figure 5-14 a été obtenue en prenant la réponse biodynamique d'un sujet mesurée sur le montage en posture cycliste (figure 4-19) et en la présentant sous forme de masse dynamique plutôt que sous forme d'impédance. Cette courbe permet ainsi d'illustrer l'ordre de grandeur de la masse dynamique correspondant au système main-bras en posture cycliste. On constate

que la masse dynamique du système main-bras en posture cycliste varie entre 1 et 8 kg environ sur la plage [0 ; 100] Hz. Un seul pic est dominant aux alentours de 8 Hz. De plus, la masse dynamique du système main-bras dépasse 3 kg seulement entre 3 et 15 Hz. Entre 15 et 60 Hz, la masse dynamique varie principalement entre 1,5 kg et 2 kg. Finalement, au-dessus de 70 Hz la masse dynamique est d'environ 1 kg.

A la lumière de ces résultats de masse dynamique du système main-bras en posture cycliste, il a été décidé de prendre des masses de 2 kg lors des tests de caractérisation des vélos seuls et de les installer sur les cocottes. Pour cela, les supports en plastique servant à déposer les mains sont enlevés et les masses sont directement fixées à l'aide de tiges filetées sur le corps en aluminium des cocottes instrumentées (figure 5-15).

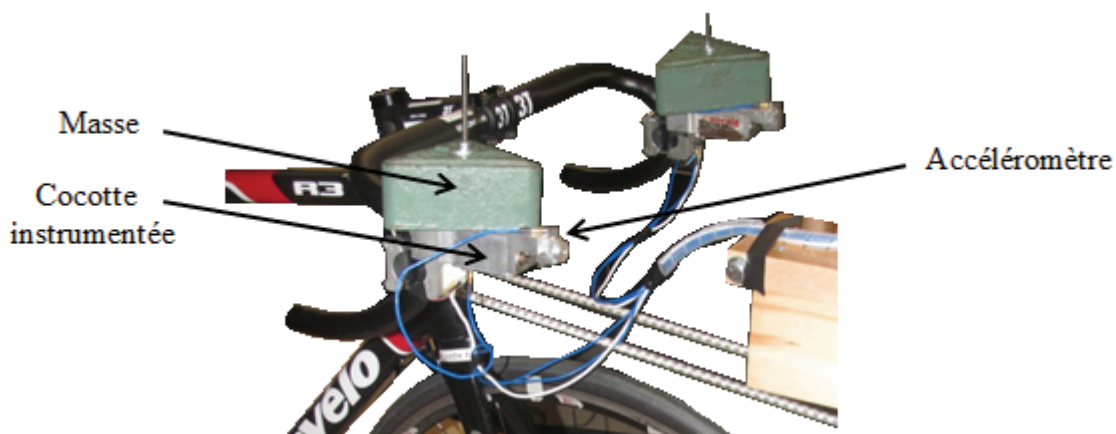


Figure 5-15 : Visualisation de l'installation des masses de 2 kg sur les cocottes instrumentées

Une fois le système de précharge et les masses installés, les vélos peuvent être mesurés en transmissibilité. Les mesures sont récoltées sur le vélo du côté droit car l'ensemble des résultats présentés jusqu'à présent l'étaient pour le côté droit également (que ce soit la caractérisation du système main-bras ou les mesures de puissance sur l'assemblage vélo – cycliste au niveau de la cocotte). Un vélo étant une structure essentiellement symétrique, on fait l'hypothèse qu'une réponse similaire serait obtenue pour le côté gauche dans le cas de la caractérisation des vélos seuls.

Les huit vélos testés précédemment en puissance transmise au niveau de la cocotte sur l'assemblage vélo – cycliste sont testés avec cette méthode de caractérisation des vélos seuls. Tout comme pour les mesures de puissance, le même ensemble de roues, potence, cintre et selle est utilisé pour chacun des vélos. Seuls la fourche et le cadre changent entre les différentes configurations.

La réponse vibratoire est évaluée en transmissibilité et l'excitation utilisée peut être quelconque tant qu'il y a de l'énergie d'excitation pour la plage de fréquence considérée. Dans notre cas, le signal utilisé est le signal de route de référence (figure 5-5). Ce signal est utilisé afin d'avoir la même base de référence que les mesures de puissance effectuées auparavant. Connaissant la réponse fréquentielle de ce signal, les données obtenues en transmissibilité pour les vélos seuls seront utilisables entre 1 et 60 Hz.

Afin de pouvoir évaluer l'incertitude de mesures liée à cette méthode, trois mesures de répétabilité sont effectuées pour chacune des configurations. Entre chaque mesure de répétabilité, les masses sur les cocottes sont désinstallées et la précharge du pneu enlevée.

5.3.3 Analyse des données de transmissibilité

Les mesures d'accélération au niveau de la cocotte et les mesures d'accélération au niveau du plateau d'excitation sous le pneu sont utilisées afin d'obtenir la transmissibilité des vélos seuls avec masses aux cocottes.

La figure suivante présente les spectres de transmissibilité obtenus pour chacun des huit vélos caractérisés seuls entre 1 et 60 Hz. Pour chaque vélo, la courbe illustrée sur la figure 5-16 représente la valeur moyenne de la transmissibilité obtenue pour les trois mesures de répétabilité.

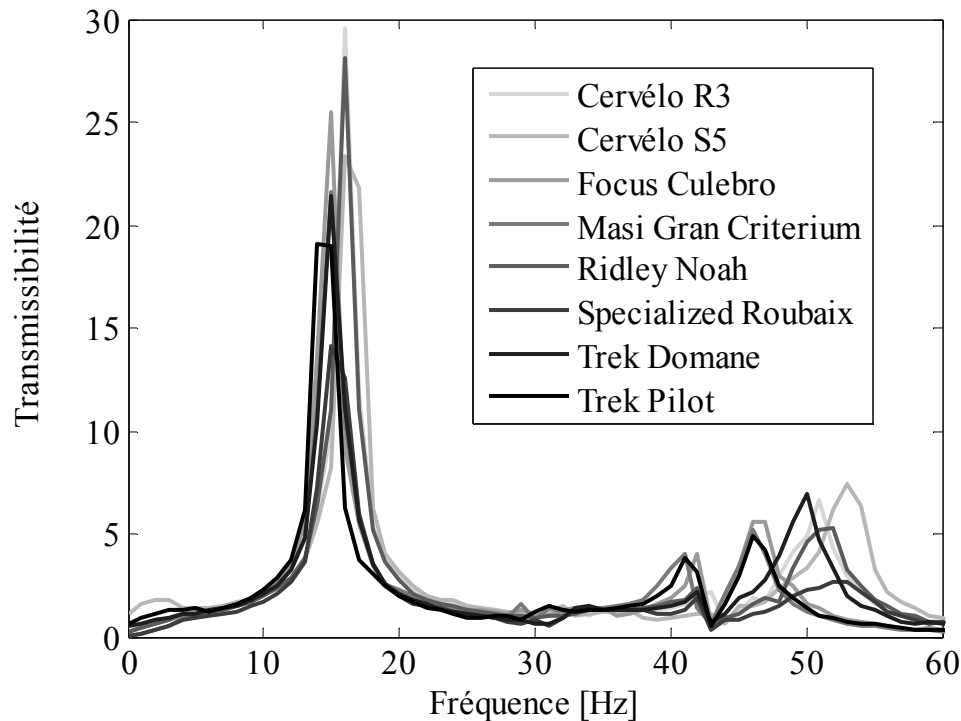


Figure 5-16 : Comparaison des spectres de transmissibilité pour chacune des huit configurations avec vélos seuls

On constate à l'aide de la figure 5-16 que les spectres de transmissibilité mesurés entre l'accélération à la cocotte et l'accélération sous le pneu se ressemblent peu importe le vélo considéré. En fait, les plus grandes différences observables entre les vélos se situent au niveau du pic à 15-16 Hz et au-dessus de 35 Hz.

Par ailleurs, on constate que les transmissibilités sont souvent supérieures à 1 entre 0 et 60 Hz. Ceci indique une amplification de la réponse au niveau du cockpit. Cette identification peut s'expliquer par l'ajout de masses au niveau des cocottes qui amplifient la dynamique de l'ensemble du cockpit lors des tests.

Un coefficient de transmissibilité est calculé correspondant à la somme pour chacune des fréquences entre 1 et 60 Hz de la valeur de transmissibilité obtenue pour chacun des vélos. Le tableau suivant présente la valeur moyenne de ce coefficient obtenue pour les trois mesures de répétabilité pour chaque configuration. Ce tableau présente également les valeurs obtenues en fonction de l'intervalle de confiance à 95 % pour les trois mesures de répétabilité de chaque configuration.

Tableau 5-2 : Comparaison de la moyenne de la somme de la transmissibilité entre 1 et 60 Hz mesurée avec un pas de 1 Hz pour les trois mesures de répétabilité pour chacun des huit vélos avec l'intervalle de confiance à 95 % correspondant

Vélos	Moyenne de la somme de transmissibilité entre 1 et 60 Hz	Borne inf. intervalle de confiance à 95 %	Borne sup. intervalle de confiance à 95 %
Cervélo R3	268,1	255,8	280,4
Cervélo S5	299,2	285,8	312,6
Focus Culebro	204,7	201,8	207,6
Masi Gran Criterium	205,1	201,2	209,1
Ridley Noah	225,8	222,0	229,6
Specialized Roubaix	137,7	134,2	141,1
Trek Domane	158,2	155,3	161,1
Trek Pilot	206	204,5	207,5

Le tableau 5-2 permet de connaître la moyenne du coefficient de transmissibilité mesurée pour chaque vélo au niveau de la cocotte entre 1 et 60 Hz. Il permet également de savoir entre quelles bornes se situe ce coefficient de transmissibilité pour chacun des huit vélos grâce à l'intervalle de confiance à 95 %. On constate avec une confiance de 95 % que des vélos sont différenciables en transmissibilité à l'aide de la méthode de caractérisation des vélos seuls avec masses aux cocottes. Ces données permettent d'effectuer un classement des différents vélos en fonction du coefficient de transmissibilité mesuré entre 1 et 60 Hz à l'aide de la méthode de caractérisation des vélos seuls.

Tout comme le classement obtenu en fonction de la puissance mesurée au niveau de la main du cycliste, le classement des vélos obtenu avec la méthode de caractérisation des vélos seuls est présenté sous forme de diagramme à barres. Sur l'axe des abscisses se trouve le nom des différents vélos classés dans l'ordre croissant en fonction du coefficient de transmissibilité. Sur l'axe des ordonnées se trouve les valeurs du coefficient de transmissibilité de chacun des vélos obtenu entre 1 et 60 Hz ainsi que son intervalle de confiance à 95 %. Ces résultats sont présentés sur la figure suivante.

