

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté de génie
Département de génie mécanique

DÉTERMINATION DE LA CONTRIBUTION RELATIVE DES COMPOSANTS D'UN
VÉLO DE ROUTE SUR LA TRANSMISSION DE VIBRATION

Mémoire de maîtrise
Spécialité : génie mécanique

Julien LÉPINE

Jury :
Yvan Champoux (codirecteur)
Jean-Marc Drouet (codirecteur)
Alain Berry
Simon Richard



Library and Archives
Canada

Published Heritage
Branch

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Direction du
Patrimoine de l'édition

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 978-0-499-00324-9

Our file Notre référence

ISBN: 978-0-499-00324-9

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

Canada

RÉSUMÉ

Les cyclistes peuvent rouler plusieurs heures sur des routes d'une qualité souvent médiocre. L'amélioration du confort des vélos de route est donc un critère de conception important dans l'industrie du cycle. Le fait que l'humain joue un double rôle de récepteur de vibration et de composant dynamique important sur un vélo complexifie l'étude du confort cycliste. De ce fait, les fabricants de vélos n'ont actuellement pas d'idée précise sur ce qui influence réellement le confort et cela limite leur capacité d'améliorer le confort de leurs produits.

L'objectif de ce mémoire est de trouver les composants qui ont le plus d'influence sur le niveau d'accélération, de force et puissance transmises aux mains et aux fesses du cycliste. Cet objectif est atteint en trois étapes, qui ont fait chacune l'objet d'articles de journaux inclus dans ce mémoire.

La première étape est le développement d'une technique pour reproduire l'excitation de la route en laboratoire. Cette étape comprend d'abord la mesure de vibration sur un vélo roulant sur une route très granulaire (bitume usé sans crevasses et sans nids de poules). Il y est ensuite question de la méthode de reproduction avec des excitateurs linéaires reproduisant la vibration de la route sous les roues d'un vélo avec un cycliste.

La deuxième étape est l'élaboration d'un protocole expérimental conçu pour réduire au maximum les incertitudes liées à l'interaction du cycliste sur le vélo et aux conditions d'essais. Ce protocole optimise la position du cycliste et des conditions d'essais pour augmenter la répétabilité des mesures des vibrations transmises aux mains et aux fesses du cycliste. Malgré ces précautions concernant la répétabilité, le système vélo-cycliste n'est pas déterministe. Une approche statistique rigoureuse doit donc être utilisée pour analyser les essais.

La troisième étape est la campagne de mesure qui répond directement à l'objectif de ce mémoire. Elle se résume en une première série d'essais qui détermine pour chaque composant identifié (cadre, fourche, roues, cintre et potence) les pièces offertes sur le marché qui transmettent le plus et le moins de vibrations. À partir des pièces sélectionnées, une seconde série d'essais permet de déterminer ensuite la contribution relative de ces composants sur le niveau de vibrations transmises au cycliste.

La détermination de la contribution relative des composants d'un vélo de route sur le niveau de vibrations transmises de la route au cycliste permet ainsi d'identifier les composants les plus influents sur le confort des vélos et de guider le partenaire au projet, Cervélo, dans la conception orientée vers l'amélioration du confort des vélos de demain.

Mots clés : Confort des vélos de route, reproduction d'excitation de route, transmission de vibration, plan d'expérience factoriel et mesure de vibrations transmises à l'humain.

REMERCIEMENTS

Je tiens d'abord à remercier Yvan Champoux, professeur à l'Université de Sherbrooke et codirecteur de VélUS, pour son soutien et ses précieux conseils tout au long de ma maîtrise. Je tiens aussi plus particulièrement à le remercier de m'avoir soutenu dans mon projet de carrière alors que j'étais au baccalauréat. Une grande partie de ma réussite lui revient, merci.

Je tiens aussi à remercier Jean-Marc Drouet, professeur à l'Université de Sherbrooke et codirecteur de VélUS, pour son soutien et pour m'avoir permis de repousser mes limites en me sortant de ma zone de confort.

Je remercie également Cervélo Cycles Inc pour leur collaboration dans le projet. Le soutien de Damon Rinard et Richard Matthews, ingénieurs chez Cervélo, a été fort apprécié.

Merci à Sébastien Perrier, candidat au doctorat chez VélUS, pour les réflexions que nous avons eues ensemble et pour ton aide en mathématique.

Merci à Joachim Vanwalleghem, candidat au doctorat à l'université de Gent et collaborateur avec VélUS, pour le développement de la mesure de puissance absorbée par le cycliste. Ce mesurande a été fort utile.

Merci à Jean-Philippe Pelland Leblanc, professionnel de recherche chez VélUS, pour ton aide dans la réalisation de mes dernières campagnes de mesures.

Merci à tous les stagiaires de VélUS qui ont travaillé avec moi, Michael Charrette, Louis Formigal, Camille Brousseau, Éric Côté et Francis Marois, sans vous, je n'aurais certainement pas encore terminé mes essais.

Ces remerciements seraient incomplets sans une pensée pour ma femme Catherine, qui m'a aidé par sa présence et ses bons conseils lors de moments difficiles et lors de mes réussites.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	i
REMERCIEMENTS	iii
LISTE DES FIGURES.....	ix
LISTE DES SYMBOLES	x
LEXIQUE.....	xi
LISTE DES ACRONYMES	xi
Chapitre 1 : Introduction	1
Chapitre 2 : État de l'art	5
2.1 Les mesurandes.....	5
2.1.1 L'énergie transmise au cycliste	5
2.1.2 L'accélération transmise au cycliste	6
2.1.3 Force transmise au cycliste	8
2.1.4 Puissance absorbée par le cycliste.....	8
2.2 L'influence des matériaux	9
2.2.1 Nature des matériaux.....	9
2.2.2 Composites	10
2.3 L'influence des roues.....	10
2.3.1 Banc d'essai de roues	10
2.3.2 Essais de roues in situ.....	11
2.4 Techniques d'excitation en laboratoire.....	11
2.4.1 Tapis roulant.....	11
2.4.2 Excitateurs linéaires	12
Chapitre 3 : Technique d'excitation	15
3.1 Contribution au mémoire.....	15
3.2 Résumé en français	16
3.3 Article 1	17
3.4 Faits saillants de l'article	25

3.5	Autorisation de publication	26
Chapitre 4 : Protocole expérimental.....		27
4.1	Contribution au mémoire.....	27
4.2	Résumé en français.....	28
4.3	Article 2.....	29
4.4	Faits saillants de l'article	43
4.5	Autorisation de publication	44
Chapitre 5 : Plan d'expérience		45
5.1	Composants inclus dans l'analyse des contributions	45
5.2	Approche statistique	46
5.2.1	L'estimation de l'effet des facteurs.....	47
5.2.2	La formation du modèle initial	48
5.2.3	La réalisation des essais	49
5.2.4	Le raffinement du modèle	49
5.2.5	Analyse des résidus.....	51
5.2.6	Interprétation des résultats	54
Chapitre 6 : Résultats		57
6.1	Contribution au mémoire.....	57
6.2	Résumé en français.....	58
6.3	Article 3.....	59
6.4	Faits saillants de l'article	78
6.5	Autorisation de publication	79
6.6	Éléments à ajouter dans l'article avec sa publication	80
Chapitre 7 : Discussion		81
7.1	Méthode de mesure	81
7.2	Résultats	82
Chapitre 8 : Conclusion.....		85
Liste des références.....		87
Annexe A : Banc d'essai pour roues.....		91

A.1	Contribution au mémoire.....	91
A.2	Résumé en français.....	92
A.3	Acte de conférence 1	93
A.4	Autorisation de publication	101
Annexe B : Choix du type d'excitation.....		103
B.1	Contribution au mémoire.....	103
B.2	Résumé en français :.....	103
B.3	Acte de conférence 2	105
B.4	Autorisation de publication	114
Annexe C : Effet du type d'excitation.....		115
C.1	Contribution au mémoire.....	115
C.2	Résumé en français.....	115
C.3	Acte de conférence 3	117
C.4	Autorisation de publication	125

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Plan du mémoire.....	3
Figure 2-1 : Courbe de sensibilité des mains aux accélérations selon la norme ISO 5349.....	6
Figure 2-2 : Courbe de sensibilité du corps aux accélérations verticales selon la norme ISO 2631....	7
Figure 2-3 : Courbe de sensibilité du corps aux accélérations horizontales selon la norme ISO 2631	7
Figure 2-4 : Tapis roulant excitant un vélo	12
Figure 2-5 : Excitateurs linéaires excitant un vélo	13
Figure 5-1 : Principaux composants d'un vélo de route transmettant des vibrations au cycliste	46
Figure 5-2 : Graphique à échelle normale des résidus provenant des mesures de puissance à la cocotte droite du plan factoriel, cette distribution est normale.....	52
Figure 5-3 : Graphique à échelle normale de résidus provenant d'une distribution quelconque	52
Figure 5-4 : Répartition chronologique des résidus provenant des mesures de puissance absorbée par le cycliste à la cocotte droite du plan factoriel	53
Figure 5-5 : Répartition chronologique des résidus d'une expérimentation perturbée par le temps .	53
Figure 5-6 : Répartition des résidus en fonction des valeurs prédites des mesures de puissance absorbée par le cycliste à la cocotte droite du plan factoriel.....	54
Figure 5-7 : Répartition des résidus en fonction des valeurs prédites d'une expérience où l'erreur est multiplicative.....	54
Figure 5-8 : Diagramme de Pareto des mesures de puissance absorbée par le cycliste à la cocotte droite du plan factoriel.....	55

LISTE DES SYMBOLES

Symbole	Définition
2^k	Plan d'expérience factoriel d'ordre k
a	Nombre de niveaux (facteurs) inclus dans un modèle statistique
$a_{\text{ISO}}(t)$	Signal d'accélération filtré par la courbe de perception de vibration de l'humain proposée par les normes ISO 5349 et ISO 2631
a_{rms}	Valeur efficace d'un signal d'accélération
e	Résidu d'une analyse statistique
E	Énergie transmise
$F(t)$	Signal de force
N	Nombre total d'essais inclus dans un modèle statistique
$v(t)$	Signal de vitesse de déplacement
P_a	Puissance moyenne absorbée par l'humain
t	Variable temporelle
Δt	Période d'échantillonnage
T	Durée d'acquisition d'un signal
x	Niveau d'un facteur d'un plan d'expérience factoriel
$x(t)$	Signal quelconque
y	Valeur dépendante d'un modèle statistique
\hat{y}	Valeur prédite par un modèle statistique
β	Effet d'un facteur ou une interaction d'un plan d'expérience factoriel
ε	Erreur de mesure
μ	Valeur à l'origine d'un modèle statistique
τ	Effet d'un facteur (variable indépendante) d'un modèle statistique

LEXIQUE

Terme technique	Définition
Cocotte	Poignée de frein d'un vélo de route
Composants de vélo	Partie constitutive d'un vélo (ex. : cintre, roues, cadre...)
Plan d'expérience	Suite ordonnée d'essais d'une expérimentation, chacune permettant d'acquérir de nouvelles connaissances en contrôlant les paramètres expérimentaux
Transmissibilité	Rapport sans dimension de l'amplitude de la réponse d'un système divisé sur l'amplitude de l'excitation du système
Variable statistique	Une variable représentée par une distribution aléatoire dans le cas d'une distribution normale, elle peut être définie par une moyenne et un écart type.

LISTE DES ACRONYMES

Acronyme	Définition
CRSNG	Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada
GAUS	Groupe d'acoustique de l'Université de Sherbrooke
VIB	Vibrations induites au cycliste par la bicyclette

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

Les cyclistes aguerris peuvent pratiquer leur sport pendant plusieurs heures sur des routes qui ne sont pas toujours en bon état. Les chocs et les vibrations engendrés par une chaussée en mauvais état augmentent le niveau de fatigue du cycliste et ils peuvent même causer des blessures, dont le *handlebar palsy* [1]. Il est également fréquent que la douleur aux bras ou au cou causée par les vibrations engendrées par la route soit plus importante que la douleur aux jambes causée par l'effort de pédalage. Le niveau de vibrations induites au cycliste par la bicyclette (VIB) est donc un facteur limitant la pratique du vélo de route. Afin de mieux satisfaire leurs clients qui veulent toujours rouler plus vite et plus longtemps, les fabricants de vélos de route désirent réduire les VIB de leurs produits sans pour autant réduire les caractéristiques reliées à la performance des vélos (poids, rigidité, aérodynamisme...). L'expression communément utilisée par ces derniers pour parler de la réduction des VIB est l'amélioration du confort des vélos.

L'industrie du vélo tente ainsi chaque année d'améliorer le confort en modifiant les composants des vélos. Cela se fait en ajoutant, par exemple, un morceau d'élastomère dans la fourche ou en réduisant la raideur axiale de la tige de selle. Cependant, les innovations sont souvent infructueuses et elles sont oubliées après quelques années, car en règle générale, le gain en confort est difficilement quantifiable ou la performance des vélos s'en trouve trop altérée. Pourtant, plusieurs s'entendent pour dire que certains vélos sont plus confortables que d'autres, et ce, sans nécessairement qu'ils soient intentionnellement conçus pour transmettre moins de vibrations.

L'amélioration du confort des vélos de route sans altérer leur performance est donc loin d'être simple. Pour y arriver, il apparaît nécessaire :

- de connaître et comprendre la dynamique vibratoire des vélos;
- de prendre en compte l'interaction entre le cycliste et le comportement dynamique des vélos;
- de faire le lien entre les vibrations mesurées et la perception du cycliste.

À de rares exceptions près, les fabricants de vélos connaissent très peu ces principes et ils sont ainsi limités dans la compréhension des phénomènes reliés au confort de vélos. Cela les contraint à baser leurs tentatives d'amélioration du confort de leurs produits sur des conjectures et des intuitions.

Le groupe de recherche VÉIUS fondé à l'Université de Sherbrooke en 2002 s'intéresse à la question des VIB afin de faire avancer les connaissances sur le confort des vélos de route. Son appartenance

au GAUS (groupe d'acoustique de l'Université de Sherbrooke), spécialisé en acoustique et vibration, fait état de l'expertise en vibration requise pour étudier ce sujet.

À ses débuts, le groupe VÉLUS a mené une première étude sur le sujet intitulée : *Étude du comportement dynamique de cadres de vélo en aluminium pour le développement de métriques reliés au confort*. Avec cette étude, le groupe s'est bâti une bonne réputation dans le domaine de la métrologie embarquée, de l'approche expérimentale et de l'étude du comportement vibratoire des vélos.

Une fois cette étude terminée, quelques entreprises ont approché le groupe VÉLUS pour approfondir les connaissances développées sur le confort des vélos de route. Le groupe s'est associé à la compagnie canadienne Cervélo pour réaliser un projet d'une durée trois ans sur le confort des vélos de route. C'est en 2010, avec la contribution du CRSNG (conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada), que voit le jour le projet suivant : *Caractérisation mécanique et perceptive de la transmissibilité vibratoire des composantes de vélo de route*. Afin de réaliser ce projet, des chercheurs de l'Université McGill se sont joints à VÉLUS pour former une équipe de recherche élargie. Le projet s'est donc divisé de la façon suivante : la partie expérimentale et l'analyse dynamique des vélos sont prises en charge par VÉLUS et la partie perception est prise en charge par l'Université McGill.

Le présent projet de maîtrise porte sur la partie expérimentale du projet avec Cervélo. Le but de ce projet de maîtrise est de déterminer la contribution relative des composants de vélos de route sur les VIB. La question de recherche est donc : quels composants des vélos de route ont le plus d'effet sur le niveau de VIB ? De cela découle un sous objectif qui est de développer une technique de comparaison des VIB de différents composants tout en prenant en compte l'influence du cycliste sur le comportement dynamique du vélo.

Les retombées du projet de maîtrise sont multiples. La première est que la compagnie Cervélo sera guidée dans la conception de vélos plus confortables. La détermination de la contribution relative des composants de vélos par rapport au niveau de VIB permettra de connaître les composants qui ont le plus de potentiel pour améliorer le confort du cycliste. La mise en évidence des caractéristiques régissant la filtration des vibrations des composants permettra ensuite à Cervélo d'optimiser le compromis entre le confort et la performance des vélos. De plus, la technique de comparaison développée permettra de valider les prototypes en se basant sur de nouvelles connaissances sur le confort de vélos.

La deuxième retombée du projet de maîtrise profitera aux cyclistes, qui bénéficieront aussi de la technique de comparaison de composants. Cette dernière permettra de comparer le confort de différentes marques de vélos de façon quantitative plutôt que qualitative. Les cyclistes baseront ainsi l'achat d'un vélo confortable sur des données plus fiables et les entreprises qui axent la conception de leurs vélos

sur un marketing douteux plutôt que sur des concepts d'ingénierie seront donc plus facilement démasquées.

La dernière retombée du projet de maîtrise concerne un cadre plus large, car le projet de maîtrise mènera à de nouvelles approches pour étudier le confort. Ces dernières pourront inspirer des chercheurs dans d'autres domaines, comme dans l'étude du confort des véhicules motorisés ou de la santé et la sécurité reliée à l'utilisation d'outils vibrants.

Ce mémoire présente la démarche qui a permis de déterminer la contribution relative des composants d'un vélo de route sur les VIB (Figure 1-1). Il est d'abord question de l'état d'art sur le confort dynamique des vélos de route et sur les domaines connexes. L'état d'art est suivi d'un article publié sur la description de la technique d'excitation développée pour recréer l'excitation de la route en laboratoire. Un protocole expérimental réduisant les sources d'incertitudes inhérentes au système vélo-cycliste est ensuite présenté par un deuxième article. Basé sur ce protocole, le plan d'expérience qui permettra de répondre à la question de recherche est établi. Les résultats de la question de recherche sont finalement présentés dans un troisième article.

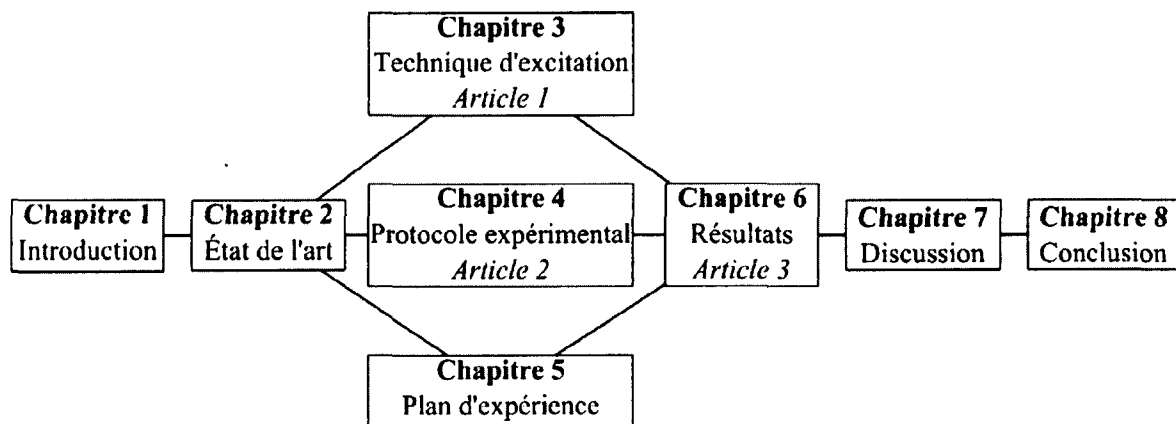


Figure 1-1 : Plan du mémoire

CHAPITRE 2 : ÉTAT DE L'ART

Le confort dynamique des vélos est une caractéristique qui intéresse grandement les cyclistes. Voilà pourquoi les journalistes de magazines spécialisés en cyclisme s'improvisent quelquefois expérimentateurs en tentant de mesurer le confort. Cela est le cas des journalistes de VeloNews qui comparent différents composants d'un vélo dans quelques articles dans leur magazine [2, 3]. Leurs essais ne sont toutefois pas très rigoureux. Ils ne répètent pas leurs essais et ils altèrent la dynamique des composants avec leur capteur. Cela rend donc les conclusions de leurs études peu utiles, mais l'intérêt de mesurer le confort est toutefois bien présent.

Dans un cadre scientifique, plusieurs chercheurs ont étudié le confort dynamique ou plutôt les VIB. Ces études sont présentées en quatre grandes catégories : les mesurandes, l'influence des matériaux, l'influence des roues et les techniques d'excitation.

2.1 Les mesurandes

Toute amélioration d'une caractéristique passe nécessairement par sa mesure, car comme Lord Kelvin a dit : « *if you cannot measure it, you cannot improve it* ». La recherche d'un mesurande représentatif du confort dynamique des vélos de route est donc essentielle à son amélioration. Quatre mesurandes différents sont d'ailleurs utilisés pour quantifier le confort :

- l'énergie transmise au cycliste;
- l'accélération transmise au cycliste;
- la force transmise au cycliste;
- la puissance absorbée par le cycliste.

2.1.1 L'énergie transmise au cycliste

Champoux et Richard ont établi certaines bases dans la mesure du confort [4, 5]. Leurs travaux soulignent principalement l'importance d'inclure le cycliste lors la mesure du comportement dynamique des vélos. Ils proposent aussi un mesurande du confort qui correspond à l'énergie transmise au cintre lorsque le vélo roule sur une bosse pour créer une excitation de type impact. Cette énergie n'est pas exprimée en joules, car elle n'est pas directement reliée au travail du système. Elle correspond plutôt à l'énergie E d'un signal, soit à la somme quadratique du signal $x(t)$ multiplié par sa période d'échantillonnage Δt :

$$E = \sum [x(t)]^2 \Delta t \quad (2.1)$$

La mesure en énergie est aussi utilisée dans les travaux de Nordstrom pour quantifier le confort à l'impact sur des vélos de montagne [6]. La technique de mesure proposée est intéressante pour quantifier la vibration lors d'un impact, mais elle ne tient pas compte de la perception de l'humain, qui varie en fonction de la fréquence d'excitation.

2.1.2 L'accélération transmise au cycliste

Dans le domaine de la santé et la sécurité, les normes ISO 2631 et 5349 [7, 8] permettent d'évaluer le risque relié aux vibrations transmises à l'humain. Ces normes permettent aussi d'évaluer les vibrations ressenties aux mains et au corps d'une personne à partir de données d'accélération, puisqu'elles utilisent des filtres qui pondèrent l'accélération perçue par l'humain (Figure 2-1, Figure 2-2 et Figure 2-3). Ces courbes montrent que la sensibilité de l'humain se restreint à une bande de basses fréquences relativement étroite. Cette zone de sensibilité varie aussi selon la partie du corps excitée par les vibrations et selon la direction de l'excitation. Le maximum de sensibilité est environ à 11 Hz pour les vibrations senties aux mains (Figure 2-1). Cette courbe de sensibilité aux mains est valable pour toutes les directions d'excitation. Pour les vibrations excitant tout le corps d'un individu, la fréquence la plus sensible est à 6.2 Hz dans l'axe vertical (perpendiculaire au plan transverse, Figure 2-2) et à 1.1 Hz selon l'axe horizontal (coplanaire au plan transverse, Figure 2-3).

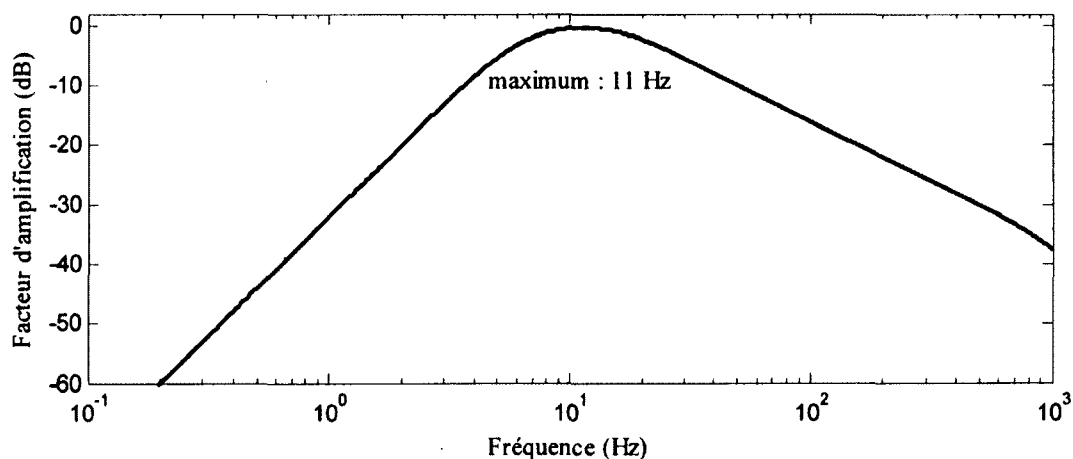


Figure 2-1 : Courbe de sensibilité des mains aux accélérations selon la norme ISO 5349

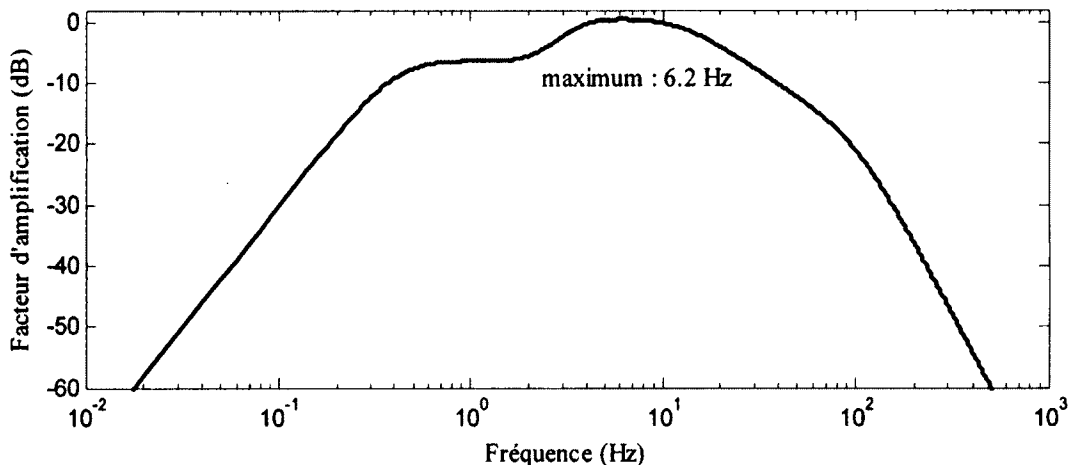


Figure 2-2 : Courbe de sensibilité du corps aux accélérations verticales selon la norme ISO 2631

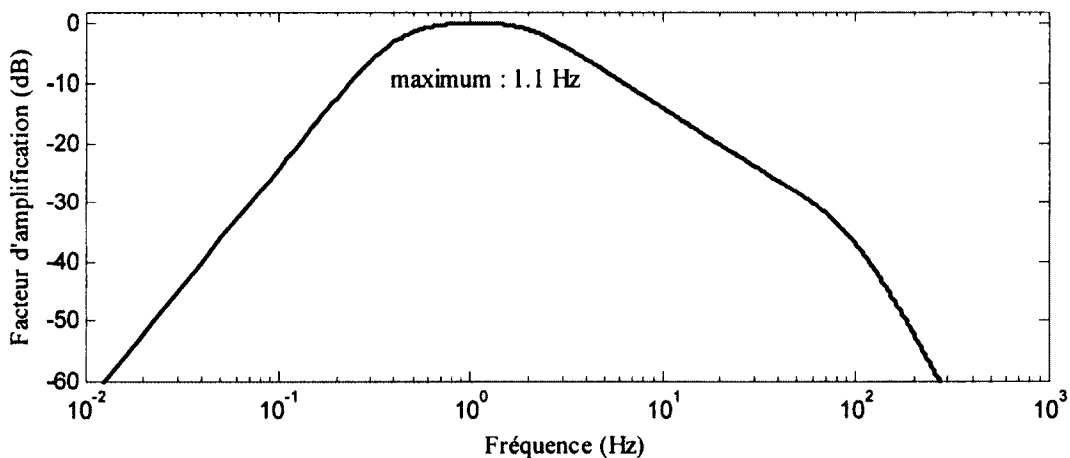


Figure 2-3 : Courbe de sensibilité du corps aux accélérations horizontales selon la norme ISO 2631

Pour quantifier le niveau de vibrations transmis à un humain, ces normes proposent d'utiliser ces courbes de sensibilité comme filtre sur signal d'accélération $a(t)$ mesuré au point de contact entre l'humain et l'objet vibrant. La valeur efficace a_{rms} du signal d'accélération filtrée $a_{ISO}(t)$ représente ainsi le niveau de vibrations perçu pendant une durée d'acquisition T :

$$a_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a_{ISO}^2(t) dt} \tag{2.2}$$

Plusieurs chercheurs utilisent cette méthode de calcul pour quantifier le confort des cyclistes [9-13].