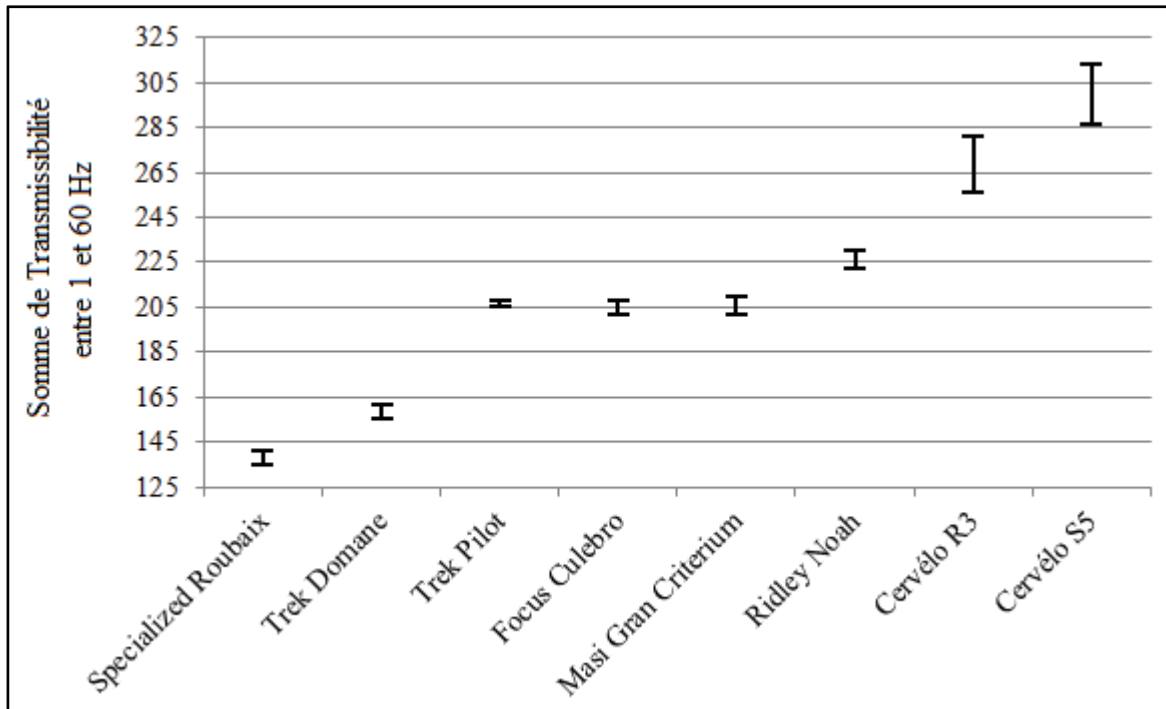


Figure 5-17 : Visualisation du classement des huit vélos en fonction de la somme de transmissibilité entre 1 et 60 Hz à l'aide de la méthode de caractérisation des vélos seuls et intervalle de confiance à 95 % associé

Avant de comparer les deux classements obtenus, un certain nombre d'affirmations peuvent être formulées avec 95 % de confiance à l'aide de la figure 5-17 :

- Le Specialized Roubaix possède une transmissibilité plus faible que l'ensemble des autres vélos
- Le Trek Domane arrive deuxième en transmissibilité
- le Trek Pilot, le Focus Culebro et le Masi Gran Criterium ne sont pas différenciables entre eux
- Le Ridley Noah, le Cervélo R3 et le Cervélo S5 sont différenciables entre eux et arrivent respectivement sixième, septième et huitième en transmissibilité

5.3.4 Comparaison des classements en puissance sur les assemblages vélos – cycliste et en transmissibilité sur les vélos seuls

En comparant la figure 5-10 avec la figure 5-17, on constate que les classements obtenus à l'aide des deux méthodes de caractérisation des vélos sont légèrement différents. La figure suivante regroupe les deux classements obtenus afin de mieux pouvoir les comparer.

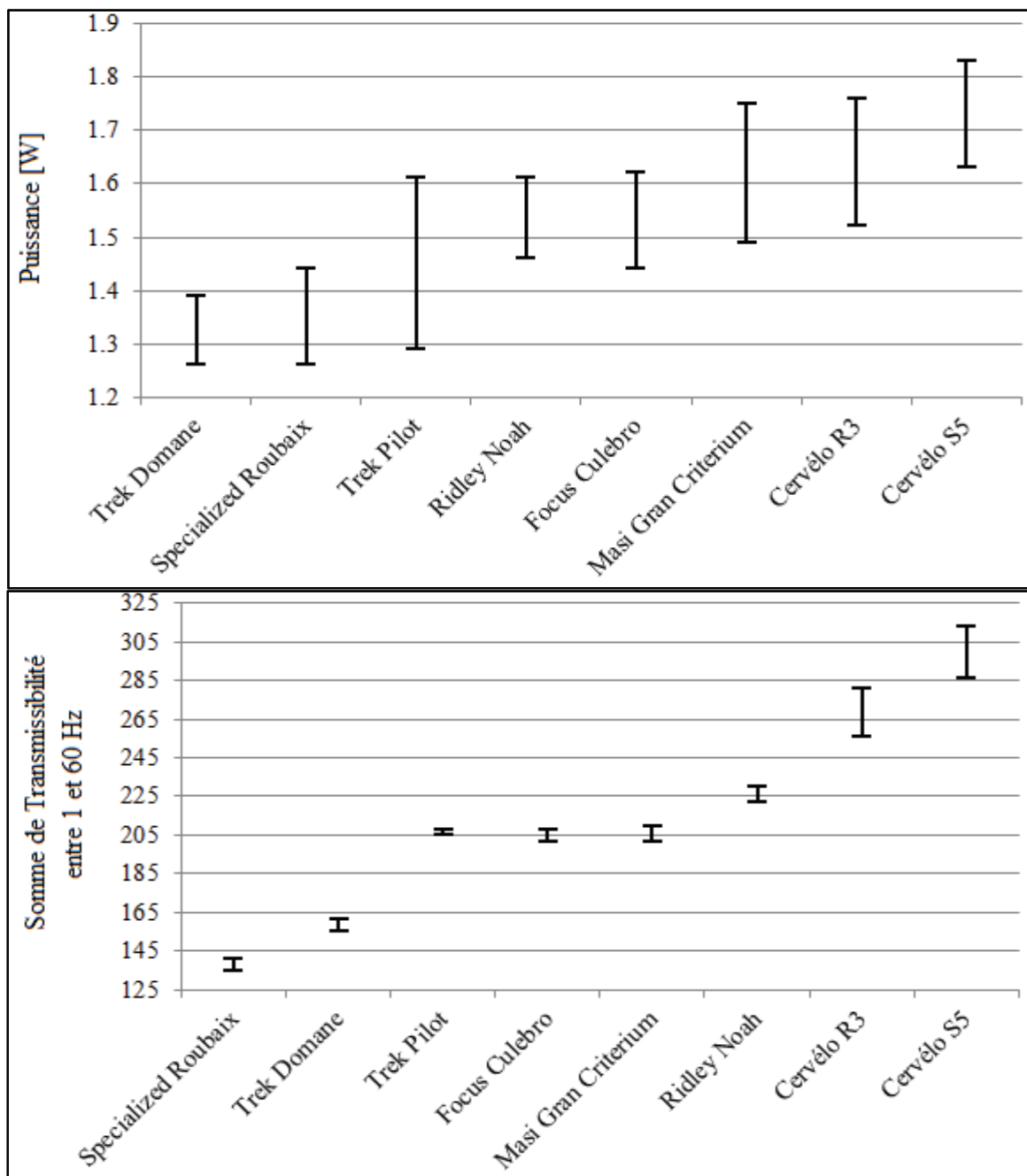


Figure 5-18 : Comparaison entre classements obtenus avec la puissance mesurée au niveau de la cocotte sur l'assemblage vélo - cycliste (Haut) et avec la méthode de caractérisation des vélos seuls en transmissibilité avec masses aux cocottes (Bas)

A l'aide de la figure 5-18, il est facile d'identifier où ont lieu les différences entre les deux classements. Tout d'abord, il est important de noter que l'incertitude sur les mesures de la méthode de transmissibilité des vélos seuls est relativement plus faible comparativement aux mesures de puissance au niveau de la cocotte sur l'assemblage vélo – cycliste. Ces zones d'incertitude plus faible rendent les vélos plus facilement distinguables. L'absence de cycliste dans cette méthode montre que des données plus précises peuvent être obtenues.

En termes de comparaison, le Specialized Roubaix et le Trek Domane sont inversés entre les deux classements. Cependant, ces deux vélos n'étaient pas différenciables dans le classement obtenu à l'aide de la puissance. Il n'y a donc pas de contradiction avec le classement des vélos seuls. Une autre différence concerne le positionnement du Ridley Noah. Celui-ci est en sixième position dans le classement des vélos seuls alors qu'il est quatrième dans le classement en puissance. Mais une nouvelle fois, il est impossible de distinguer avec 95 % de confiance les vélos des positions trois à sept dans le classement en puissance. Il n'y a donc aucune contradiction entre les deux classements.

Compte tenu des incertitudes liées à la mesure de puissance, le classement obtenu à l'aide de la caractérisation des vélos seuls ne contredit en rien le classement obtenu à l'aide de la puissance mesurée au niveau de la cocotte sur les assemblages vélos – cycliste.

5.3.5 Points saillants

Cette section a présenté le protocole expérimental permettant de caractériser la réponse dynamique des vélos seuls. Cette méthode a permis de classer huit vélos selon leur transmissibilité entre l'excitation sous la roue et la cocotte lorsque des masses sont positionnées au niveau des cocottes. Ce classement obtenu à l'aide de la méthode de caractérisation des vélos seuls a été comparé au classement obtenu à l'aide de la puissance mesurée à la cocotte sur l'assemblage vélo – cycliste.

Les résultats montrent que, compte tenu des incertitudes de mesure, le classement obtenu à l'aide de la méthode de caractérisation des vélos seuls est similaire à celui obtenu à l'aide de la puissance mesurée sur les différents assemblages vélos – cycliste. En effet, dans certains cas, les incertitudes liées à la mesure de puissance au niveau de la cocotte sur les assemblages vélos – cycliste ne permettent pas de distinguer les vélos. La présence de l'Humain sur le vélo a donc pour effet d'augmenter la variabilité de mesures rendant difficile la discrimination entre les vélos. Pour autant, cette incertitude due à la présence du cycliste est représentative du comportement dynamique réel du tandem vélo – cycliste. Dans l'objectif de différencier les vélos entre eux, cette méthode de caractérisation avec cycliste nécessite un nombre important de mesures combiné à des outils d'analyse statistique.

Dans ce contexte, la méthode de caractérisation des vélos seuls démontre plusieurs avantages. On peut s'interroger sur le réalisme de cette discrimination étant donné qu'il n'y a pas de cycliste. Néanmoins, aucune contradiction n'a été identifiée dans le classement du comportement dynamique de huit vélos différents.

5.4 Conclusion

Ce chapitre a permis de révéler de nombreux éléments concernant la puissance transmise au niveau de la cocotte sur un assemblage vélo – cycliste et la caractérisation dynamique des vélos dans le but d'établir un classement en fonction de la transmission de vibrations. La première partie de ce chapitre a permis de répondre à l'objectif secondaire « Identifier un indicateur qui puisse être obtenu par sous-structuration et qui témoigne des vibrations transmises au système main-bras ». La dernière section a permis de répondre à l'objectif secondaire « Développer une méthode de caractérisation de la réponse vibratoire des vélos seuls ».

Les résultats de la section 5.1.4 ont permis de montrer qu'il est possible d'obtenir des données de prédiction de puissance au niveau de la main relativement fiables en prenant uniquement en compte les caractéristiques dynamiques de la route et celles du système main-bras. Puisque

des prédictions relativement fiables sont possibles sans prendre en compte le comportement dynamique du vélo sur lequel le cycliste est installé, cela signifie que le système main-bras contribue majoritairement à la puissance mesurée au niveau de la cocotte. Ceci signifie que parmi les deux structures impliquées dans le couplage (cycliste – vélo), l’Humain est la structure qui a le plus d’influence pour la partie avant de vélo.

Cela ne veut cependant pas dire que le comportement dynamique du vélo est nécessairement négligeable. La section 5.2 a permis de démontrer que des différences en termes de puissance mesurée au niveau de la cocotte étaient observables entre les vélos. Ceci démontre donc que, même faible, le vélo possède une part de contribution sur le comportement dynamique de l’assemblage vélo – cycliste.

Étant donné l’obtention d’incertitude élevée due à la présence de l’Humain et compte tenu qu’il possède le plus d’influence sur la dynamique de l’assemblage, il a été jugé intéressant de développer une méthode pour comparer les vélos seuls. Cette méthode de caractérisation des vélos seuls a été présentée dans la section 5.3. Tout comme pour la puissance, un classement a été obtenu pour les huit vélos testés. Le classement obtenu à l’aide de cette méthode de caractérisation des vélos seuls ne contredit en aucun point le classement obtenu à l’aide de la puissance mesurée au niveau de la cocotte sur les assemblages vélos – cycliste et conduit à une meilleure sensibilité pour pouvoir comparer les vélos entre eux.

6 DISCUSSION

Cette thèse a proposé d'étudier les vibrations transmises au système main-bras du cycliste en développant une approche permettant d'estimer la puissance vibratoire au niveau de la main du cycliste par sous-structuration. Il résulte de cette étude que l'Humain est la structure qui a le plus d'influence sur la dynamique de l'assemblage. L'Humain est également la structure qui a le plus d'influence sur la puissance mesurée au niveau de la main. Ainsi, il est possible de prédire la puissance transmise au niveau de la main à l'interface entre le cycliste et le vélo sans prendre en compte le comportement dynamique du vélo.

Comment expliquer qu'il est possible de prédire la puissance transmise au niveau de la main à l'interface entre le cycliste et le vélo sans prendre en compte le comportement dynamique du vélo dans le modèle de sous-structuration ? Les différences faibles entre les vélos et l'incertitude liée à la variabilité de réponse du système main-bras rendent impossible l'utilisation de la méthode de sous-structuration pour classer les vélos entre eux.

Cependant, mêmes faibles, des différences existent dans la puissance mesurée au niveau de la cocotte sur les assemblages vélos – cycliste pour huit vélos différents. Une méthode basée sur les équations de sous-structuration a alors été développée pour caractériser les vélos seuls. Cette méthode n'est pas représentative de la réalité d'assemblage entre le cycliste et le vélo mais elle permet d'obtenir le même classement que celui obtenu en puissance mesurée au niveau de la main du cycliste. Elle permet également une meilleure discrimination des vélos en termes de transmission de vibration. En effet, cette méthode a montré plusieurs avantages étant donné que les vélos sont caractérisés seuls :

- L'incertitude relativement élevée due à la présence du cycliste n'existe plus;
- Cette absence de cycliste conduit à une simplification du protocole expérimental;
- Il n'est plus nécessaire de contrôler la posture du cycliste;
- Il n'est plus nécessaire de contrôler les forces que le cycliste applique sur la structure;
- Meilleure répétabilité

Cette application pour prédire la puissance au niveau de la main du cycliste a mis en évidence trois éléments d'originalité :

- **La prédiction** du comportement dynamique d'un assemblage Humain – structure
- **L'analyse** des réponses biodynamiques du corps humain
- **La discrimination**, parmi différentes structures, de celle qui transmet le moins de vibration

6.1 La prédiction par sous-structuration lors d'interactions Humain – structure sous sollicitation vibratoire

La prédiction par sous-structuration permet de nouvelles perspectives d'étude lors d'interactions Humain – structure sous sollicitation vibratoire et procure une vision plus large du problème. On dispose de plus d'éléments pour pouvoir améliorer le comportement dynamique de l'assemblage et réduire les vibrations transmises au corps humain :

- Connaissance du comportement dynamique de chaque structure car elles doivent être caractérisées séparément
- La caractérisation biodynamique peut être utilisée pour déterminer les vibrations absorbées par le corps humain. Ces réponses biodynamiques peuvent être analysées en fonction de la variabilité existant entre sujets (présentée dans la prochaine section 6.2).
- La caractérisation de la structure mécanique seule permet de connaître son comportement dynamique sans qu'elle soit chargée par l'Humain
- Connaissance du comportement dynamique de l'assemblage

Ainsi, cette approche permet d'avoir de l'information pertinente sur trois structures – le corps humain, la structure mécanique seule et l'assemblage. De plus, la réalisation d'une prédiction offre plusieurs avantages :

- Évaluer l'influence de l'Humain sur le comportement dynamique de la structure mécanique

- Connaître la contribution relative de chacune des deux structures sur le comportement dynamique de l'assemblage au complet
- Obtenir la même information que si la caractérisation avait été effectuée directement sur l'assemblage Humain – structure

Par ailleurs, la prédiction par sous-structuration n'est pas spécifique au système main-bras. Elle pourrait être utilisée avec n'importe quelle partie du corps, voir du corps humain au complet. Il s'agit de pouvoir caractériser le corps humain au point d'interface dans la même configuration que celle utilisée lorsqu'en contact avec la structure. Des applications de l'approche proposée dans cette thèse seraient facilement identifiables dans le cas d'assemblage avec l'Humain debout ou en position assise :

- Dans les transports, l'Humain peut être debout sur diverses structures et subir une sollicitation vibratoire de la part de ses structures.
- Dans le domaine de l'ingénierie automobile, on peut envisager utiliser les techniques de sous-structuration avec les modèles développés pour l'Humain en position assise (Griffin, 1990 ; Boileau *et al.*, 1997, 2002 ; Lewis et Griffin, 2002 ; Mansfield, 2005 ; Siefert *et al.*, 2008 ; Rakheja *et al.*, 2010 ; ISO-2631, 1997 ; ISO-5982; 2001) afin d'analyser les vibrations transmises, prédire l'influence de celui-ci sur le comportement dynamique du siège et discriminer les sièges qui permettent d'effectivement réduire les vibrations transmises.

Pour finir, plusieurs points de contact et plusieurs degrés de liberté sont possibles. En effet, si l'on considère les équations de couplage par sous-structuration entre deux structures, les formulations ne dépendent pas du nombre de points impliqués. Chaque structure est seulement définie par des ensembles. Ces ensembles peuvent contenir autant de points et de degrés de liberté que nécessaire. Le modèle peut ainsi être adapté en fonction du nombre de points et du nombre de degrés de liberté impliqués dans le couplage. Ceci permet de réduire la taille du modèle, simplifiant ainsi les calculs.

6.2 L'analyse des réponses biodynamiques du corps humain : la possibilité d'obtention d'un « Gain Universel »

Certains auteurs ont précisé que « tout comme la masse et la taille, la réponse biodynamique du système main-bras est spécifique à l'individu » (Dong *et al.*, 2009). Les résultats présentés dans cette thèse confirment que la réponse biodynamique du système main-bras est spécifique à l'individu. Chaque Humain étant spécifique par ses caractéristiques anthropométriques et morphologiques, la réponse biodynamique mesurée sur un sujet peut varier d'un individu à l'autre. Cette spécificité à l'individu peut certainement se retrouver dans d'autres caractérisations biodynamiques telles que le système pied – jambe, l'humain en position assis ou debout. Lors de l'analyse entre sujets, cette variabilité de réponses pose évidemment des problèmes pour l'interprétation des résultats et les conclusions possiblement identifiables. Comment obtenir des conclusions fiables pour une population d'individus quand chaque sujet est spécifique ?

Dans certains cas particuliers, il existe des conclusions possibles pour une population d'individus. Bien que la réponse biodynamique du système main-bras soit spécifique à l'individu et qu'aucune conclusion ne soit identifiable pour un ensemble de dix sujets dans certaines postures, des conclusions sont possibles pour la réponse biodynamique du système main-bras de cette même population d'individus en postures cyclistes.

Ceci est un élément original du doctorat. Cette possibilité d'identification de caractéristiques communes pour une population d'individus permet d'établir un concept de « Gain Universel ». Celui-ci peut se définir en deux parties. Premièrement, « Gain » signifie une amélioration de performance (c.-à-d. une réduction des vibrations transmises). Deuxièmement, « Universel » signifie que le gain est atteint pour n'importe quel sujet. Par conséquent, le concept de « Gain Universel » est la capacité d'obtenir une réduction des vibrations transmises au corps humain quel que soit le sujet.

Afin d'identifier un potentiel « Gain Universel » et pouvoir réduire les vibrations transmises dans une certaine zone fréquentielle, une analyse d'intra- et d'intervariabilité de la réponse biodynamique est préalable. S'il existe au moins une zone fréquentielle qui soit identique pour tous les sujets étudiés, on peut émettre l'hypothèse d'existence de cette même caractéristique chez tous nouveaux sujets pouvant être ajoutés à l'étude.