2.1.3 Force transmise au cycliste

La force transmise au cycliste est un mesurande encore peu utilisé pour quantifier le confort, car elle demande le développement de capteurs de force précis et justes jusqu'à une centaine d'Hz. Plusieurs capteurs mesurant les forces transmises aux points de contact entre le vélo et le cycliste ont été développés dans les dernières années [14-22]. Avec ces capteurs, certains chercheurs ont tenté de faire le parallèle entre les forces transmises au cycliste et leur confort. Cela s'est fait avec une potence instrumentée, avec laquelle Richard mesurait l'énergie d'impact. Cette mesure s'obtient à partir de la force transmise par la potence lors d'un impact sur la roue avant d'un vélo [5, 23].

2.1.4 Puissance absorbée par le cycliste

Vanwalleghem propose un autre mesurande pour quantifier le confort des cyclistes : la puissance absorbée [12]. La mesure de puissance absorbée est aussi utilisée dans des travaux de recherche sur la santé et la sécurité reliés à l'utilisation d'outils vibrants [24, 25]. Pour mesurer la puissance moyenne absorbée par le cycliste P_a au cintre d'un vélo, Vanwalleghem procède de la façon suivante :

- mesurer la force transmise $F(t)$ aux mains du cycliste avec un cintre instrumenté de jauges;
- mesurer l'accélération du guidon avec un accéléromètre positionné sur ce dernier;
- intégrer le signal d'accélération pour obtenir la vitesse de déplacement $v(t)$ du cintre;
- calculer la puissance moyenne absorbée P_a sur une période T :

$$P_a = \frac{1}{T} \int_0^T F(t) v(t) dt \quad (2.3)$$

Cette mesure requiert de corriger le déphasage des deux capteurs causé par les composants électroniques et l'intégration du signal. La publication de Vanwalleghem ne présente par contre pas d'informations par rapport à cette correction.

L'utilisation de la puissance pour quantifier le confort a pour avantage de mieux considérer l'interaction de l'humain avec le vélo. L'augmentation du niveau d'accélération à un endroit sur le vélo peut être causée par une modification de la posture du cycliste sans que l'inconfort soit nécessairement augmenté. Un exemple de cela est le cas d'un cycliste qui se déplace sans utiliser ses mains. Les accélérations mesurées sur le cintre du vélo sont plus élevées, mais aucune force n'est transmise aux mains du cycliste. Le cycliste ne perçoit ainsi aucune vibration à ses mains. En prenant en compte l'accélération et la force transmises, la mesure en puissance minimise donc cette problématique. De

plus, l'unité de mesure de la puissance, le watt, fait déjà partie du vocabulaire des cyclistes, qui utilisent déjà cette unité pour quantifier leur performance physique. Le mesurande est donc facile à comprendre pour les cyclistes.

2.2 L'influence des matériaux

Un des éléments les plus mentionnés pour son influence sur le confort des vélos est le matériau et plusieurs conjectures contradictoires circulent à ce sujet. Par exemple, certains croient que ce sont les cadres d'acier qui sont confortables. D'autres placent le titane ou la fibre de carbone comme le matériau de prédilection pour le confort. Le seul terrain d'entente est sur les cadres en aluminium qui ont la réputation d'être inconfortables.

2.2.1 Nature des matériaux

Hastings a fait une étude à ce propos comparant les effets du matériau des cadres de vélo sur la performance d'un cycliste [26]. Pour y parvenir, des essais sont réalisés en mesurant la consommation d'oxygène maximal d'un cycliste roulant avec différents cadres de vélo sur un tapis roulant. Les résultats de cette étude montrent qu'il n'y a pas de relation entre les consommations d'oxygène maximales et le matériau du cadre (acier, aluminium et fibre de carbone). Par contre, l'accélération crête mesurée à la tige de selle est significativement plus importante sur un vélo avec un cadre en aluminium qu'avec les autres cadres testés.

Richard et Vanwalleghem mettent en évidence avec leur maîtrise respective que l'amortissement des cadres d'aluminium est plus faible que celui des cadres en acier et en fibre de carbone [5, 27]. Ceci pourrait ainsi expliquer la différence d'accélération mesurée par Hastings. Les différences d'amortissement se constatent par contre surtout en haute fréquence où la sensibilité de l'humain aux vibrations est plus faible [7, 8]. La différence entre les matériaux pourrait ainsi être réelle sans être nécessairement perceptible.

Les essais de perceptions effectués par Richard enrichissent cette hypothèse [5]. Ces derniers démontrent que seulement une personne sur sept peut percevoir la différence lors d'un impact entre la fourche en carbone qui transmet le moins d'énergie au cycliste et celle en aluminium qui transmet le plus d'énergie. Les différences entre les fourches en carbone et en aluminium à l'étude étaient donc imperceptibles pour pratiquement tous les sujets de l'étude. Ce n'est donc pas nécessairement la nature des matériaux qui influence le niveau de vibration perçue par le cycliste lors d'un impact.

2.2.2 Composites

Les composants de carbone sont en réalité faits de composite, c'est-à-dire qu'elles sont composées de fibres et de résine. En général, les fibres sont de carbone et la résine est un composé de polyesters. Certains fabricants de cadres modifient les fibres en ajoutant de la fibre de lin au carbone. Cette technique a comme objectif d'augmenter l'amortissement du matériau, mais cet ajout semble être tangible sur un cadre de vélo de route seulement en haute fréquence (>1500 Hz) où l'humain n'a pas de perception [7, 8].

Un tout autre composite est aussi utilisé dans la fabrication des cadres : le bambou. Selon des essais comparatifs entre un vélo avec un cadre de bambou et un autre en aluminium, le bambou aurait des propriétés qui réduiraient les VIB [13]. Il est cependant difficile de confirmer cette application, car cet article comporte plusieurs lacunes importantes : les essais n'ont pas été répétés et l'utilisation des normes ISO 2631 et ISO 5349 est probablement erronée. Selon les calculs de cet article, le niveau d'accélération mesuré à la selle est 18 fois plus élevé que la limite maximale permise pour 10 minutes d'exposition d'un humain [8].

2.3 L'influence des roues

Avec le matériau, les roues sont aussi fréquemment citées comme vecteur de confort ou d'inconfort. Il n'est donc pas surprenant qu'elles soient étudiées par plusieurs chercheurs. Pour ce faire, deux techniques d'excitation sont utilisées : l'excitation de la roue isolée sur un banc d'essai et l'excitation in situ des roues montées sur un vélo.

2.3.1 Banc d'essai de roues

Les mesures des roues sur un banc d'essai se font en transmissibilité. Le principe repose sur la comparaison de l'accélération ou de la force transmise sous le pneu au moyeu. Petrone et Guibilato ont procédé à des essais comparant les transmissibilités en accélération de plusieurs roues [28]. Leur recherche ne permet par contre pas de discriminer le niveau d'accélérations transmises entre des roues, car l'incertitude de mesure est trop grande. Cela pourrait être causé par le banc d'essai qui utilise un vélo et un mannequin de bois pour précharger la roue. Ces éléments modifient la dynamique du banc d'essai ce qui pourrait nuire à la précision des mesures. La technique d'excitation sinusoïdale utilisée est aussi à éviter avec les excitateurs hydrauliques, car ce type d'excitateurs crée beaucoup de distorsions harmoniques. Il n'y a donc pas une seule fréquence à la fois qui est excitée comme le présuppose

cette technique d'excitation. En n'ayant pas considéré ce phénomène, Petrone et Guibilato sont probablement dans l'erreur en expliquant la présence de distorsions harmoniques dans leurs signaux par le comportement non linéaire des roues de vélo.

La technique de mesure par transmission de force proposée par Lépine permet de mesurer des différences significatives entre les roues [10]. Cet acte de conférence réalisé par l'auteur conjointement à sa maîtrise se retrouve à l'annexe A. Selon cette étude, il s'avère que la force transmise du pneu au moyeu ne dépend pas de la rigidité axiale de la roue.

Les travaux de Petrone et Lépine sur les roues doivent être considérés avec précaution, car rien ne valide si le comportement d'une roue isolée est le même que celui d'un vélo complet roulant sur une route. Des essais exploratoires réalisés dans le laboratoire de VÉIUS montrent d'ailleurs qu'un classement de roues basé sur les forces transmises sur un moyen bloqué est différent d'un classement basé sur le niveau de VIB. D'autres études devraient donc être réalisées avant d'utiliser la transmission de force en condition bloquée comme mesurande du confort.

2.3.2 Essais de roues in situ

Peu d'études comparent les niveaux in-situ de VIB des roues [9, 11]. Ces études ne décèlent par contre aucune différence significative entre les roues en ce qui concerne l'accélération mesurée à la selle et au cintre. Cela est probablement causé par la plus grande variabilité d'essais effectués à l'extérieur sur des routes. Cette variabilité est causée par l'excitation de la route, qui n'est pas constante entre les mesures, car le vélo ne roule pas exactement au même endroit entre les essais. Le cycliste change aussi constamment sa position pour piloter le vélo, ce qui modifie le comportement dynamique du vélo. Les mesures à l'extérieur posent donc des défis métrologiques importants.

2.4 Techniques d'excitation en laboratoire

Dans le but de réduire l'incertitude associée aux campagnes de mesure in situ, plusieurs chercheurs développent des techniques pour exciter le vélo en laboratoire qui s'approchent des excitations typiques de route. Deux types d'excitations en laboratoires sont généralement utilisés : le tapis roulant et les excitateurs linéaires. Une comparaison plus exhaustive se trouve dans un acte de conférence réalisé par l'auteur présenté à l'annexe B [29].

2.4.1 Tapis roulant

La technique du tapis roulant consiste à faire rouler un vélo sur un tapis roulant et à modifier la surface de sa courroie pour exciter le vélo. Le cycliste peut pédaler librement sur le tapis ou une des roues du

vélo peut être fixée afin que seulement la roue libre soit en contact avec la courroie sans que le cycliste ait besoin de pédaler.

Les tapis roulants sont efficaces pour exciter le vélo en milieu contrôlé [4, 26]. Cette technique utilise un goujon collé sur la courroie du tapis pour créer un impact sur les roues du vélo (Figure 2-4). La dimension de ce goujon peut varier pour modifier la force d'impact.

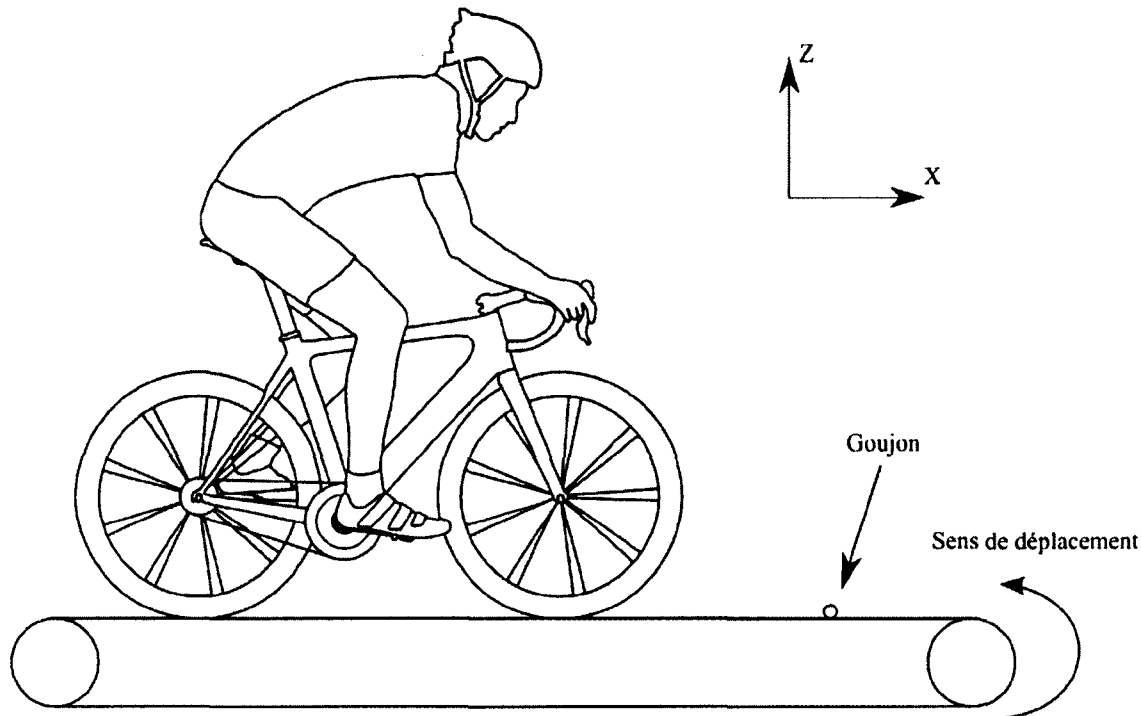


Figure 2-4 : Tapis roulant excitant un vélo

Recréer l'excitation continue d'une route en collant une multitude de petits goujons sur la courroie du tapis demande encore du développement, car cette technique d'excitation ne reproduit pas fidèlement tout le spectre en fréquences de l'excitation de la route [29]. Cela parce que l'amortissement inhérent au tapis et à la structure réduit la bande de fréquences excitées. De plus, la périodicité de l'excitation ne permet pas de bien reproduire les caractéristiques aléatoires de l'excitation de la route.

2.4.2 Excitateurs linéaires

Des excitateurs linéaires placés sous les roues d'un vélo sont aussi utilisés en guise de source d'excitation (Figure 2-5). Différents signaux d'excitations peuvent être utilisés : des signaux déterministes comme des ondes sinusoïdales et des reproductions d'excitation de route et des signaux stochastiques comme un signal aléatoire. Une comparaison plus détaillée de ces types de signaux d'excitation est présentée à l'annexe C dans l'acte de conférence de l'auteur [30].