Cette particularité identifiée pour le système main-bras en postures cyclistes peut certainement se retrouver pour d'autres parties du corps, ou le corps au complet dans des postures spécifiques. Dans le cas d'interactions entre Humains et structures sous sollicitation vibratoire, l'existence d'un « Gain Universel » est primordiale pour une réduction des vibrations effective pour n'importe quel sujet. Sans l'existence d'un « Gain Universel », toute modification effectuée sur une structure vibrante permettra de réduire les vibrations transmises pour certains individus mais risque d'augmenter les vibrations transmises pour d'autres. L'identification de potentiels « Gains Universaux » sur les réponses biodynamiques pourrait certainement être envisagée comme une étape primordiale d'amélioration dynamique d'une structure mécanique. La section suivante 6.3 présente la caractérisation des structures seules dans le processus de diagnostic et d'amélioration du design.

6.3 La caractérisation des structures seules dans le processus de diagnostic et d'amélioration du design

La sous-structuration entre une structure mécanique et le corps humain dans le contexte de transmission de vibrations permet de pouvoir analyser la réponse biodynamique du corps humain seul, la structure seule et l'assemblage. Pour les mêmes raisons qui ont conduit au développement des techniques de sous-structuration, il est plus facile d'analyser et d'améliorer le comportement dynamique de structures seules que d'assemblages complexes. En pratique, la seule structure pouvant être optimisée dynamiquement est la structure mécanique. Il est donc uniquement possible de travailler sur le comportement dynamique de cette structure afin de pouvoir améliorer le comportement dynamique de l'assemblage et ainsi réduire les vibrations transmises au corps humain.

Pour la réalisation d'un couplage par sous-structuration, les données concernant le comportement dynamique de la structure mécanique peuvent être obtenues expérimentalement, analytiquement ou numériquement. Cette liberté de caractérisation des structures est un des points extrêmement avantageux de cette approche. Cela ne fait aucune différence d'utiliser des résultats expérimentaux ou des données issues de modèles. La seule nécessité est d'obtenir une FRF fiable afin de prédire adéquatement le comportement dynamique de l'assemblage.

Ceci offre un avantage majeur pour le design, la réduction des vibrations et l'amélioration du confort du sujet en contact avec ces structures. Imaginez une structure mécanique en phase de conception ou d'optimisation, le prototype n'est pas disponible mais un modèle numérique fiable de cette structure en développement existe. Il devient possible d'utiliser l'approche par sous-structuration en mode hybride pour prédire l'influence de l'Humain sur le comportement dynamique de cette structure mécanique en développement avant même que celle-ci n'existe réellement. Dans tous les cas, le modèle de prédiction du comportement dynamique de l'assemblage peut être utilisé pour identifier les zones fréquentielles à améliorer sur la structure mécanique afin de réduire les vibrations transmises vers le corps humain. Un diagnostic et une optimisation de la structure seule peuvent alors être effectués et de nouvelles idées de conception peuvent être testées numériquement afin de réduire les vibrations sur le modèle hybride de l'assemblage Humain – structure.

7 CONCLUSION

Dans cette thèse, deux méthodologies ont été utilisées pour permettre d'estimer le niveau de vibrations transmis au niveau de la main du cycliste : la sous-structuration et la réponse biodynamique du système main-bras. Les contributions majeures de cette thèse ont été :

- La mesure de la réponse biodynamique du système main-bras en postures cyclistes
- L'analyse de la variabilité de ces réponses et l'identification d'un potentiel « Gain Universel »
- La prédiction de la puissance transmise au niveau de la main du cycliste
- Le développement d'une méthode permettant de caractériser les vélos seuls

Ces réalisations ont permis de répondre à l'ensemble des objectifs secondaires :

- Identifier une (ou plusieurs) méthode(s) de couplage de structures qui soi(en)t utilisable(s) avec la réponse biodynamique du système main-bras;
- Prédire le comportement dynamique d'un assemblage avec une main par sous-structuration;
- Mesurer la réponse biodynamique du système main-bras de plusieurs sujets afin d'évaluer la variabilité des réponses;
- Identifier un indicateur qui puisse être obtenu par sous-structuration et qui témoigne des vibrations transmises au système main-bras;
- Développer une méthode de caractérisation de la réponse vibratoire des vélos seuls.

7.1 Couplage système main-bras – structure

Cette thèse a permis de démontrer que les techniques de sous-structuration permettent de prédire l'influence du système main-bras sur le comportement dynamique d'une structure mécanique. Deux techniques de sous-structuration ont été identifiées et testées. Plusieurs cas d'étude ont été proposés impliquant la méthode de couplage par impédance et la méthode de couplage FBS (Frequency-Based Substructuring). Ces différents cas impliquaient des couplages uni-axiaux ou bi-axiaux, expérimentaux ou hybrides (c'est-à-dire combinant des résultats expérimentaux avec des résultats analytiques ou numériques), avec une ou deux mains et selon plusieurs postures distinctes.

Les différents résultats indiquent qu'il est important de contrôler un certain nombre de paramètres lors de la réalisation de couplage par sous-structuration entre le système main-bras et une structure mécanique afin d'obtenir des prédictions fiables du comportement dynamique de l'assemblage. Il est également important de bien caractériser la surface de contact entre les deux sous-structures. Ces réalisations ont montré les avantages liés à l'utilisation de méthodes de couplage par sous-structuration :

- Combinaison de structures quand uniquement les données d'interface sont disponibles
- Calculs directs et relativement simples
- Réduction de la taille du modèle pour que seuls les degrés de liberté d'intérêt soient considérés
- Utilisation directe des données expérimentales obtenues par pot vibrant
- Utilisation hybride de données expérimentales et numériques (FRFs expérimentales et FRFs EF)

7.2 Réponses biodynamiques et Gain Universel

Cette thèse a également permis de caractériser la réponse biodynamique du système main-bras selon plusieurs configurations. Plusieurs cas d'étude ont été proposés impliquant deux postures dites « standards » et trois postures dites « cyclistes ». La caractérisation de la réponse biodynamique du système main-bras en postures « cyclistes » n'ayant jamais été réalisée par le passé, ces caractérisations ont permis une meilleure compréhension de l'influence du système main-bras sur le comportement dynamique de l'assemblage vélo – cycliste.

Une analyse de variabilité de réponses biodynamiques du système main-bras pour les trois postures « cyclistes » a révélé que des caractéristiques communes aux dix sujets pouvaient être identifiées. Des zones fréquentielles communes ont été identifiées sur les courbes d'impédance de tous les sujets en termes de minima ou de maxima. L'identification de ces zones communes pour plusieurs sujets a conduit à l'hypothèse d'existence d'un « Gain Universel ». L'ajout des réponses biodynamiques du système main-bras de deux sujets en postures « cyclistes » confirme qu'un « Gain Universel » est effectivement envisageable en postures « cyclistes ».

7.3 Prédiction de la puissance transmise et influence du cycliste

Les résultats de cette thèse ont permis de mettre en évidence que le système main-bras contribue majoritairement au comportement dynamique pour la partie avant de l'assemblage vélo – cycliste. Le système main-bras est la structure qui a le plus d'influence sur la puissance mesurée à l'interface. Il a été démontré que la puissance réellement transmise au niveau de la cocotte sur l'assemblage vélo – cycliste peut être prédite en prenant uniquement en compte les caractéristiques dynamiques de la route et la réponse biodynamique du système mains-bras dans la posture cycliste associée.

Le comportement dynamique du vélo n'est pourtant pas négligeable. Le vélo possède une part de contribution faible sur le comportement dynamique de l'assemblage vélo – cycliste mais il existe des différences entre les vélos en termes de puissance transmise au cycliste. La non nécessité d'inclure le comportement dynamique du vélo pour prédire la puissance au niveau de la main rend le modèle insensible à un quelconque changement de vélo. Afin de remédier à cela, une méthode de caractérisation des vélos seuls a été proposée pour classer les vélos en fonction de leur transmissibilité.

7.4 Méthode de caractérisation des vélos seuls

La méthode de caractérisation des vélos seuls avec masses aux cocottes a permis d'obtenir un classement en fonction de la transmissibilité entre une excitation sous la roue avant et la cocotte. Cette méthode a démontré un certain nombre d'avantages lié à l'absence de cycliste permettant d'obtenir une meilleure discrimination entre les vélos. Le classement obtenu à l'aide de cette méthode de caractérisation des vélos seuls est similaire à celui obtenu à l'aide de la puissance mesurée au niveau de la main du cycliste pour 8 vélos.

7.5 Contributions

Cette thèse a proposé d'appliquer les techniques de sous-structuration dans un contexte d'assemblage dont une des structures est l'Humain. Aucune tentative n'avait été effectuée par le passé pour combiner des caractérisations biodynamiques avec les caractérisations dynamiques d'une structure mécanique par sous-structuration. Cette réalisation est une contribution originale afin de prédire l'influence du système main-bras sur le comportement dynamique de la structure mécanique avec laquelle il est en contact.

L'objectif initial des techniques de sous-structuration est également conservé. Cet objectif initial est de pouvoir étudier et améliorer le comportement dynamique d'assemblages par caractérisation de chacune des sous-structures séparément. Dans cette thèse, la réponse biodynamique du système main-bras seul a été étudiée. Aucune étude scientifique n'avait auparavant caractérisée la réponse biodynamique du système main-bras en postures cyclistes. Cette réalisation constitue également une contribution originale.

De plus, les précédentes études menées sur le système main-bras par la communauté scientifique concluaient que les réponses biodynamiques sont spécifiques à l'individu. L'analyse de la variabilité de réponses biodynamiques du système main-bras en postures cyclistes a révélé que des caractéristiques communes étaient identifiables pour une population de sujets. Cette identification de caractéristiques communes à plusieurs sujets est une contribution qui permet d'établir le concept de « Gain Universel ».

Ce doctorat a également permis le développement d'un modèle permettant de prédire la puissance transmise au niveau de la main du cycliste par sous-structuration et d'une méthode de caractérisation des vélos seuls. L'utilisation de cette méthode a nécessité le développement d'un système de précharge du pneu à la fois original et innovant. Cette contribution pourra être utilisée par l'entreprise partenaire de ce projet (Cervélo) afin de tester leurs nouveaux vélos.

Finalement, cette thèse a proposé une nouvelle vision afin d'étudier la transmission des vibrations dans le contexte d'interactions Humain – structure.

- **Analyser** les réponses biodynamiques
- **Prédire** la puissance transmise par sous-structuration
- **Discriminer** la structure qui confère le moins de vibrations transmises au corps humain

L'ensemble de ces contributions constitue une partie de l'information nécessaire à l'amélioration du comportement dynamique des vélos de route dans le but de réduire les vibrations transmises aux cyclistes et ainsi améliorer leur confort.