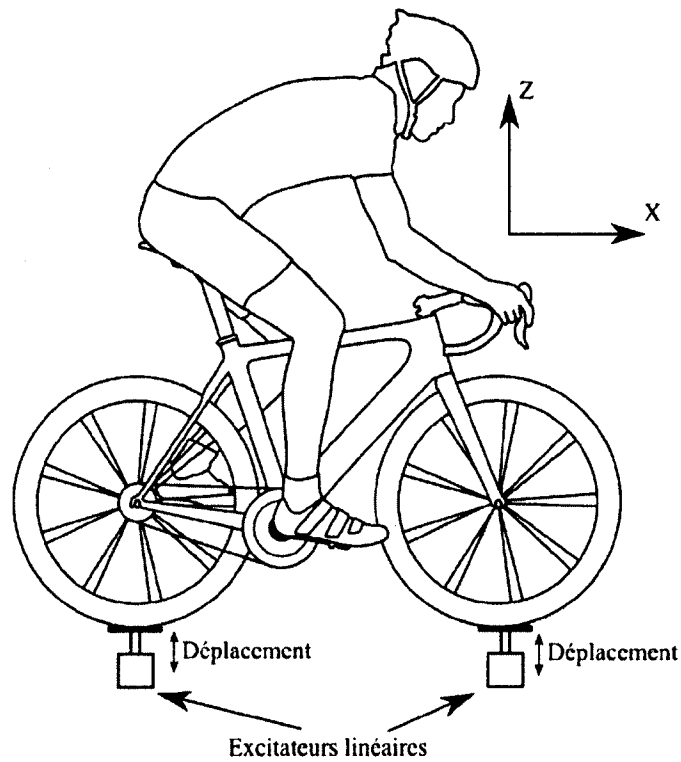


Figure 2-5 : Excitateurs linéaires excitant un vélo

Lors de la reproduction d'une excitation de route, l'usure du bitume et la texture de la surface de la route utilisée pour exciter le vélo doivent être considérées, car ces deux paramètres influencent le niveau de vibrations mesuré sur un vélo [31]. La route de référence doit ainsi bien représenter les routes où se pratique le vélo, car toutes les routes ne procurent pas les mêmes excitations.

CHAPITRE 3 : TECHNIQUE D'EXCITATION

L'article présenté dans ce chapitre décrit la technique d'excitation développée pour recréer l'excitation de la route en laboratoire. Cette technique d'excitation est ensuite à la base de tous les essais réalisés dans ce mémoire.

Auteurs et affiliation :

Julien Lépine : étudiant à la maîtrise, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique

Yvan Champoux, professeur, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique

Jean-Marc Drouet, professeur, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique

Date d'acceptation : 30 août 2013

État de l'acceptation : Version finale en consultation en ligne

Revue : Experimental Techniques

Référence : Lepine J, Champoux Y, Drouet J., A Laboratory Excitation Technique to Test Road Bike Vibration Transmission, Experimental Techniques, doi:10.1111/ext12058

Titre en français : Une technique d'excitation en laboratoire pour tester la transmission de vibration sur des vélos de route

3.1 Contribution au mémoire

Cet article contribue au mémoire en décrivant clairement la technique développée pour reproduire l'excitation de la route en laboratoire. L'élaboration de cette technique est une partie importante du mémoire, car tous les essais qui permettront de répondre à la question de recherche sont basés sur cette technique. Deux grands éléments sont à retenir de cet article.

Le premier élément est la technique utilisée pour mesurer l'excitation de la route sur un vélo. Il s'agit ici d'un élément original, car à la connaissance de l'auteur, c'est la première fois que l'excitation de la route était mesurée par l'accélération au moyeu arrière d'un vélo de route à une vitesse de déplacement constante, sans que le cycliste ait à pédaler.

Le second élément est la capacité de reproduire l'excitation de la route avec un simulateur constitué d'excitateur linéaire. Il n'y est cependant pas question de la sélection de la technologie d'excitation, car lors de la rédaction de cet article l'utilisation de ce type d'excitation pour réaliser les essais était déjà déterminée. Les détails de cette sélection se retrouvent dans l'étude comparative présentée dans l'acte de conférence de l'annexe B. C'est dans ce document que la technique d'excitation avec des excitateurs linéaires est définie comme la technique qui réplique l'excitation de la route avec la plus grande répétabilité.

3.2 Résumé en français

Après la légèreté, le confort vibratoire est la caractéristique la plus recherchée sur un vélo de route. L'enjeu est donc d'augmenter la capacité d'un vélo à filtrer les vibrations que la route transmet aux mains et aux fesses. Étant donné que l'humain a une influence très importante sur cette structure, c'est le système vélo-cycliste qui doit être pris en considération. Cette caractéristique doit de plus être testée avec des excitations représentant la route afin de tenir compte du comportement non linéaire du corps humain. Il est donc capital de recréer avec justesse les excitations de la route pour étudier la dynamique du système.

Une technique développée pour quantifier adéquatement ces excitations in situ est d'abord présentée. Cette dernière repose sur la mesure d'accélération au moyeu arrière d'un vélo remorqué par une automobile. L'objectif est de recréer en laboratoire ces mêmes niveaux d'accélération avec un simulateur de route. Ce dernier est constitué de deux actionneurs qui utilisent les signaux de la route pour reproduire un profil adéquat.

La fidélité et la justesse de cette méthode sont étudiées en comparant les spectres en fréquence et la distribution statistique de l'excitation de la route avec celle du simulateur. Ces résultats montrent que le profil produit par le simulateur est fidèle aux conditions réelles d'utilisation. Il est donc maintenant possible d'évaluer correctement le confort dynamique des vélos en condition réelle d'utilisation.

3.3 Article 1



TECHNICAL ARTICLE

A Laboratory Excitation Technique to Test Road Bike Vibration Transmission

J. Lépine, Y. Champoux, and J.-M. Drouet

Department of Mechanical Engineering, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, QC, Canada

Keywords

Road excitation, Bicycle dynamics, Road vibration measurement, Vibration replication

Correspondence

J. Lépine
Department of Mechanical Engineering
Université de Sherbrooke
Sherbrooke, QC
Canada
Email: julien.lepine@usherbrooke.ca

Received: July 4, 2012;
accepted: August 30, 2013

doi:10.1111/ext.12058

Abstract

This paper describes a technique designed to measure the in-situ acceleration signals that will be used to drive a road simulator in the study of road bike vibration transmission in a laboratory setting. To measure the signals, a bike mounted by a cyclist and towed by a motor vehicle is used. A road simulator using actuators driven by a digital signal is described. The impulse response of the bike used to measure road data is convoluted with the road acceleration in order to obtain the required actuator signal. The reproduction capacity of the simulator is evaluated by comparing the frequency content as well as the time statistical parameters of the acceleration signal measurement with road to the acceleration obtained on the simulator. On a granular road with a broadband excitation spectrum, the vertical excitation obtained with the simulator adequately mimics the measured road acceleration. This technique can be used to compare vibration transmission characteristics among different road bikes.

Introduction

Next to being lightweight, one of the most oft-mentioned desirable characteristics of a road bike is its capacity to filter vibrations caused by an uneven road surface and transmitted to the cyclist's hands, buttocks, and feet. Riding a bicycle for hours on a rough road can be quite uncomfortable and can even cause non-traumatic injuries such as handlebar palsy associated with a nerve disorder of the hand and arm.¹ All major bike manufacturers are looking for ways to reduce transmitted vibration and to improve the quality and comfort of the ride. With the goal of designing bicycles with an improved vibration filtration capacity, the importance of being able to assess bicycle vibration transmissibility (from the road to the cyclist) cannot be overemphasized. Surprisingly, very little research on the particular issue of measuring the vibration transmissibility of a road bicycle has been done to date.²⁻⁴

From a practical standpoint, on-road measurement of bicycle transmissibility is a difficult task because excitation input such as force, displacement, and acceleration at the tire-road interface cannot be

easily measured. However, in a laboratory using a simulator testing rig, these inputs can be measured and bicycle transmissibility can be determined. The main challenge when using a laboratory technique for vibration testing is to get proper excitation in order to mimic realistic road excitations. This is even more important for bike vibration transmission studies due to certain non-linear behaviors of the cyclist's buttocks and hand-arm system.⁵⁻⁷ For bike vibration transmission testing, both Richard⁸ and Hasting et al.³ have used a treadmill with an object glued on the belt in order to simulate impact. Champoux et al.² presented several techniques and instrumented components to study the dynamic behavior of a road bike. Nordstrom⁹ proposed a method to rank mountain bike comfort using in-situ acceleration transmissibility between the rear axle and the saddle. However, no previous studies have revealed a technique to test road bikes with the main objective of providing a realistic duplication of various road excitations in a laboratory setting.

Using a laboratory technique with the participation of a cyclist to study vibration transmission is

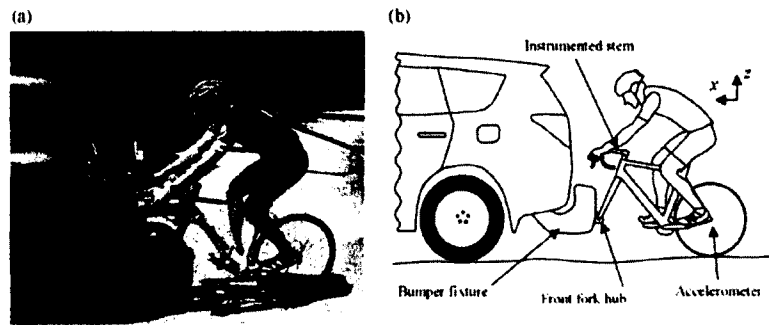


Figure 1 Road data measurement system. (a) Photographic view and (b) schematic view.

also of capital importance in obtaining realistic transmissibility measurement data and provides many advantages. First, it must be emphasized that the cyclist obviously has a prevailing influence⁸ on bike dynamics, considering the weight of the bike and the fact that the cyclist adds a fair amount of damping to a road bike. Second, to cope with a wide variety of riding conditions and road events, the cyclist must constantly shift position and posture on the bike. This considerably modifies the dynamic response of the bike¹⁰ and adds a level of difficulty to the comparative measurement study. Third, in a sheltered laboratory environment it is possible to test all year long. And even more importantly, a large number of channel counts can be used without the cyclist having to carry extra loads or route wires along the bike frame, which would modify the bike's dynamic response.

The primary purpose of this research study is to develop a simple technique to obtain road data signal inputs. The second purpose is to evaluate the quality of on-road replication when using these data with a road bike and road vibration simulator developed in a previous study.¹¹ The main objective of the excitation technique proposed in this article is to provide a repeatable displacement profile that represents a typical road excitation. This excitation can then be used in future studies to compare bike transmissibility based on repeatable and realistic displacement excitations.

Road Data Measurement Technique

This first section describes a technique to get road data signals that will be used as inputs on the road vibration simulator described in next section. The in-situ road data will also be used in this paper to

evaluate the replication capability of the laboratory excitation technique.

Methods

Several road characterization techniques have been developed for the automotive industry. These methods can be separated in two overall categories: direct measurement of the pavement profile with various types of instrumentation^{12,13} and the use of mechanical devices or systems with acceleration measurements to infer the pavement profile.^{13–17} The technique presented in this paper belongs to the second category.

In the technique proposed in this paper, the vertical (Z) time acceleration signal $a(t)$ is measured at the left rear wheel dropout. As shown in Fig. 1, the measurement is done while the cyclist is riding a bike towed by a car. Acceleration measurement is provided by a PCB triaxial accelerometer model 356B11 (PCB Piezotronics, Inc. Depew, New York, USA). The bike's front fork is attached with an appropriate connection to the rear bumper of the car. A dummy front hub attached to the bumper fixture allows the fork to rotate freely along the front axle. An instrumented stem⁸ measures the leaning vertical force amplitude applied by the cyclist, who can then monitor this force amplitude and keep it at a constant value of 140 N. The cyclist does not pedal and the bike chain has been removed to ensure that it does not disturb the acceleration signal. The tire pressure is set at 8 bar. During the tests, the car speed is kept constant. The test is repeated four times over the same 1.5 km portion of the road at three different speeds: 26, 30 and 36 km/h.

All transducer electric cables are routed along the frame and connected to the power supply and LMS

J. Lépine, Y. Champoux and J.-M. Drouet

Technique to Test Road Bike Vibration Transmission

SCADAS. The recorder data acquisition system model SCR01 is installed in the car. The sample rate is set at 44 kHz and throughput time data is recorded. The data are analyzed with LMS Test.Lab software. For this study, the frequency range of interest is between 8 and 100 Hz, which corresponds to the frequency band for which the hand–arm system is more sensitive.^{5,19} A frequency resolution of 1 Hz is selected and a Hanning time window with 67% overlap is used for averaging purposes. The recording time for each test was approximately 3 min, which allowed an average power spectral density (PSD) calculation using more than 500 frequency spectrums.

Acceleration measurements performed on the same road at the bumper fixture show that the acceleration level on the bumper is 15 dB below the acceleration level measured on the bike's rear dropout. This indicates that the rear wheel bicycle dropout measurements are not significantly influenced by car vibrations transmitted through the front fork.

Frequencies along with time domain analyses are used in this paper. Time data distribution of the vertical ac coupled acceleration signal $a(t)$ and average time data parameters including the standard deviation σ , the root mean square a_{rms} , the skewness s , and the kurtosis κ will be calculated according to the following equations, respectively, where T is the averaging time:

$$a_{rms} = \sigma = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [a(t)]^2 dt} \quad (1)$$

$$s = \frac{1}{T} \int_0^T \left[\frac{a(t)}{\sigma} \right]^3 dt \quad (2)$$

$$\kappa = \frac{1}{T} \int_0^T \left[\frac{a(t)}{\sigma} \right]^4 dt \quad (3)$$

Note that these parameters are central moments around the mean value. The mean value of the acceleration is equal to zero because there is no net vertical displacement of the bike. This explains why the mean variable does not appear in Eqs. 1–3. The skewness describes the symmetry of the distribution. In a normal distribution, the sample skewness value is equal to zero. A distribution with a positive skewness has a right tail longer than the left tail. In this study, this would mean that there are a small number of high-level positive acceleration events (upward) that create a positive skew in the distribution. The kurtosis is a descriptor of the shape of a probability

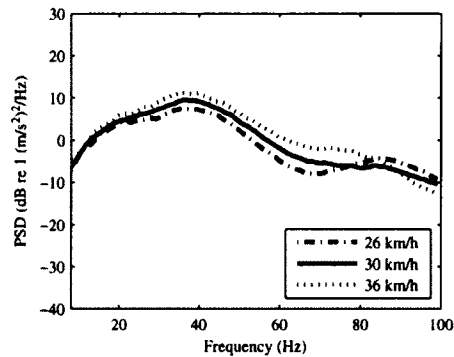


Figure 2 Average PSD for the vertical accelerations at three speeds on the road. Acceleration rms value — 26 km/h: 13.0 (m/s²); 30 km/h: 14.6 (m/s²); 36 km/h: 17.8 (m/s²).

distribution and is related to its "peakedness". A normal distribution will have a kurtosis value of 3. A kurtosis greater than 3 would mean the acceleration sample values are predominantly distributed around the mean, giving the distribution a greater peak. The time parameters are used here to provide a statistical description of the acceleration data. The same parameters will also be used to analyze and evaluate the replication quality of the laboratory test simulator.

Results: road measurement

A nearby road with specific characteristics was selected as the test ground. The pavement on the selected road did not reveal any major cracks or potholes. The surface was nevertheless coarse and provided the desired typical wideband excitation similar to certain roads in Europe.

The average PSD of the Z axis acceleration measured for the three speeds is shown in Fig. 2.

The frequency spectrums have the same smooth shape showing that there is no strong dynamic behavior of the measurement system or in the excitation input. As expected, the PSD spectrum amplitudes and the rms values increase along with speed despite the fact that the curves cross at around 80 Hz. The maximum difference between the 20 and 36 km/h frequency spectrum curves is approximately 4 dB.

Figure 3 shows the waveform amplitude histogram of the measured rear dropout vertical acceleration band-pass filtered between 8 and 100 Hz with a digital fifth-order zero-phase Butterworth filter. The statistical time parameter amplitudes are also showed

Technique to Test Road Bike Vibration Transmission

J. Lépine, Y. Champoux and J.-M. Drouet

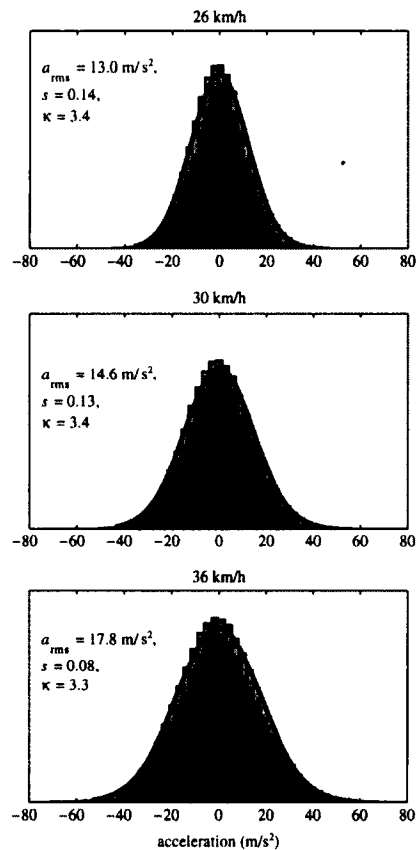


Figure 3 Vertical road acceleration distributions at three different speeds, a fitted normal distribution is superimposed.

in Fig. 3. Vertical axis is not shown in these figures because only the shape of the distribution is relevant for this analysis. As the speed increases, a small but noticeable increase in the spread of the base of the distribution occurs. The reduction of the skewness values from 0.14 to 0.08 shows that the excitation becomes more symmetrical at high speeds. The kurtosis does not change significantly with increased speed.

Road Simulator Testing Rig

A technique to acquire an acceleration signal that provides information on road excitation is described in the previous section. In this section, the signal we

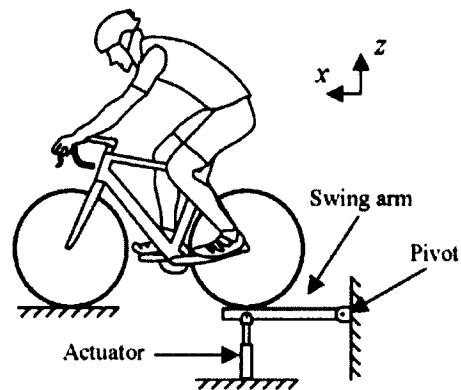


Figure 4 Schematic description of the road simulator exciting the rear wheel.

obtained is used as an input for a laboratory excitation technique involving the use of a road simulator that was designed and built specifically for bike testing. We describe the procedure by which we obtained equivalent vertical displacement under the wheels to mimic the road profile and to examine the road replication quality using time and frequency analyses.

Methods

A dedicated road simulator that was designed and built specifically for bike testing in a previous study¹¹ is shown in Fig. 4. The lateral equilibrium of the bike and cyclist is provided by attaching horizontal bungees between each side of the saddle and a fixed structure. A near-vertical displacement movement is generated under the wheel by the rotation of a long arm that is free to rotate around a pivot provided by two strong bearings. The tire rests on a flat surface. For now, no provision is made to allow the cyclist to pedal during a test. Two D-BOX Kinetron motion actuators produce the required displacement of the swing arm. These actuators were selected because of their flat frequency response, their relative low cost and because they can support a significant DC load. They were originally designed for motion platforms in movie theater setups. Their effective bandwidth ranges from DC to 100 Hz and they can provide a peak-to-peak displacement of 2.5 cm with a maximum linear velocity of 10 cm/s.

The actuator driving signal is a 16-bit wave file provided by a PC to a USB D-BOX KAI controller. Using the wave file prevents the use of an analog closed loop field replication system that would

J. Lépine, Y. Champoux and J.-M. Drouet

have adjusted and controlled the analog actuator driving signals in order to obtain the measured in-situ dropout acceleration level. However, the same objective can be achieved in the digital world as described here. First, the frequency response function (FRF) $Q(\omega) = G_{DA}(\omega)/G_{DD}(\omega)$ is measured as the ratio of the cross spectrum $G_{DA}(\omega)$ between the vertical acceleration $A(\omega)$ at the rear dropout of the test bicycle mounted on the simulator, the actuator digital driving signal input $D(\omega)$ (a 16-bit wave file), and the auto spectrum $G_{DD}(\omega)$ of this signal. The same cyclist and same bike used for the road measurements are used for this measurement. The cyclist's posture is also controlled the same way it was controlled for the in-situ measurement. A broadband signal $D(\omega)$ is used for this system characterization phase.

The FRF $H(\omega) = 1/Q(\omega)$ can be calculated. The inverse Fourier transform of $H(\omega)$ corresponds to the impulse response $h(t)$ of the system. To calculate the required driving digital signal actuator input $d(t)$ that would allow the replication of a road signal, the measured road time signal $a(t)$ is convoluted with the impulse response $h(t)$ according to Eq. 4.

$$d(t) = \int_{-\infty}^t a(\tau) h(t - \tau) d\tau \quad (4)$$

The signal $d(t)$ calculated this way generates the required simulated vertical displacement under the bike wheel to mimic the selected road excitation. This signal will recreate the same road displacement excitation regardless of the bicycles and cyclists tested. The same procedure could be used for different roads in order to create a road data bank representing different road conditions.

A simple and straightforward way to explore how well this approach reproduces road vibrations requires comparing the measured in-situ road acceleration with the acceleration obtained using the simulator driven by $d(t)$. This approach will be used in the next section. Because road excitations are usually not normally distributed,¹⁵ frequency domain and time domain parameter estimation (a_{rms} , s , κ) will be used for analyzing the signal.

Results and analysis

Again, the same cyclist and bike used for road measurements were used with the road simulator. The FRF $Q(\omega)$ was measured six times using different signal amplitudes covering the full amplitude range of the actuators.

Technique to Test Road Bike Vibration Transmission

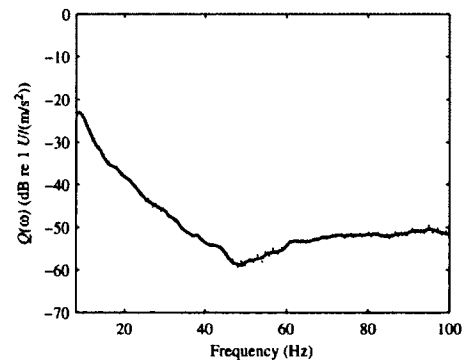


Figure 5 Transfer functions between the simulator input signal and the vertical rear dropout acceleration Z . Solid line: average transfer function. Dashed lines: minimum and maximum limits of the transfer function.

The maximum and minimum FRF curves from all six tests are shown in Fig. 5 in order to illustrate the system dynamic behavior. The maximum amplitude variation span of the transfer function is less than 1 dB, indicating that the system is stable and behaves linearly.

To evaluate the road simulator replication capability, road measurements at 26 km/h were used to calculate the input actuator signals $d(t)$. Due to actuator velocity limits, it was not possible to reproduce a higher speed excitation.

The average PSD of the dropout acceleration for the road signal and the acceleration measured on the simulator at 26 km/h are shown in Fig. 6. The top graph shows the vertical acceleration and the bottom displays horizontal acceleration. The rms acceleration value is also provided for each test. The road and the simulator vertical acceleration PSD and the rms values are very similar to the curves showing an average of 1 dB difference between 8 and 75 Hz. The discrepancy increases with frequency between 75 and 100 Hz to a maximum 5 dB. For the horizontal axis, acceleration generated by the simulator is lower than the road values with an average difference of 7 dB and a maximum discrepancy of 13 dB. This is not surprising because there is no horizontal excitation under the wheel. However, the road measurement shows that the horizontal acceleration ($a_{rms} = 6.02 \text{ m/s}^2$) is on average half that of the vertical acceleration ($a_{rms} = 12.1 \text{ m/s}^2$).

To obtain a deeper understanding of the replication quality of the simulator, time parameters are calculated. A special plot format¹⁸ is used in Fig. 7 to

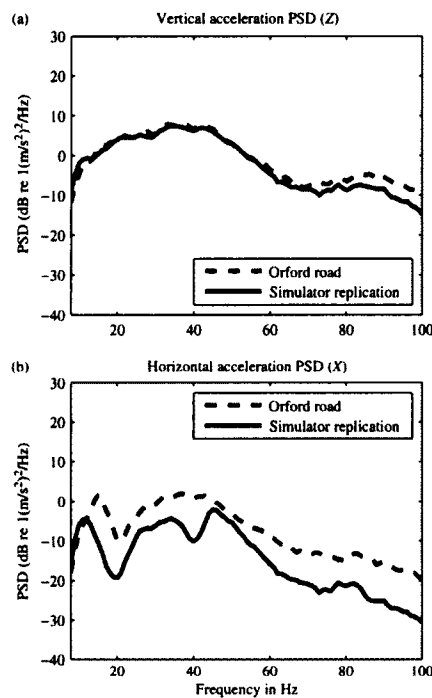


Figure 6 Comparison between the dropout acceleration PSD measured on the road and on the simulator; bike speed = 26 km/h. (a) Vertical direction (Z); road: $a_{rms} = 13.0 \text{ m/s}^2$, simulator: $a_{rms} = 12.2 \text{ m/s}^2$. (b) Horizontal direction (X); road: $a_{rms} = 6.02 \text{ m/s}^2$, simulator: $a_{rms} = 3.3 \text{ m/s}^2$.

show time characteristics of the signals. Figure 7 (a) and (c) shows the time variation of the road and the lab acceleration for a time duration of 10 s. Figure 7 (b) and (d) shows the respective amplitude histogram. It is worth remembering that these signals are low pass filtered with a cutoff frequency set at 100 Hz which corresponds to the upper frequency limit of interest. The rms values between the road and the simulated results are very similar. The time signals show, however, that the simulator does not have the capacity to generate the high peak amplitudes of the road signal. This is clearly demonstrated on the amplitude histogram which shows no count above 36 m/s^2 or below -39 m/s^2 . The kurtosis value of the signal provided by the simulator is lower than the road. This means that the acceleration amplitudes are concentrated around the mean. It is believed that the speed limit of the actuator (10 cm/s) is in part responsible for this limitation. The skewness value

of the road signal is positive and the simulator is close to zero. This shows that the road provides more upward acceleration than the simulator, which produces acceleration amplitudes more concentrated around the mean.

Discussion

A bike mounted by a cyclist and towed by a car is the focus of the technique presented in this paper. A different custom-built mechanical system on wheels could have been developed, but the bike is an inexpensive and already existing system that offers several advantages and provides good results.

Having a cyclist mounted on the bike is important because the cyclist's weight prevents the rear wheel from lifting and losing contact with the road. The cyclist also adds damping that calms the dynamic behavior of the system. The accelerometer is installed at the rear wheel dropout in order to be as close as possible to the source of the excitation (i.e. the road) that must be characterized. Preliminary results show that maintaining a constant speed is important in obtaining valid data. When riding a bike, the speed is constantly changing with changes in elevation along the road. The use of the brake is not allowed when taking measurements because it introduces noise in the signal and also because it changes the rear wheel structural dynamic behavior. All of these and previous elements justify having the bike towed by a motor vehicle as a solution.