7.6 Futurs travaux suggérés

Les futurs travaux suggérés concernent l'utilisation de cette approche afin de prédire la puissance transmise au niveau des fesses du cycliste par sous-structuration. Ces travaux consisteraient à :

- Mesurer la réponse biodynamique en position assise de plusieurs sujets en postures cyclistes
- Analyser la variabilité des mesures et identifier des caractéristiques communes entre les sujets
- Mesurer la puissance au niveau de la selle sur l'assemblage vélo – cycliste
- Comparer le modèle de prédiction et la puissance mesurée au niveau de la selle
- Classer différents vélos en fonction de la puissance mesurée à la selle sur l'assemblage
- Utiliser la méthode de caractérisation des vélos seuls avec la partie arrière et classer les vélos
- Comparer les deux classements

La méthode de caractérisation des vélos seuls serait utilisée en excitant uniquement la roue arrière, en préchargeant le pneu arrière à l'aide du système de précharge et en mettant une masse adéquate au niveau de la selle. Une masse de 10 kg pourrait être utilisée.

La méthode de caractérisation des vélos seuls pourrait, par la suite, être testée pour l'ensemble du vélo. Ceci serait fait en utilisant une excitation sous les deux roues, des masses de 2 kg aux cocottes, une masse de 10 kg à la selle et le système de précharge pour les deux roues du vélo.

Le dernier travail suggéré concerne le développement et l'utilisation d'un mannequin reproduisant les caractéristiques dynamiques de l'Humain en position cycliste, que ce soit au niveau de la selle ou au niveau des cocottes. Ceci serait rendu possible grâce à l'utilisation des mesures de réponse biodynamique du système main-bras et des fesses comme mesures cibles du comportement dynamique du mannequin à développer. Par ailleurs, ce développement aurait plusieurs avantages :

- (1) Le vélo serait chargé avec des éléments plus représentatifs que des masses
- (2) En plus de la mesure de transmissibilité, la mesure de puissance serait également possible
- (3) Le protocole serait représentatif du contexte réel comprenant un cycliste sur son vélo
- (4) Il n'y aurait pas besoin de contrôler la posture du cycliste lors des mesures sur l'assemblage
- (5) Il n'y aurait pas de variabilité de mesures due à l'influence de l'Humain
- (6) Le mannequin développé n'a pas besoin d'être en un seul morceau
- (7) Le développement de la partie avant peut être indépendant de la partie arrière, et vice-versa
- (8) Le mannequin doit seulement reproduire le comportement dynamique aux différentes interfaces

D'autres travaux sont également envisageables en utilisant les techniques de sous-structuration pour réaliser divers couplages Humain – structure. L'approche combinée de l'analyse de la réponse biodynamique et du couplage par sous-structuration offre de nouvelles perspectives pour l'étude des interactions Humain-structure sous sollicitation vibratoire. Il est espéré que cette approche soit appliquée, un jour, à d'autres structures complexes du milieu industriel.

8 ANNEXES

8.1 Vitesse à l'interface entre deux structures dans le cas d'une excitation par la base

Considérons un assemblage composé de deux sous-structures (figure 8-1). On cherche à connaître la vitesse à l'interface I suivant l'axe vertical z en fonction de la vitesse d'excitation verticale à la base A .

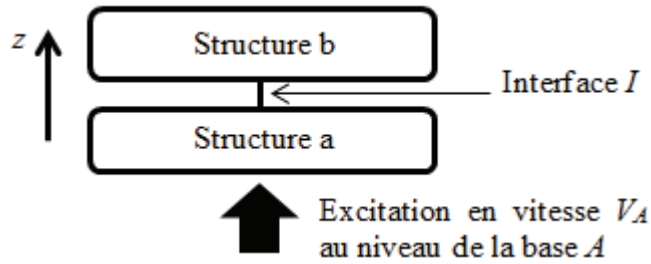


Figure 8-1 : Schéma d'un assemblage de deux structures avec excitation en vitesse au niveau de la base

Cet assemblage possède deux points d'intérêt et peut être exprimé pour chaque fréquence à l'aide d'une formulation en impédance :

$$\begin{bmatrix} Z_{AzAz}^{ab}(\omega) & Z_{AzIz}^{ab}(\omega) \\ Z_{IzAz}^{ab}(\omega) & Z_{IzIz}^{ab}(\omega) \end{bmatrix} \quad (8.1)$$

L'assemblage est simplement déposé sur le système d'excitation. Il est donc possible d'obtenir une formulation qui tienne compte de ces conditions :

$$\begin{Bmatrix} F_{Az}^{ab}(\omega) \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{AzAz}^{ab}(\omega) & Z_{AzIz}^{ab}(\omega) \\ Z_{IzAz}^{ab}(\omega) & Z_{IzIz}^{ab}(\omega) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V_{Az}^{ab}(\omega) \\ V_{Iz}^{ab}(\omega) \end{Bmatrix} \quad (8.2)$$

On peut décomposer cette équation afin d'obtenir le système de deux équations suivantes :

$$F_{Az}^{ab}(\omega) = Z_{AzAz}^{ab}(\omega)V_{Az}^{ab}(\omega) + Z_{AzIz}^{ab}(\omega)V_{Iz}^{ab}(\omega) \quad (8.3)$$

$$0 = Z_{IzAz}^{ab}(\omega)V_{Az}^{ab}(\omega) + Z_{IzIz}^{ab}(\omega)V_{Iz}^{ab}(\omega) \quad (8.4)$$

L'équation (8.4) permet de faire le lien entre la vitesse à l'interface I et la vitesse d'excitation par la base A de la manière suivante :

$$V_{Iz}^{ab}(\omega) = -\frac{Z_{IzAz}^{ab}(\omega)}{Z_{IzIz}^{ab}(\omega)}V_{Az}^{ab}(\omega) \quad (8.5)$$

Cette formulation permet d'obtenir la fonction de transmissibilité en fonction de la caractérisation en impédance de cet assemblage « ab » :

$$\left| \frac{V_{Iz}(\omega)}{V_{Az}(\omega)} \right|^{\text{ab}} = \left| \frac{Z_{IzAz}^{\text{ab}}(\omega)}{Z_{IzIz}^{\text{ab}}(\omega)} \right| \quad (8.6)$$

Grâce à la formulation de sous-structuration en impédance, la formulation (8.1) peut être exprimée en fonction de l'impédance des deux structures « a » et « b » séparément :

$$\begin{bmatrix} Z_{AzAz}^{\text{ab}}(\omega) & Z_{AzIz}^{\text{ab}}(\omega) \\ Z_{IzAz}^{\text{ab}}(\omega) & Z_{IzIz}^{\text{ab}}(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{AzAz}^{\text{a}}(\omega) & Z_{AzIz}^{\text{a}}(\omega) \\ Z_{IzAz}^{\text{a}}(\omega) & Z_{IzIz}^{\text{a}}(\omega) + Z_{IzIz}^{\text{b}}(\omega) \end{bmatrix} \quad (8.7)$$

On peut alors exprimer la relation (8.6) de transmissibilité de l'assemblage « ab » en fonction du comportement dynamique en impédance de chacune des structures prise séparément :

$$\left| \frac{V_{Iz}(\omega)}{V_{Az}(\omega)} \right|^{\text{ab}} = \left| \frac{Z_{IzAz}^{\text{a}}(\omega)}{Z_{IzIz}^{\text{a}}(\omega) + Z_{IzIz}^{\text{b}}(\omega)} \right| \quad (8.8)$$

Par ailleurs, par analogie avec la relation (8.6), la fonction de transmissibilité de la structure « a » seule peut s'exprimer de la manière suivante :

$$\left| \frac{V_{Iz}(\omega)}{V_{Az}(\omega)} \right|^{\text{a}} = \left| \frac{Z_{IzAz}^{\text{a}}(\omega)}{Z_{IzIz}^{\text{a}}(\omega)} \right| \quad (8.9)$$

Il devient alors possible d'exprimer la fonction de transmissibilité de l'assemblage « ab » en fonction de la fonction de transmissibilité de la structure « a » seule et des caractéristiques dynamiques en impédance des deux structures « a » et « b » prises séparément :

$$\left| \frac{V_{Iz}(\omega)}{V_{Az}(\omega)} \right|^{\text{ab}} = \left| \frac{V_{Iz}(\omega)}{V_{Az}(\omega)} \right|^{\text{a}} \left| \frac{Z_{IzIz}^{\text{a}}(\omega)}{Z_{IzIz}^{\text{a}}(\omega) + Z_{IzIz}^{\text{b}}(\omega)} \right| \quad (8.10)$$

Dans le cas d'une excitation contrôlée en vitesse, on a $V_{Az}^{\text{ab}}(\omega) = V_{Az}^{\text{a}}(\omega) = V_{Az}(\omega)$.

La formulation (8.10) peut être simplifiée pour exprimer la vitesse à l'interface I sur l'assemblage « ab » en fonction de la vitesse à l'interface sur la structure « a » seule et de l'impédance à l'interface des deux structures « a » et « b » prises séparément :

$$\left| V_{Iz}^{\text{ab}} \right| = \left| V_{Iz}^{\text{a}} \right| \left| \frac{Z_{IzIz}^{\text{a}}}{Z_{IzIz}^{\text{a}} + Z_{IzIz}^{\text{b}}} \right| \quad (8.11)$$

8.2 Cocotte instrumentée

La cocotte qui est instrumentée pour pouvoir déterminer la force et la vitesse nécessaires à l'évaluation de la puissance vibratoire utilise un corps d'épreuve sur lequel sont installés des jauges de déformations et un accéléromètre (figure 8-2). Après calibration, les jauges de déformations (figure 8-3) permettent une évaluation de la force verticale exercée au niveau de la cocotte. La mesure d'accélération est intégrée pour obtenir la vitesse.