Despite the inherent non-linear behavior of tires, it is worth noting that for the road signals used in this study, the FRF between the actuator's digital driving signal input and the dropout acceleration shows good linearity. Because of the dominant vertical acceleration amplitude of the bike at the hand and buttock contact points, the main objective of the simulator was to duplicate vertical excitation under the wheel. Vertical excitation is frequently used in the automobile industry for studies of noise and vibration harshness. The replication was shown to be excellent up to 75 Hz. The reduction of the replication quality above this frequency as shown in Fig. 7 as well as the reduction of the kurtosis value is related to the speed limit of the actuator. For the current application regarding vibration transmission to the cyclist from a granular rough road, this limitation is not an important factor because 88% of the road excitation power falls within a 10–50 Hz frequency bandwidth. When studying rough roads with transient events such as cracks, more powerful actuators with a higher upper frequency limit would be required. The

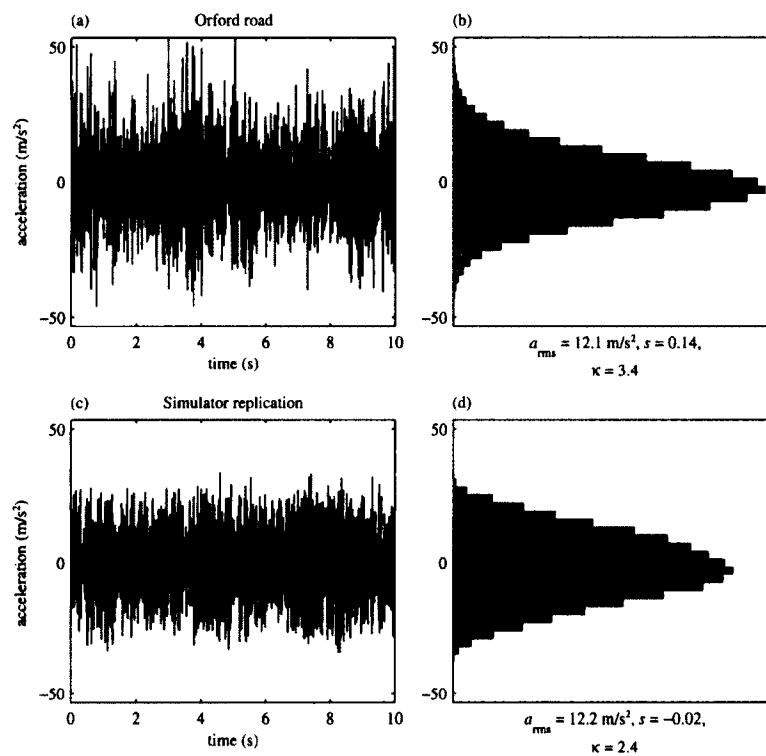


Figure 7 (a) Measured road time signal of the vertical acceleration; (b) amplitude histogram of the road signal; (c) simulator replication time signal of the vertical acceleration and (d) amplitude histogram of the simulator replication signal.

skewness value of 0.14 for the measured road vertical acceleration reveals that the bike upward response dominates. This is related to the fact that the road force input to the bike tire can only be upward and only the DC gravitation force can pull the bike down.

Conclusion

This paper presents a technique to measure a signal input related to the vibration excitation of a road surface. The signal is used to drive a laboratory road simulator that duplicates vertical displacement excitation under a bicycle wheel. For granular roads that provide a broadband excitation within the frequency band of interest, this laboratory technique was shown to provide reliable excitation that adequately duplicates road excitation. The driven signal obtained by this technique will allow the study

of dynamic behaviors of different bikes and bike components using the same realistic road profile.

Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge financial support from the National Science and Engineering Council of Canada (NSERC) and the participation of Cervélo and Vroomen-White Design.

References

1. Dettori, N., and Norvell, D., "Non-Traumatic Bicycle Injuries: A Review of Literature," *Sports Medicine* 36(1): 7–12 (2006).
2. Champoux, Y., Richard, S., and Drouet, J.-M., "Bicycle Structural Dynamics," *Sound and Vibration* 41: 16–22 (2007).

3. Hastings, A.Z., Blair, K.B., Culligan, F.K., and Pober, D.M., "Measuring the Effect of Transmitted Road Vibration on Cycling Performance," *The Engineering of Sport* 2: 619–705 (2004).
4. Petrone, N., Giubilato, F. "Comparative Analysis of Wheels Vibration Transmissibility after Full Bicycle Laboratory Tests," *Proceedings of AIAS 40—Associazione Italiana per l'Analisi delle Sollecitazioni*, 2011.
5. ISO 2631-1, "Mechanical Vibration and Shock-Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration—Part 1: General requirements" (1997).
6. Panzke, K.-J., and Balasus, W., "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* 57: 35–45 (1985).
7. Ewins, D.J., *Modal Testing Theory, Practice and Application*, 2nd edition, Research Studies Press, Letchworth, England (2000).
8. Richard, S., *Étude du comportement dynamique d'un vélo de route en lien avec le confort du cycliste*, MSc Thesis, Université de Sherbrooke (2005) (French).
9. Nordstrom, K.-I., *Discomfort Transmission, A Method for Measuring the Comfort of Full-Suspension Mountain Bicycles*, Masters Thesis, University of Victoria (1995).
10. Richard, S. and Champoux, Y., "Evaluation of Road Bike Comfort Using Classical and Operational Modal Analysis," *Proceedings of IMAC XXIII*, 2005.
11. Brassard, F., *Développement d'un simulateur de vibration pour vélo de route*, Masters Thesis, Université de Sherbrooke (2010) (French).
12. Kang, D.-K., Lee, S.-H., and Goo, S.-H., "Development of Standardization and Management System for Severity of Unpaved Test Courses," *Sensors* 7: 2004–2027 (2007).
13. Sayers, M.-W., and Karamihas, S.-M., *Interpretation of Road Roughness Profile Data*, Federal Highway Administration, Contract DTFH, 61-C00143 (1996).
14. Adams, D.E., Janas, J., Goyal, S., Braun, C., Seeniraj, G., and Bono, R.W., "Lab Lessons Learned-Part 2: Road Quality Determination Using Vehicle Data," *Experimental Techniques* 30(1): 61–66 (2007).
15. Bruscella, B., Rouillard, V., and Sek, M., "Analysis of Road Surface Profiles," *Journal of Transportation Engineering* 125: 55–59 (1999).
16. Imine, H., Delanne, H., and M'Sirdi, N.K., "Road Profile Input Estimation in Vehicle Dynamics Simulation," *Vehicle System Dynamics* 44(4): 285–303 (2006).
17. Birdsong, C., *An Integrated Measurement to Road Vibration Simulation System*, *Proceedings of The Engineering Integrity Society, Simulation, Test & Measurement Group Conference*, (2001).
18. Brandtl, A., *Noise and Vibration Analysis: Signal Analysis and Experimental Procedures*, Wiley, Portland, USA (2011).
19. Miwa, T., "Evaluation Methods for Vibration Effect: Part 3, Measurements of Threshold and Equal Sensation Contours on Hand for Vertical and Horizontal Sinusoidal Vibrations," *Industrial Health* 5: 213–220 (1967).

3.4 Faits saillants de l'article

- Il est possible de reproduire le spectre d'excitation verticale de la route en laboratoire.
- L'excitateur mécanique D-BOX n'a pas une vitesse de déplacement suffisamment rapide pour reproduire parfaitement les caractéristiques statistiques d'une excitation de route, car certains évènements à fortes amplitudes ne sont pas reproduits.
- Seulement l'excitation verticale est reproduite en laboratoire

3.5 Autorisation de publication

**AUTORISATION D'INTÉGRATION
D'UN ARTICLE ÉCRIT EN COLLABORATION
À UN MÉMOIRE OU UNE THÈSE**

Je (ou nous), soussignée(s), soussigné(s), co-auteur(s), co-auteur(s) de l'article intitulé :

A Laboratory Excitation Technique to Test Road Bike Vibration Transmission

reconnais (reconnaissons) que ledit article sera inclus comme partie constituante du mémoire de la thèse

de l'étudiant(e) (nom) : Julien Lépine

inscrit(e) au programme de Génie mécanique

de la Faculté de Génie de l'Université de Sherbrooke

En foi de quoi, j'ai (nous avons) signé cet engagement en un nombre suffisant d'exemplaires*

Signature _____

Date : 2013-12-13

Nom Julien Lépine

Coordonnées Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique

Signature _____

Date : 13/12/2013

Nom Yvan Champoux

Coordonnées Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique

Signature _____

Date : 13 déc. 2013

Nom Jean-Marc Drouet

Coordonnées Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique

* Un exemplaire pour l'étudiante, l'étudiant, un exemplaire pour chaque personne signataire et un exemplaire pour le Service des bibliothèques (à remettre avec le mémoire ou la thèse au moment du dépôt final).

CHAPITRE 4 : PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

L'article présenté dans ce chapitre décrit développement du protocole expérimental qui réduit au maximum les sources d'incertitudes reliées aux mesures de vibration sur le système vélo-cycliste.

Auteurs et affiliation :

Julien Lépine : étudiant à la maîtrise, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique

Yvan Champoux, professeur, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique

Jean-Marc Drouet, professeur, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique

Date d'acceptation : 25 novembre 2013

État de l'acceptation : Version finale en consultation en ligne

Revue : Sports Engineering

Référence : Lepine J, Champoux Y, Drouet J., A Laboratory Road Bike Comfort : On the Measurement of Vibration Induced to Cyclist, Sport Engineering, DOI: 10.1007/s12283-013-0145-8.

Titre en français : Le confort des vélos de route : sur la mesure des vibrations induites au cycliste

4.1 Contribution au mémoire

L'article présenté dans ce chapitre contribue au mémoire en présentant toutes les mesures mises en place pour élaborer un protocole expérimental qui procure des résultats répétables et représentatifs de la réalité. Dans un premier temps, il est question de l'importance du contrôle de la position du cycliste (par exemple : position des mains sur le cintre, la force statique appliquée par les mains...) pendant les essais pour assurer la répétabilité des mesures et éviter tout biais. Dans un second temps, l'effet de différents paramètres d'excitation (par exemple : la surface d'excitation, type de signal d'excitation...) sur la comparaison de transmissibilité entre deux paires de roues est étudié afin de montrer que ce type comparaison ne dépend pas de ces paramètres.

L'évaluation de l'effet de la position du cycliste et des paramètres d'excitation montre les sources d'incertitudes expérimentales qui pourraient fausser les résultats de mesures de VIB.

La technique de mesure des VIB est aussi clairement expliquée. Deux types de capteur sont utilisés pour mesurer les VIB : les accéléromètres piézoélectriques et les capteurs de forces à jauges embarqués sur des pièces de vélo.

À partir de ces informations, il est ensuite possible d'établir un protocole expérimental qui est juste et représentatif de l'utilisation normale d'un vélo de route. Ce protocole est d'ailleurs présenté à la section suivante.

4.2 Résumé en français

Avec le temps, le confort est devenu l'une des caractéristiques les plus convoitées des vélos de route par les clients ainsi que par les fabricants de bicyclettes. L'étude du comportement vibratoire du système de vélo-cycliste est subséquemment devenue un domaine de recherche très actif en ingénierie du sport ces dernières années. Lors de l'évaluation du comportement vibratoire de ce système, le contrôle des conditions d'essai pour obtenir de mesures répétables de forces et d'accélération aux points de contact du cycliste avec le vélo ne doivent pas être sous-estimée. Curieusement, cette considération n'a pas encore été spécifiquement abordée dans la littérature. Le but de cet article est donc d'étudier les effets d'un ensemble de conditions d'essai sur la mesure des vibrations induites au cycliste par un vélo de route. Les résultats démontrent d'ailleurs que toutes les conditions d'essai étudiées ont eu un effet significatif sur le niveau de vibration induite au cycliste.

4.3 Article 2

Road Bike Comfort: On the Measurement of Vibrations Induced to Cyclist

ABSTRACT

With ride quality being one of the most sought-after characteristics of a road bicycle by customers as well as by bicycle manufacturers, the vibrational behaviour of the bicycle/cyclist system has grown into an active field in sport engineering research in recent years. When assessing this behaviour, bicycle transmissibility and ride comfort, controlling test conditions to obtain repeatable load and acceleration measurements at the cyclist's contact points with the bicycle cannot be overemphasized. Surprisingly however, this consideration has not yet been specifically addressed in the literature. The aim of this paper is a first effort to investigate the effect of a selected set of test conditions on the measurement of vibration induced to the cyclist by a road bicycle. Our results showed that all the test conditions selected had a significant effect on the level of vibration induced to the cyclist.

Keywords: Bicycle Dynamic Comfort, Bicycle Testing, Vibrations Transmission, Vibration Measurement, Excitation Techniques

INTRODUCTION

Vibrational comfort is closely linked to human perception and from an engineering point of view, is related to the level of vibration transmitted from vibrating objects to humans. In this matter, major fields of study include vibration in relation to occupational health and safety, transportation-related vibration and a vibration model of human body. The standard organisation ISO has produced standards that describe human exposure to vibration [1, 2]. These standards mainly serve as guidelines for the measurement and analysis of vibration levels transmitted to humans. More recently, vibration transmitted to humans has been the subject of several studies in sports including ice hockey [3], baseball [4], golf [5] and bicycling [6-25]. In road cycling specifically, ride quality has become one of the most sought-after characteristics of a road bicycle by customers as well as by bicycle manufacturers. The vibration generated by road surface defects and transmitted by the bicycle to the hands and the buttocks can be a significant source of discomfort, fatigue and a disincentive to ride. In this regard, it is essential to have an in-depth understanding of vibrational behaviour of the bicycle/cyclist system as well as an adequate assessment of the vibration induced to the bicyclist (VIB) by the road.

Over the past three decades, the bicycle/cyclist system has been the object of several studies which can be classified according to the following four categories: (1) Transducer development and measurement of loads transmitted at the contact points between the cyclist and the bicycle (Alvarez and Vinyolas [6], Rowe et al. [7], Reiser et al. [8], Drouet et al. [9], Bolourchi and Hull [10], De Lorenzo and Hull [11], Drouet and Champoux [12, 13], Caya et al. [14] Champoux et al. [15], Arpinar-Avsar et al. [16] and Chimentin et al. [17]); (2) Road-induced excitation measurement and replication in the laboratory (Lépine et al. [18]); (3) Vibration transmissibility of the bicycle and its components, and ride comfort (Petroni and Giubilato [19], Olieman et al. [20], Giubilato and Petrone [21], Lépine et al. [22], Thite et al. [23]); (4) Model development (Perrier et al. [24, 25]). From a mechanical engineering standpoint, the aforementioned published literature sheds light on the inherent complexity of the study of the bicycle/cyclist system, and by extension, of the vibrational behaviour of this system. Key aspects of this complexity include difficulty obtaining realistic dynamic load measurements, non-linearity of the human body as a structure, the effect of added mass and damping by the cyclist on the vibrational behaviour of the bicycle, and variability introduced by the cyclist to load and acceleration measurements.