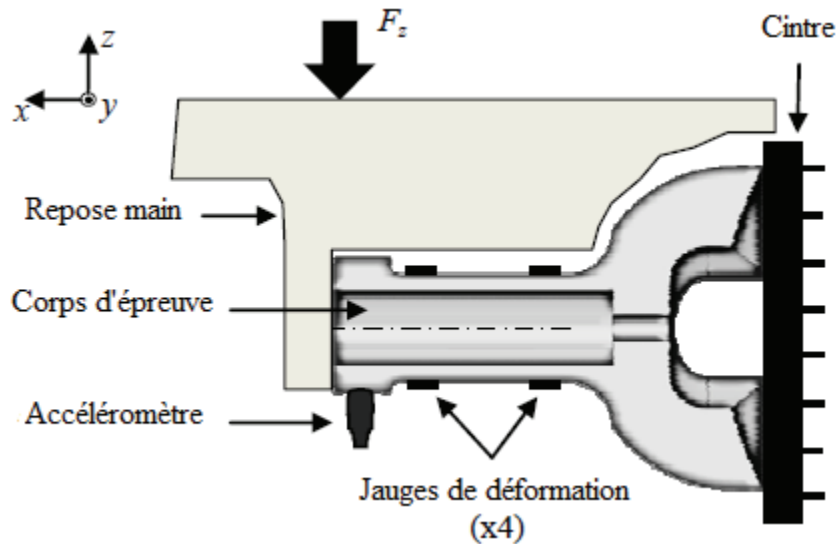


Figure 8-2 : Schéma en vue de coupe de la cocotte instrumentée



Figure 8-3 : Visualisation des jauges installées sur le corps d'épreuve de la cocotte instrumentée

Afin d'assurer une mesure adéquate de la force verticale, la partie supérieure du repose main doit être parfaitement horizontale. Pour cela, des précautions de positionnement sont prises lors du montage des cocottes instrumentées sur le cintre (figure 8-4).



Figure 8-4 : Installation des cocottes instrumentées sur un cintre

La figure suivante schématise le positionnement horizontal de la cocotte par rapport au cintre.

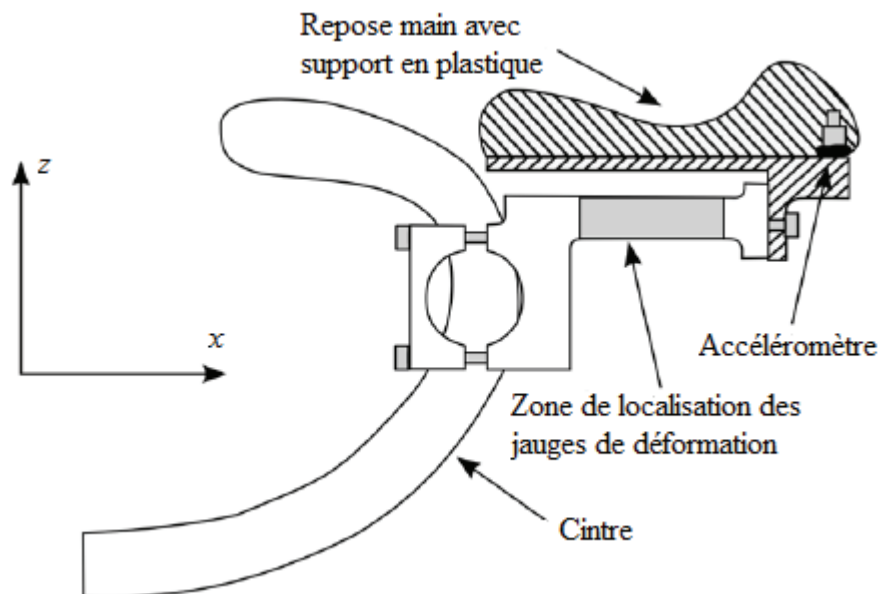


Figure 8-5 : Schéma de présentation de la cocotte instrumentée installée sur un cintre

9 LISTE DES RÉFÉRENCES

- Adeyusi, S., Rakheja, S. et Marcotte, P. (2012). Biomechanical models of the human hand-arm to simulate distributed biodynamic responses for different postures. *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 42, no 2, p. 249-260.
- Adeyusi, S., Rakheja, S., Marcotte, P. et Thomas, M. (2013). Distributed vibration power absorption of the human hand-arm system in different postures coupled with vibrating handle and power tools. *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 43, no 4, p. 363-374.
- Adeyusi, S. A., Rakheja, S., Marcotte, P. et Boileau, P. -. (2008). On the discrepancies in the reported human hand-arm impedance at higher frequencies. *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 38, no 9-10, p. 703-14.
- Adeyusi, S. A., Rakheja, S., Marcotte, P. et Boutin, J. (2010). Vibration transmissibility characteristics of the human hand-arm system under different postures, hand forces and excitation levels. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 329, no 14, p. 2953-71.
- Aldien, Y., Marcotte, P., Rakheja, S. et Boileau, P. -. (2006). Influence of hand-arm posture on biodynamic response of the human hand-arm exposed to zh-axis vibration. *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 36, no 1, p. 45-59.
- Aldien, Y., Marcotte, P., Rakheja, S. et BOILEAU, P. É. (2005). Mechanical impedance and absorbed power of hand-arm under xh-axis vibration and role of hand forces and posture. *Industrial health*, Vol. 43, no 3, p. 495-508.
- Aldien, Y., Marcotte, P., Rakheja, S. et Boileau, P. -. (2006). Influence of hand forces and handle size on power absorption of the human hand-arm exposed to zh-axis vibration. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 290, no 3-5, p. 1015-1039.
- Aldien, Y., Welcome, D., Rakheja, S., Dong, R. et Boileau, P. -. (2005). Contact pressure distribution at hand-handle interface: Role of hand forces and handle size. *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 35, no 3, p. 267-286.
- Allen, M. S. et Mayes, R. L. (2007). Comparison of FRF and modal methods for combining experimental and analytical substructures. *25th Conference and Exposition on Structural Dynamics 2007, IMAC-XXV, February 19, 2007 - February 22*. Springer New York, Orlando, FL, United states, p. Society for Experimental Mechanics (SEM).
- Avitabile, P. (2003). Twenty years of structural dynamic modification-a review. *Sound and Vibration*, Vol. 37, no 1, p. 14-27.
- Avitabile, P., O'CALLAHAN, J. et CHOU, C. (1987). Expansion of rotational degrees of freedom for structural dynamic modifications. *International Modal Analysis Conference, 5 th, London, England* p. 950-955.
- Avitabile, P. et Piergentili, F. (1997). Consideration for effects of rotational degrees of freedom for hybrid modeling applications. *PROCEEDINGS-SPIE THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING*. SPIE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL, p. 792-798.

- Ayachi, F. S., Dorey, J. et Guastavino, C. (2013). Identifying factors of bicycle comfort : An online survey with enthusiast cyclists. *Applied ergonomics*,
- Besa, A. J., Valero, F. J., Suner, J. L. et Carballeira, J. (2007). Characterisation of the mechanical impedance of the human hand-arm system: The influence of vibration direction, hand-arm posture and muscle tension. *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 37, no 3, p. 225-31.
- Boileau, P. -, Rakheja, S. et Wu, X. (2002). A body mass dependent mechanical impedance model for applications in vibration seat testing. *2nd International Conference on Whole-Body Vibration Injuries, November 7, 2000 - November 9*, Vol. 253. Academic Press, Siena, Italy, p. 243-264.
- Boileau, P. E., Rakheja, S., Yang, X. et Stiharu, T. (1997). Comparison of biodynamic response characteristics of various human body models as applied to seated vehicle drivers. *Noise & Vibration Worldwide*, Vol. 28, no 9, p. 7-15.
- Brody, H. (1996). Modern tennis racket. *Proceedings of the 1996 1st International Conference on the Engineering of Sport* Sheffield, United kingdom, p. 79-79.
- Burström, L. (1997). *The influence of biodynamic factors on the mechanical impedance of the hand and arm*
- Burström, L. (1990). Measurements of the impedance of the hand and arm. *International archives of occupational and environmental health*, Vol. 62, no 6, p. 431-439.
- Burström, L. et Lundström, R. (1994). Absorption of vibration energy in the human hand and arm. *Ergonomics*, Vol. 37, no 5, p. 879-890.
- Burström, L., Lundström, R., Hagberg, M. et Nilsson, T. (1998). Comparison of different measures for hand-arm vibration exposure. *Safety Science*, Vol. 28, no 1, p. 3-14.
- Burström, L. et Sorensson, A. (1999). The influence of shock-type vibrations on the absorption of mechanical energy in the hand and arm. *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 23, no 5-6, p. 585-594.
- Cafeo, J., Trethewey, M. et Sommer, H. (1993). On the Use of Measured Rotational Degrees-of-freedom in Structural Dynamics Modification. *PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL MODAL ANALYSIS CONFERENCE*. SEM SOCIETY FOR EXPERIMENTAL MECHANICS INC, p. 96-96.
- Champoux, Y., Richard, S. et Drouet, J. -. (2007). Bicycle structural dynamics. *sound and vibration*, Vol. 41, no 7, p. 16-24.
- Chimentin, X., Rigaut, M., Crequy, S., Bolaers, F. et Bertucci, W. (2013). Hand-arm vibration in cycling. *JVC/Journal of Vibration and Control*, Vol. 19, no 16, p. 2551-2560.
- Concettoni, E. et Griffin, M. (2009). The apparent mass and mechanical impedance of the hand and the transmission of vibration to the fingers, hand, and arm. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 325, no 3, p. 664-678.
- Concettoni, E., Martarelli, M., Paone, N. et Scalise, L. (2007). Design and vibrational characterisation of a novel instrumented handle for grip force measurement. *25th Conference and Exposition on Structural Dynamics 2007, IMAC-XXV, February 19, 2007*

- February 22. Springer New York, Orlando, FL, United states, p. Society for Experimental Mechanics (SEM).
- Craig, R. R., J. et Bampton, M. C. C. (1968). Coupling of substructures for dynamic analyses. *AIAA Journal*, Vol. 6, no 7, p. 1313-19.
- Craig, R. (1976). A review of substructure coupling methods for dynamic analysis. *NASA.Langley Res.Center Advan.in Eng.Sci*, Vol. 2,
- Craig, R. (1995). Substructure methods in vibration. *Journal of mechanical design*, Vol. 117, no B, p. 207-213.
- Crowley, J. R., Klosterman, A. L., Rocklin, G. T. et Vold, H. (1984). DIRECT STRUCTURAL MODIFICATION USING FREQUENCY RESPONSE FUNCTIONS. *Proceedings of the 2nd International Modal Analysis Conference & Exhibit.*, Vol. 1. Union Coll, Orlando, FL, USA, p. 58-65.
- Cundiff, J. S. (1976). Energy dissipation in human hand-arm exposed to random vibration. *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 59, no 1, p. 212-14.
- Cundiff, J. S. et Mishoe, J. W. (1975). HAND - ARM VIBRATION. *Paper - American Society of Agricultural Engineers*,
- Cuppens, K., Sas, P. et Hermans, L. (2000). Evaluation of the FRF based substructuring and modal synthesis technique applied to vehicle FE data. *Proceedings of the 25th International Conference on Noise and Vibration Engineering, ISMA, September 13, 2000 - September 15*. Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Belgium, p. 1165-1172.
- De Klerk, D., Rixen, D. J., Voormeeren, S. N. et Pasteuning, F. (2008). Solving the RDoF problem in experimental dynamic substructuring. *26th Conference and Exposition on Structural Dynamics 2008, IMAC-XXVI, February 4, 2008 - February 7*. Springer New York, Orlando, FL, United states, p. Society for Experimental Mechanics (SEM).
- de Klerk, D., Rixen, D. et de Jong, J. (2006). The frequency based substructuring (FBS) method reformulated according to the dual domain decomposition method. *Proceedings of the Fifteenth International Modal Analysis Conference, St. Louis, MO*
- De Klerk, D., Rixen, D. et Voormeeren, S. (2008). General framework for dynamic substructuring: History, review, and classification of techniques. *AIAA Journal*, Vol. 46, no 5, p. 1169.
- Dong, R. G., Welcome, D. E., McDowell, T. W., Xu, X. S., Krajnak, K. et Wu, J. Z. (2012). A proposed theory on biodynamic frequency weighting for hand-transmitted vibration exposure. *Industrial health*, Vol. 50, no 5, p. 412-424.
- Dong, J. H., Dong, R. G., Rakheja, S., Welcome, D. E., McDowell, T. W. et Wu, J. Z. (2008). A method for analyzing absorbed power distribution in the hand and arm substructures when operating vibrating tools. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 311, no 3-5, p. 1286-1304.
- Dong, R. G., Rakheja, S., McDowell, T. W., Welcome, D. E. et Wu, J. Z. (2010). Estimation of the biodynamic responses distributed at fingers and palm based on the total response of the hand-arm system. *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 40, no 4, p. 425-36.

- Dong, R. G., Rakheja, S., Schopper, A. W., Han, B. et Smutz, W. P. (2001). Hand-transmitted vibration and biodynamic response of the human hand-arm: a critical review. *Critical Reviews in Biomedical Engineering*, Vol. 29, no 4, p. 393-439.
- Dong, R. G., Schopper, A. W., McDowell, T. W., Welcome, D. E., Wu, J. Z., Smutz, W. P., Warren, C. et Rakheja, S. (2004). Vibration energy absorption (VEA) in human fingers-hand-arm system. *Medical Engineering and Physics*, Vol. 26, no 6, p. 483-492.
- Dong, R. G., Welcome, D. E., McDowell, T. W. et Wu, J. Z. (2006). Measurement of biodynamic response of human hand-arm system. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 294, no 4, p. 807-827.
- Dong, R. G., Welcome, D. E., Wu, J. Z. et McDowell, T. W. (2008). Development of hand-arm system models for vibrating tool analysis and test rig construction. *Noise Control Engineering Journal*, Vol. 56, no 1, p. 35-44.
- Dong, R. G., Wu, J. Z., McDowell, T. W., Welcome, D. E. et Schopper, A. W. (2005). Distribution of mechanical impedance at the fingers and the palm of the human hand. *Journal of Biomechanics*, Vol. 38, no 5, p. 1165-1175.
- Dong, R. G., Wu, J. Z. et Welcome, D. E. (2005). Recent advances in biodynamics of human hand-arm system. *Industrial health*, Vol. 43, no 3, p. 449-471.
- Dong, R. G., Wu, J. Z., Welcome, D. E. et McDowell, T. W. (2008). A discussion on comparing alternative vibration measures with frequency-weighted accelerations defined in ISO standards. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 317, no 3-5, p. 1042-50.
- Dong, R. G., Dong, J. H., Wu, J. Z. et Rakheja, S. (2007). Modeling of biodynamic responses distributed at the fingers and the palm of the human hand-arm system. *Journal of Biomechanics*, Vol. 40, no 10, p. 2335-2340.
- Dong, R. G., Welcome, D. E., McDowell, T. W. et Wu, J. Z. (2008). Analysis of handle dynamics-induced errors in hand biodynamic measurements. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 318, no 4-5, p. 1313-1333.
- Dong, R. G., Welcome, D. E., McDowell, T. W. et Wu, J. Z. (2009). Methods for deriving a representative biodynamic response of the hand-arm system to vibration. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 325, no 4-5, p. 1047-1061.
- Dong, R. G., Welcome, D. E., McDowell, T. W. et Wu, J. Z. (2013). Modeling of the biodynamic responses distributed at the fingers and palm of the hand in three orthogonal directions. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 332, no 4, p. 1125-1140.
- Dong, R. G., Welcome, D. E., McDowell, T. W., Wu, J. Z. et Schopper, A. W. (2006). Frequency weighting derived from power absorption of fingers-hand-arm system under zh-axis vibration. *Journal of Biomechanics*, Vol. 39, no 12, p. 2311-2324.
- Dong, R. G., Welcome, D. E., Xu, X. S., Warren, C., McDowell, T. W., Wu, J. Z. et Rakheja, S. (2012). Mechanical impedances distributed at the fingers and palm of the human hand in three orthogonal directions. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 331, no 5, p. 1191-1206.

- Ekstrom, E. A. (1996). Vibrations on the golf course. *Proceedings of the 1996 1st International Conference on the Engineering of Sport* Sheffield, United kingdom, p. 315-315.
- Ewins, D. J. (2000). *Modal Testing Theory, Practice and application*, 2nd Edition édition. Research Studies Press,
- Ferraresi, C., Garibaldi, L., Perocchio, D. et Piombo, B. A. D. (1998). *DYNAMIC BEHAVIOR AND OPTIMISATION OF FRAMES FOR ROAD AND MOUNTAIN BIKES*, IMAC, 387-393 p.
- Gialamas, T., Tsahalis, D., Bregant, L., Otte, D. et Van der Auweraer, H. (1996). Substructuring by Means of FRFs: Some Investigations on the Significance of Rotational DOFs. *PROCEEDINGS-SPIE THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING*. SPIE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL, p. 619-625.
- Griffin, M. J. (1990). *Handbook of Human Vibration*, Academic Press édition London,
- Gurram, R., Rakheja, S. et Brammer, A. J. (1995). Driving-point mechanical impedance of the human hand-arm system: synthesis and model development. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 180, no 3, p. 437-58.
- Gurram, R., Rakheja, S. et Gouw, G. J. (1995). Mechanical impedance of the human hand-arm system subject to sinusoidal and stochastic excitations. *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 16, no 2, p. 135-135.
- Hastings, A., Blair, K., Culligan, F. et Pober, D. Measuring the effect of transmitted road vibration on cycling performance. *The Engineering of Sport*, Vol. 5,
- Hempstock, T. I. et O'Connor, D. E. (1986). Accuracy of measuring impedance in the hand-arm system. *Scandinavian journal of work, environment & health*, p. 355-358.
- Hölzel, C., Höchtel, F. et Senner, V. (2012). Cycling comfort on different road surfaces. *Procedia Engineering*, Vol. 34, p. 479-484.
- Hurty, W. C. (1960). Vibrations of structural systems by component mode synthesis. *ASCE -- Proceedings -- Journal of the Engineering Mechanics Division*, Vol. 86, p. 51-69.
- Imregun, M., Robb, D. et Ewins, D. (1987). Structural modification and coupling dynamic analysis using measured FRF data. *International Modal Analysis Conference, 5 th, London, England* p. 1136-1141.
- International Organization for Standardization (1997). *ISO-2631-1 : Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part I : General requirements*. International Organization for Standardization,
- International Organization for Standardization (2001). *ISO-5349-1: Mechanical vibration - Measurement and evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration - Part I: General requirements*. International Organization for Standardization,
- International Organization for Standardization (2001). *ISO-5982: Mechanical vibration and shock - Range of idealized values to characterize seated-body biodynamic response under vertical vibration*. International Organization for Standardization,

- International Organization for Standardization (2012). *ISO-10068: Mechanical vibration and shock - Mechanical impedance of the human hand-arm system at the driving point*. International Organization for Standardization,
- Jetmundsen, B. (1986). *On frequency domain methodologies for prescribed structural modification and subsystem synthesis*. PhD thesis, Rensselaer Polytechnic Institute,
- Jetmundsen, B., Bielawa, R. L. et Flannelly, W. G. (1988). GENERALIZED FREQUENCY DOMAIN SUBSTRUCTURE SYNTHESIS. *Journal of the American Helicopter Society*, Vol. 33, no 1, p. 55-64.
- Katsanis, D. et Grove, S. M. (1996). Design and prototype manufacture of a composite bicycle frame. *Proceedings of the 1996 1st International Conference on the Engineering of Sport* Sheffield, United kingdom, p. 97-97.
- Kaulbars, U. et Lemerle, P. (2007). Measurement of the coupling forces for evaluating the hand-arm vibrations - Refinement of a measuring system; Messung der Ankopplungskrafte zur Beurteilung der Hand-Arm- Schwingungen - Weiterentwicklung Eines Messsystems. *VDI Berichte*, no 2002, p. 99-111.
- Klosterman, A. (1971). *On the Experimental Determination and Use of Modal Representations of Dynamic Characteristics*. PhD Thesis, University of Cincinnati,
- Lepine, J., Champoux, Y. et Drouet, J. -. (2013). A Laboratory Excitation Technique to Test Road Bike Vibration Transmission.
- Lepine, J., Champoux, Y. et Drouet, J. (2011). Excitation techniques for testing bike vibration transmission in the laboratory. *29th IMAC, a Conference on Structural Dynamics, 2011, January 31, 2011 - February 3, 2011*, Vol. 6. Springer New York, Jacksonville, FL, United states, p. 35-43.
- Lepine, J., Champoux, Y. et Drouet, J. (2013). Road bike comfort: on the measurement of vibrations induced to cyclist. p. 1-10.
- Lewis, C. H. et Griffin, M. J. (2002). Evaluating the vibration isolation of soft seat cushions using an active anthropodynamic dummy. *2nd International Conference on Whole-Body Vibration Injuries, November 7, 2000 - November 9, 2000*, Vol. 253. Academic Press, Siena, Italy, p. 295-311.
- Liu, W. (2000). *Structural dynamic analysis and testing of coupled structures*,
- Lundstrom, R. et Burstrom, L. (1989). Mechanical impedance of the human hand-arm system. *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 3, no 3, p. 235-242.
- MACNEAL, R. H. (1971). Hybrid method of component mode synthesis. *Computers and Structures*, Vol. 1, no 4, p. 581-601.
- Mansfield, N. J. (2005). *Human response to vibration*, CRC Press édition
- Marcotte, P. (2008). Comments on "A discussion on comparing alternative measures with frequency-weighted accelerations defined in ISO Standards" R.G. Dong, J.Z. Wu, D.E. Welcome, T.W. McDowell, *Journal of Sound and Vibration*]. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 317, no 3-5, p. 1051-6.