In this context, when assessing the vibrational behaviour of the bicycle/cyclist system, bicycle transmissibility and ride comfort, controlling test conditions to obtain repeatable measurements of load and acceleration at the cyclist's contact points with the bicycle is paramount and cannot be overemphasized. Surprisingly however, this consideration has not yet been specifically addressed in the literature. Among all the parameters that are susceptible to affect these load and acceleration measurements, test conditions like cyclist's posture or the excitation condition under the wheels for example can play significant role. The aim of this paper is therefore to report on our first efforts to investigate the effect of a selected set of test conditions on the measurement of VIB.

To increase the benefits of this study, the effect of test conditions was extended to the ranking of two wheel sets in terms of the VIB. Among the bicycle components that could have been selected for investigation, the choice of this particular component was motivated by recent studies by Olieman et al. [20] and Giubilato and Petrone [21] for which conclusions on wheel set ranking differ. Furthermore, it will be shown that if test conditions are not carefully controlled, wheel set transmissibility ranking can be inconsistent.

METHODS

In order to assess VIB , dedicated test apparatuses enabled us to apply excitation displacement at the wheels as well as transducers to measure force at the stem and seat post were developed and are presented in part (a) of this paper. The test conditions investigated in this study are detailed in part (b). A description of the statistical data analysis used to evaluate the effect of the test conditions on the VIB is provided in part (c).

a) Test apparatuses

On-road testing is unlikely to provide an adequate environment when seeking repeatable results [18]. For the purposes of this paper, all measurements were carried out indoors in a laboratory to establish a more controlled and therefore adequate testing environment. All the tests were carried out using the same bicycle. Wheel tyres were inflated to 8 bars. Two laboratory road-simulating apparatuses were used: (1) a road simulator equipped with two hydraulic shakers which enabled us to control the vertical displacement under both wheels (Fig. 1a); (2) a homemade bicycle treadmill with a wooden dowel attached to the belt to generate impact on the wheels [18](Fig. 1b). In both cases, the bicycle is vertically maintained by bungee cables. These bungees are soft enough compare to the bicycle to not affect its dynamic but they are stiff enough to support the cyclist while he is sitting on the bicycle.

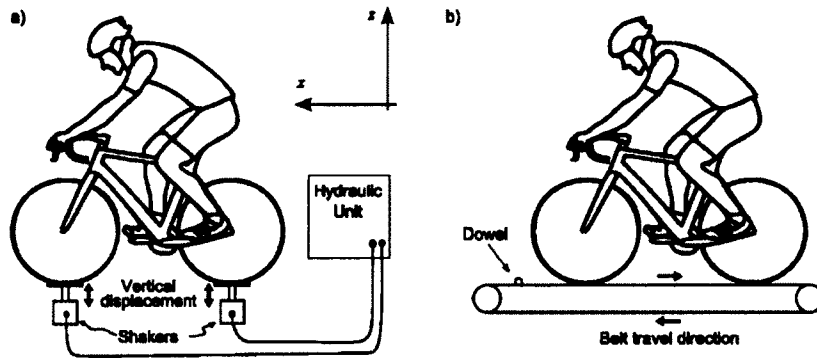


Fig. 1 Road-simulating apparatuses: (a) Road simulator equipped with two hydraulic shakers; (b) Bicycle treadmill with a wooden dowel attached to the belt

During each test, the cyclist's posture was controlled as follows:

- The cyclist took a "natural position" on the bike, with their hands resting on (not grasping) the brake levers or the handlebar
- The cyclist applied and maintained a constant static vertical force at the hands. This force was monitored using an instrumented stem
- The bike cranks were fixed in a horizontal position with the left crank at the front
- The cyclist did not pedal and remained seated at all times

The complete testing bicycle specifications are given in Table 1. Wheel sets were selected according to the results of a previous study [22] where wheel set A was found to be the most force transmitting and wheel B, the least force transmitting wheel set. The selection of a large difference of force transmissibility between wheel sets ensured better ranking capability during the different tests conducted for this paper.

Table 1 Test bicycle configuration

Component	Description
Frame	Cervélo R3
Size	56 cm
Fork	Cervélo FK25
Headset	FSA IS3 Tapered – 6 mm TC
Seatpost	Instrumented by the authors
Rear Derailleur	None
Front Derailleur	None
Brake hood	Shimano 105
Brake Calipers	None
Bottom Bracket	FSA BBright
Crankset	Rotor 3DF BBright
Handlebar	3T Ergonova PRO
Stem	Instrumented by the authors
Saddle	Selle Italia Nitrox
Chain	None
Pedals	Avenir standard 9/16" x 20
Wheel set A	Fulcrum 7, Vittoria Rubino Pro 700x23C clincher tyres
Wheel set B	Zipp 202, Vittoria Corsa CX 21-28" tubular tyres

To assess the VIB, four measurands were considered: vertical acceleration (a_{VIB}) and vertical force (F_{VIB}) at the stem and at the seat post. At the stem (Fig. 2), both the acceleration and the force were measured at the stem-handlebar connection using a PCB 352C68 accelerometer and a strain gauge instrumented stem (Drouet and Champoux [13]). Stem a_{VIB} and F_{VIB} are the RMS value of the acceleration and the force signal was filtered with the 5349 ISO standard frequency-weighting curves for hands transmitted vibration [1]. Similarly, at the seat post, both the acceleration and the force were measured at the seat post-saddle connection using a PCB 352C65 accelerometer and a strain gauge instrumented seat post. Seat post a_{VIB} and F_{VIB} are the RMS value of the acceleration and the force signal were filtered with the 2631 ISO standard vertical frequency-weighting curves for whole body transmitted vibration [2]. Because ISO standard 2631 [2] indicates that the human perception of vibration at the feet is four times less than the perception of vibration at the buttocks and also because the authors' personal experience suggests that the VIB at the feet can, from a perception point of view, be neglected in contrast to vibration felt at the hands, no vibration measurement was made at the pedals in order to simplify the analysis.

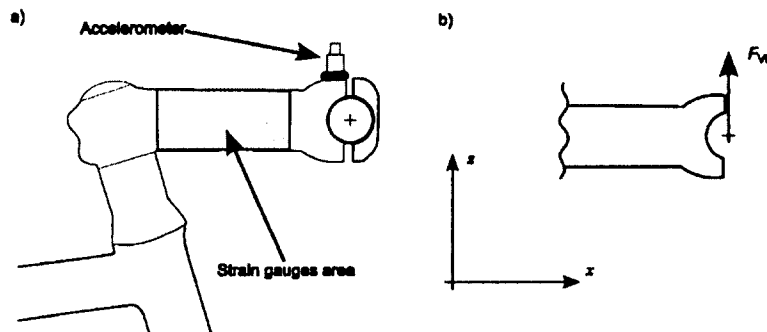


Fig. 2 Instrumented stem: (a) transducers position; (b) application position of the measured force

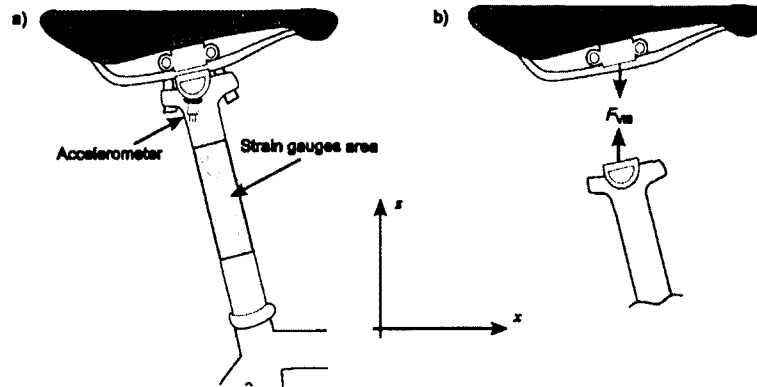


Fig. 3 Instrumented seat post: (a) transducers position; (b) application position of the measured force

b) Test conditions

A multitude of test conditions can affect VIB measurement. Based on past research [26], these conditions can be classified according to two main categories: (1) cyclist-related and (2) excitation-related conditions. In this study, four cyclist-related conditions (hand position, wrist angle, static stem force level, and the cyclist's mass) and one excitation-related condition (loading condition at the tyres) was been investigated and are described below.

Hand position

The three following common hand positions on the handlebar were considered (Fig. 5): (a) on the brake hoods with no contact between hands and handlebar; (b) in the drop on the lowest part of the handlebar; (c) on top. For these three positions, the cyclist's hand was resting on the handlebar without grasping it.

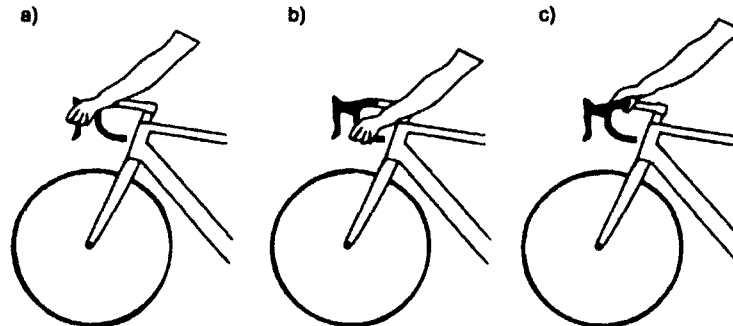


Fig. 5 Tested hand positions: (a) on the brake hood; (b) in the drop; (c) on top

Wrist angle

The two following common wrist angles were considered:

- Wrist angle 0°: position used by the majority of cyclists where the forearm is in line with the hand (Fig. 1a).

Wrist angle 60°: position used by cyclists with hypermobile wrists positioned at $\approx 60^\circ$ in extension and $\approx 60^\circ$ in ulnar deviation (Fig. 4).

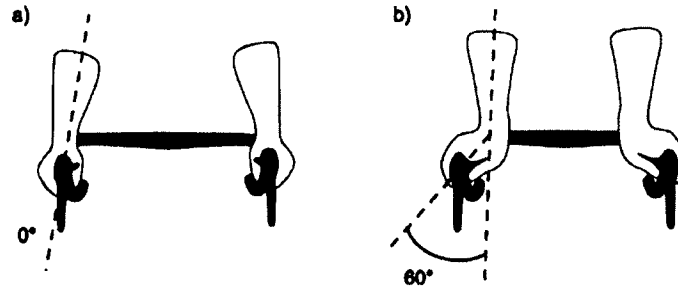


Fig. 4 Tested wrist angles: (a) 0°; (b) 60°

Static stem force level

With their hands resting on the handlebar, the cyclist applies a downward static force at the stem-handlebar connection. To evaluate the effect of this force on the VIB, three force levels were considered: (1) the nominal force level when the cyclist is adopting their natural position on the bicycle; (2) the nominal level minus 30 N; (3) the nominal level plus 30 N. During the tests, the cyclist was asked to maintain a given force level within a ± 3 N range.

Cyclist's mass

To evaluate the effect of the cyclist's mass on the VIB, two cyclists of similar height but different masses were used as testers: cyclist #1: height = 1.82 m, mass = 70 kg; cyclist #2: height = 1.80 m, mass = 92 kg.

Loading condition at the tyres

A set of five load cases at the tyre were considered. These conditions were selected based on the authors' experience in the field [27] and are described in table 2. They mainly reflect (1) the typical road-induced excitation for road bicycle as encountered in the field and (2) the capabilities and characteristics of apparatuses usually used for assessing a bicycle's vibrational behaviour (vertically moving shakers and treadmill [18]).

The load cases are made of three excitation types (granular asphalt road [18], impact and random white noise) and two typical tyre deformation conditions (flat patch and local deformation). A random white noise excitation (0 to 100 Hz, RMS amplitude of 0.3 mm) was included in the load cases. This is an easily and widely available signal and therefore it presents an advantage for comparison studies by relieving the experimenter of the burden of measuring and replicating actual road excitation.

Table 2 Loading condition cases parameters

Load case	Excitation apparatus	Excitation type	Tyre contact condition
A	Hydraulic shakers	Granular asphalt road	Local deformation with 54 mm-diameter half dowel (Fig. 6a) ¹
B	Hydraulic shakers	Granular asphalt road	Flat patch (Fig. 6b)
C	Hydraulic shakers	Vertical impacts (z-axis) of 25 ms duration and 45 mm amplitude	Local deformation with 54 mm-diameter half dowel (Fig. 6a) ¹
D	Hydraulic shakers	Random white noise, 0 to 100 Hz, 0.3 mm of RMS amplitude	Flat patch (Fig. 6b)
E	Treadmill	Impacts created by a 16 mm diameter wooden dowel attached to the treadmill belt moving at 26 km/h. These impacts have both a vertical (z-axis) and horizontal (x-axis) components and are repeated every 0.7 s.	Local deformation/Flat patch ²

Note 1: At all time, the tyres are solely in contact with the half dowel.

Note 2: At one point during the impact, the tyre loses contact entirely with the belt and is only touching with the dowel. This load case is performed in two phases: (1) only the front wheel is touching the belt during F_{VIB} and a_{VIB} measurement at the stem; (2) only the rear wheel is touching the belt during F_{VIB} and a_{VIB} measurement at the seat post.

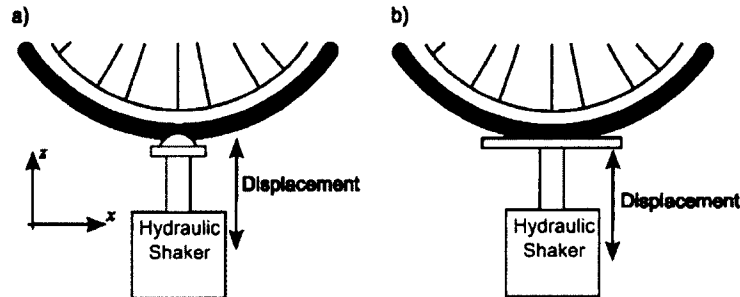


Fig. 6 Shaker contact surfaces: (a) Local deformation with 54 mm-diameter half dowel; (b) Flat patch

c) Statistical data analysis

In this study, the bicycle/cyclist system was considered as a stochastic system because of the random variation of the cyclist’s dynamic behaviour. A statistical approach was therefore used to analyse the effect of test conditions on the VIB, as well as a on the wheel set ranking for VIB. For each of the 15 study cases presented in Table 3, force and acceleration measurements were repeated three times in a random order to increase the power of the statistic tests.