- Marcotte, P., Adewusi, S., Boutin, J., Nélisse, H., Rakheja, S. et Boileau, P. (2007). MODELLING THE CONTRIBUTIONS OF HANDLE DYNAMICS ON THE BIODYNAMIC RESPONSE OF THE HUMAN HAND-ARM SYSTEM. *Proceedings of the 11th International Conference on Hand-Arm Vibration* p. 321-326.
- Marcotte, P., Aldien, Y., Boileau, P. - P. -, Rakheja, S. et Boutin, J. (2005). Effect of handle size and hand-handle contact force on the biodynamic response of the hand-arm system under zh-axis vibration. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 283, no 3-5, p. 1071-91.
- Marsili, R. et Rossi, G. L. (1996). Measurement of contact and grip force as reference for human hand transmitted vibration evaluation by laser scanning vibrometers. *Second International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques: Advances and Applications, September 23, 1996 - September 25, 1996*, Vol. 2868 Washington, DC, USA, p. 302-309.
- Mayes, R. L. et Ross, M. R. (2012). Advancements in hybrid dynamic models combining experimental and finite element substructures. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 31, p. 56-66.
- Mayes, R. L. (2012). Tutorial on experimental dynamic substructuring using the transmission simulator method. *30th IMAC, A Conference on Structural Dynamics, 2012, January 30, 2012 - February 2, 2012*, Vol. 2. Springer New York, Jacksonville, FL, United states, p. 1-9.
- Mayes, R. L., Ross, M. et Hunter, P. S. (2011). Examples of hybrid dynamic models combining experimental and finite element substructures. *28th IMAC, A Conference on Structural Dynamics, 2010, February 1, 2010 - February 4, 2010*, Vol. 3. Springer New York, Jacksonville, FL, United states, p. 1065-1082.
- Mishoe, J. W. et Suggs, C. W. (1977). Hand-arm vibration. II. Vibrational responses of the human hand. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 53, no 4, p. 545-58.
- Miwa, T. (1967). Evaluation methods for vibration effects. Part 3: measurement of threshold and equal sensation contours on hand for vertical and horizontal sinusoidal vibration. *Industrial health*, Vol. 5, p. 213-220.
- Miwa, T. (1988). Measurement and evaluation of hand-transmitted vibrations by means of their powers. *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*, Vol. 9, no 5, p. 247-53.
- Muller, W. et DeVaney, T. T. J. (1996). Influence of body weight on ski jumping performance. *Proceedings of the 1996 1st International Conference on the Engineering of Sport* Sheffield, United kingdom, p. 63-63.
- Olieman, M., Marin-Perianu, R. et Marin-Perianu, M. (2012). Measurement of dynamic comfort in cycling using wireless acceleration sensors. *Procedia Engineering*, Vol. 34, p. 568-573.
- Otte, D., Leuridan, J., Grangier, H. et Aquilina, R. (1991). Prediction of the dynamics of structural assemblies using measured FRF-data: some improved data enhancement techniques. *Proceeding of 9th International Modal Analysis Conference* p. 909-918.
- Panzke, K. J. et Balasus, W. (1985). Time dependence and non-linearity of the impedance of the human hand-arm system while exposed to intense vibration. *International archives of occupational and environmental health*, Vol. 57, no 1, p. 35-45.

- Pitts, P. (2003). Uncertainty in evaluating exposure to hand-transmitted vibration. *Acoustics Bulletin*, Vol. 28, no 5, p. 16-23.
- Pradko, F., Lee, R. A. et Greene, J. D. (1965). Human vibration-response theory. *ASME Meeting WA/HUF-19*. American Society of Mechanical Engineers (ASME), New York, NY, United States, p. 11.
- Rakheja, S., Dong, R. G., Patra, S., Boileau, P. -, Marcotte, P. et Warren, C. (2010). Biodynamics of the human body under whole-body vibration: Synthesis of the reported data. *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 40, no 6, p. 710-732.
- Rakheja, S., Gurrarn, R. et Gouw, G. J. (1993). Development of linear and nonlinear hand-arm vibration models using optimization and linearization techniques. *Journal of Biomechanics*, Vol. 26, no 10, p. 1253-60.
- Rakheja, S., Wu, J. Z., Dong, R. G., Schopper, A. W. et Boileau, P. -. (2002). Comparison of biodynamic models of the human hand-arm system for applications to hand-held power tools. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 249, no 1, p. 55-82.
- Ren, Y. et Beards, C. (1995). On substructure synthesis with FRF data. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 185, no 5, p. 845-866.
- Reynolds, D. D. et Angevine, E. N. (1977). Hand-arm vibration. II. Vibration transmission characteristics of the hand and arm. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 51, no 2, p. 255-65.
- Reynolds, D. D. et Falkenberg, R. J. (1984). A study of hand vibration on chipping and grinding operators. II. Four-degree-of-freedom lumped parameter model of the vibration response of the human hand. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 95, no 4, p. 499-514.
- Reynolds, D. D. et Keith, R. H. (1977). Hand-arm vibration. I. Analytical model of the vibration response characteristics of the hand. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 51, no 2, p. 237-53.
- Reynolds, D. D. et Soedel, W. (1972). Dynamic response of the hand-arm system to a sinusoidal input. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 21, no 3, p. 339-53.
- Reynolds, D. D., Standlee, K. G. et Angevine, E. N. (1977). HAND-ARM VIBRATION, PART III: SUBJECTIVE RESPONSE CHARACTERISTICS OF INDIVIDUALS TO HAND-INDUCED VIBRATION. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 51, no 2, p. 267-282.
- Richard, S. et Champoux, Y. (2004). Modal analysis of road bike's front components. *Proceedings of IMAC, Society for Experimental Mechanics*,
- Richard, S. (2005). *Étude du comportement dynamique d'un vélo de route en lien avec le confort du cycliste*. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke,
- Richard, S. et Champoux, Y. (2005). Evaluation of road bike comfort using classical and operational modal analyses. *23rd Conference and Exposition on Structural Dynamics 2005, IMAC-XXIII, January 31, 2005 - February 3*. Springer New York, Orlando, FL, United states, p. Society for Experimental Mechanics (SEM).

- Richard, S. et Champoux, Y. (2006). Development of a metric related to the dynamic comfort of a road bike. *24th Conference and Exposition on Structural Dynamics 2006, IMAC-XXIV, January 30, 2006 - February 2*. Springer New York, St Louis, MI, United states, p. Society for Experimental Mechanics (SEM).
- Richard, S. et Champoux, Y. (2007). Evaluating the influence of damping material applied on an aluminum bike fork. *25th Conference and Exposition on Structural Dynamics 2007, IMAC-XXV, February 19, 2007 - February 22*. Springer New York, Orlando, FL, United states, p. Society for Experimental Mechanics (SEM).
- Ritz, W. (1909). Über eine neue Methode zur Lösung gewisser Variations Probleme der Mathematischen Physik. *Journal für die Reine und Angewandte Mathematik*, Vol. 135, p. 1-61.
- Rubin, S. (1975). Improved component-mode representation for structural dynamic analysis. *AIAA Journal*, Vol. 13, no 8, p. 995-1006.
- Schwarz, H. A. (1890). *Gesammelte Mathematische Abhandlungen*, Springer - Verlag éditionBerlin,
- Siefert, A., Pankoke, S. et Wölfel, H. P. (2008). Virtual optimisation of car passenger seats: Simulation of static and dynamic effects on drivers' seating comfort. *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 38, no 5, p. 410-424.
- Smiley, R. et Brinkman, B. (1984). Rotational Degrees-of-Freedom in Structural Modification. *Proceedings of the 2nd International Modal Analysis Conference*. 937-939.
- Suggs, C. W. et Mishoe, J. W. (1976). VIBRATIONAL ANALYSIS OF THE HUMAN HAND. p. 267-271.
- Thibault, J. et Champoux, Y. (2000). Rider influence on modal properties of bicycle frames. *Canadian Acoustics - Acoustique Canadienne*, Vol. 28, no 3, p. 44-45.
- Tsuji, T. et Kaneko, M. (1996). Estimation and modeling of human hand impedance during isometric muscle contraction. *Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division, DSC*, Vol. 58p. 575-582.
- Tsuji, T., Morasso, P. G., Goto, K. et Ito, K. (1995). Human hand impedance characteristics during maintained posture. *Biological cybernetics*, Vol. 72, no 6, p. 475-485.
- Urgueira, A. P. V. (1989). *Dynamic analysis of coupled structures using experimental data*. University of London,
- Urgueira, A., Almeida, R. et Maia, N. (2001). On the use of FRF coupling techniques. *Proceedings of the 19th International Modal Analysis Conference, Kissimmee, Floridap*. 1724-1729.
- van Langenhove, T. et Maasdam, J. (2000). Hybrid system modelling using frequency based substructuring: A case study. *SPIE proceedings series*. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, p. 1140-1145.
- Vanwalleghem, J., Mortier, F., De Baere, I., Loccufier, M. et Van Paeppegem, W. (2012). Instrumentation of a racing bicycle for outdoor field testing and evaluation of the cyclist's comfort perception.

- Vanwalleghem, J., Mortier, F., De Baere, I., Loccufier, M. et Van Paepegem, W. (2012). Design of an instrumented bicycle for the evaluation of bicycle dynamics and its relation with the cyclist's comfort. *Procedia Engineering*, Vol. 34, no 0, p. 485-490.
- Wasserman, D., Wasserman, J. et Ahn, J. I. (2001). Instrumentation for measuring coupling forces of hand-held tools. *S V Sound and Vibration*, Vol. 35, no 7, p. 22-25.
- Wojtowicki, J. L., Champoux, Y. et Thibault, J. (2001). MODAL PROPERTIES OF ROAD BIKES VS RIDE COMFORT. *IMAC*,
- Wood, L. A., Suggs, C. W. et Abrams, C. F., J. (1978). Hand-arm vibration. III. A distributed parameter dynamic model of the human hand-arm system. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 57, no 2, p. 157-69.
- Wu, J. Z., Dong, R. G., Welcome, D. E. et Xu, X. S. (2010). A method for analyzing vibration power absorption density in human fingertip. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 329, no 26, p. 5600-5614.
- Xu, X. S., Welcome, D. E., McDowell, T. W., Wu, J. Z., Wimer, B., Warren, C. et Dong, R. G. (2011). The vibration transmissibility and driving-point biodynamic response of the hand exposed to vibration normal to the palm. *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 41, no 5, p. 418-427.
- Yoshimura, T. et Hosoya, N. (2000). FRF Estimation on rotational Degrees of Freedom of Structures. *SPIE proceedings series*. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, p. 1667-1671.