The effect of the test conditions on wheel set ranking are independently analysed using SPSW 17.0 (IBM) with an analysis of variance (ANOVA). The normality of the RMS value residues distribution was checked using a normal probability plot in order to ensure the validity of the ANOVA [26]. When the ANOVA revealed a significant effect of a set of test conditions, pairwise comparisons between the test conditions in this set were performed using the Bonferroni test [26]. We noted that even considering that the static stem force the cyclist applied at the stem during every test (the force signal average) was

controlled within ± 3 N, variation nevertheless had an effect on the measurement. To dissociate the effect of this degree of variation from the effect of the test parameters, the static stem force was used as a covariate in the ANOVA [26].

Table 3 Study cases parameters combinations

Study case	Hand position	Wrist angle (°)	Static stem force (nominal, N)	Cyclist	Load case (Table 2)
1	Hood	0	190	2	A
2	Hood	60	190	2	A
3	Hood	0	160	2	B
4	Hood	0	220	2	B
5	Top	0	190	2	A
6	Drop	0	190	2	A
7	Hood	0	140	1	A
8	Hood	0	140	1	B
9	Hood	0	140	1	C
10	Hood	0	140	1	D
11	Hood	0	140	1	E
12	Hood	0	190	2	B
13	Hood	0	190	2	C
14	Hood	0	190	2	D
15	Hood	0	190	2	E

RESULTS

The results are displayed using four graphs in a 2x2 configuration representing the tests mean values of (a) a_{VIB} at the seat post (upper left graph); (b) a_{VIB} at the stem (upper right graph); (c) F_{VIB} at the seat post (lower left graph); (d) F_{VIB} at the stem (lower right graph). Test results are presented with a confidence interval of 95%. Test results for the hand position, wrist angle, static stem force and load case are presented in Fig. 7 and 8 respectively. The mean values of a_{VIB} and F_{VIB} of the study case replications are presented for wheel sets A (o) and B (*).

The ANOVA p -values (level of significance) related to the hand position, wrist angle and static stem force are presented in Table 4. Pairwise comparisons between hand positions effect on VIB are presented in Table 5. The ANOVA p -values related on wheel sets VIB comparison for each type of excitation are presented in Table 6. The general ANOVA p -value of wheel sets VIB comparison regardless of the excitation type (those parameters are taken as covariates) are presented for both cyclist in Table 7.

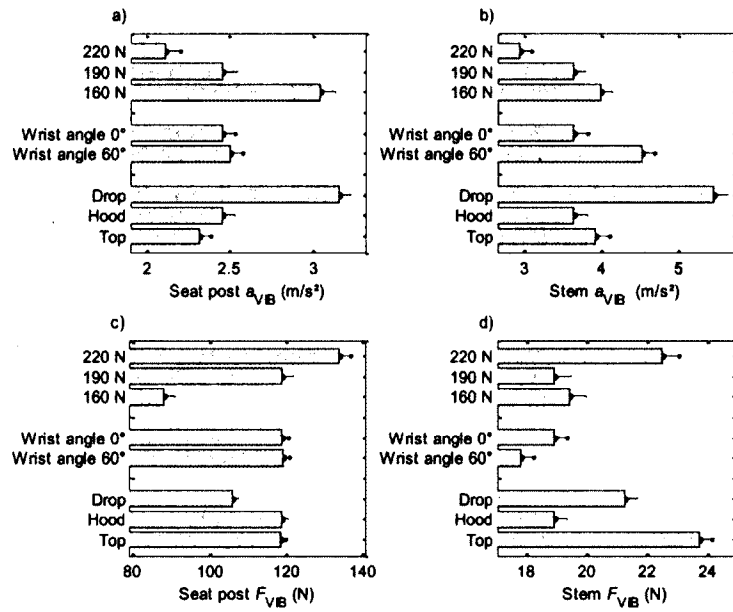


Fig. 7 Effect of the hand position, wrist angle and static stem force of cyclist #2 for VIB. Uncertainty bars correspond to high and low end values of 95 % confidence interval

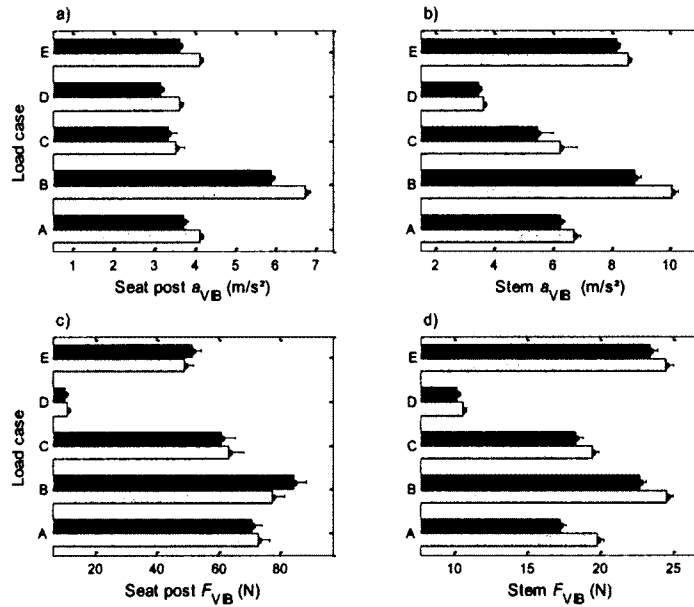


Fig. 8 Effect of the load case on discrimination between wheel set A (darker bars) and wheel set B (lighter bars) with cyclist #1. Uncertainty bars correspond to high and low end values of 95 % confidence interval

Table 4 ANOVA p -values related on cyclist #2 hand position, wrist angle and static stem force effect on VIB

Measurand	Hand position	Wrist angle	Static stem force
a_{VIB} at the seat post	0.000	0.480	0.011
a_{VIB} at the stem	0.000	0.001	0.005
F_{VIB} at the seat post	0.000	0.820	0.002
F_{VIB} at the stem	0.000	0.013	0.030

Table 5 Hand positions of cyclist #2 p -value pairwise comparison adjusted with Bonferroni correction

Measurand	Hand position	Hood	Drop
a_{VIB} at the seat post	Top	0.228	0.000
	Hood	-	0.000
a_{VIB} at the stem	Top	0.691	0.001
	Hood	-	0.000
F_{VIB} at the seat post	Top	1.000	0.000
	Hood	-	0.000
F_{VIB} at the stem	Top	0.000	0.011
	Hood	-	0.014

Table 6 ANOVA p -values related on wheel sets VIB comparison for each type of excitation with cyclist #1

Measurand	Load case A	Load case B	Load case C	Load case D	Load case E
a_{VIB} at the seat post	0.021	0.000	0.015	0.167	0.017 ¹
a_{VIB} at the stem	0.084	0.001	0.191	0.056	0.093 ²
F_{VIB} at the seat post	0.318	0.248	0.288	0.762	0.414 ¹
F_{VIB} at the stem	0.000	0.018	0.212	0.092	0.013 ²

Note 1: Impacts at the rear wheel only
 Note 2: Impacts at the front wheel only

Table 7 ANOVA p -values related on wheel sets VIB comparison on every test made with cyclist #1 and cyclist #2 considering the excitation types as covariates

Measurand	Cyclist #1	Cyclist #2
a_{VIB} at the seat post	0.000	0.243
a_{VIB} at the stem	0.002	0.022
F_{VIB} at the seat post	0.716	0.262
F_{VIB} at the stem	0.000	0.000

Hand position, wrist angle and static stem force test conditions analysis

The results show that the hand position, wrist angle and static stem force test conditions have a significant effect on the VIB. This is confirmed by the ANOVA (Table 4) where the p -values related to conditions are below the level of significance (0.05).

Fig. 7 suggests that the drop position has a significant effect on all four measurands and the top and hood positions effect is only significant on F_{VIB} at the stem. These conclusions are also seen on the pairwise comparison (Table 5) where the drop position has p -value below the 0.05 level of significance on both comparison and the hood position is only significant when it is compared with top position in F_{VIB} at the stem.

Fig. 7 suggests that the wrist angle has a significant effect on stem measurands (a_{VIB} and F_{VIB}) and not on the seat post measurands. This is clearly demonstrated by the ANOVA p -values (Table 4) that are only significant for the stem measurands.

As seen with the ANOVA p -value (Table 4) the static stem force has a significant effect on all four measurands. An noteworthy trend can be found on Fig. 7; when the static force at the stem increases, the a_{VIB} decrease and the F_{VIB} increase at the saddle and the stem.

Wheel sets transmissibility ranking analysis

Although Fig. 8a, b and d suggest that it is possible to establish a transmissibility ranking of wheel sets and that the value of the three measurands are higher for wheel set A than for wheel set B for every load case, it is not significantly so for all of them based on the p -values in Table 6. For a significance level of 5 % the following conclusions can be drawn:

- Load case B significantly distinguishes wheel set A and B based on a_{VIB} at the seat post and the stem, and based on F_{VIB} at the stem.
- Load cases A and E significantly distinguish wheel sets A and B based on a_{VIB} at the seat post and, based on F_{VIB} at the stem.
- Load cases C and D only significantly distinguish wheel sets A and B based on a_{VIB} at the seat post.

Fig. 8c shows that no significant difference between wheel sets A and B can be established using F_{VIB} at the seat post.

Even though the results presented in Fig. 8 and Table 6 were obtained for cyclist #1, wheel set comparisons for cyclist #2 were also carried out. For both cyclists, wheel set A had a higher level of VIB than wheel set B. ANOVA performed for each cyclist including every type of excitation as covariate showed almost the same p -value for both cyclists (Table 7) with the exception that cyclist #1 had a lower α_{VIB} significance level at the seat post.

DISCUSSION

Results show that all the test conditions considered in this paper had a significant effect on at least one of the four measurands. They showed that the loading condition at the tyres did not affect the transmissibility ranking of the two wheel sets used in terms of force and acceleration at the stem and at the seatpost.

Results also suggest that to properly assess the VIB by a road bicycle and to achieve valid and repeatable wheel set transmissibility ranking, precautions should to be taken during force and acceleration measurements as test conditions remain either unchanged (load condition, cyclist's mass, hand position) or tightly controlled (wrist angle and static stem force).

If, for example, these precautions are not respected and test conditions are changed during wheel set ranking assessment tests, the ranking can be biased. To illustrate this, we established a test where cyclist #2 was asked to use (1) hood hand position, 0° of wrist angle and a static stem force of 160 N for wheel sets A measurements and (2) hood hand position, 60° of wrist angle and a static stem force of 220 N for wheel sets B measurements. All measurements were performed using load case B. The results (Fig. 9) showed that, by intentionally changing the wrist angle and static stem force during the tests, wheel set transmissibility ranking in terms of acceleration at the stem and seat post was inverted. Wheel set A now transmits less acceleration at the stem and seat post than wheel set B with respectively 0.079 and 0.022 of significance (p -value) which is opposed to the ranking established with constant test conditions.

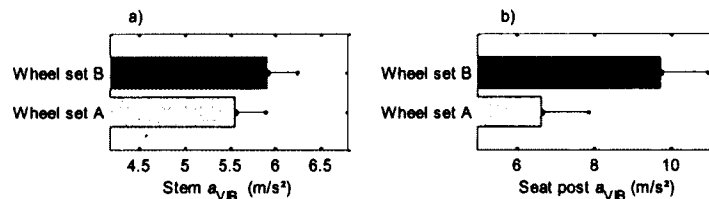


Fig. 9 Biased wheel sets comparison where cyclist #2 has 0° of wrist angle and a static stem force of 160 N for wheel sets A (o) and 60° of wrist angle and a static stem force of 220 N for wheel sets B (*)

When considering the stochastic nature of the bicycle/cyclist system, the authors stress the fact that it is imperative to assess VIB using a statistical approach. No conclusions should be drawn based on single force or acceleration measurements due to measurement uncertainties. Repeated force and acceleration measurements and the use of ANOVA are therefore strongly recommended.

CONCLUSION

The aim of this study was to investigate the effect of cyclist-related and excitation-related test conditions on the measurement of VIB by a road bicycle as well as on the ranking of two wheel sets in terms of VIB.

A total of five test conditions were selected and their effects investigated in terms of transmitted force and acceleration at the seat post and stem. Our results showed that all of the test conditions had a

significant effect on at least one measurand. Though the test conditions had a significant effect on the VIB, they did not affect the transmissibility ranking for the two wheel sets used in the study.

In consideration of our findings comparing the vibrational behaviour of the bicycle/cyclist system, bicycle transmissibility and ride comfort, in order to get repeatable measurements of load and acceleration at the cyclist's contact points with the bicycle, it is vital to be well aware of the importance of the test conditions and acting accordingly to control them as best possible. Without this knowledge in hand, experimenters could easily come to an incorrect conclusion.

REFERENCE LIST

1. ISO 5349-1 (2001) Mechanical vibration - Measurement and evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration - Part 1: General requirements
2. ISO 2631-1 (1997) Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1: General requirements
3. Hunt L, Garcia I (2012) Implementation of a vibration absorber for composite hockey goalie sticks. *Procedia Engineering* 34:349-354
4. Russell DA (2006) Bending Modes, Damping, and the Sensation of Sting in Baseball Bats. In: Moritz E, Haake S (eds) *The Engineering of Sport* 6. Springer New York, pp 11-16
5. Roberts JR, Jones R, Mansfield NJ, Rothberg SJ (2005) Evaluation of vibrotactile sensations in the 'feel' of a golf shot. *J Sound Vib* 285:303-19
6. Alvarez G, Vinyolas J (1996) A new bicycle pedal design for on-road measurements of cycling forces. *J of Appl Biomech* 12:130-142
7. Rowe T, Hull M, Wang E (1998) A pedal dynamometer for off-road bicycling. *Am Soc of Mec Eng J of Biomed Eng* 120:160-164
8. Reiser RF, Peterson ML, Broker JP (2003) Instrumented bicycle pedals for dynamic measurement of propulsive cycling loads. *Sport Eng* 6:41-48
9. Drouet J, Champoux Y, Dorel S (2008) Development of Multi-platform Instrumented Force Pedals for Track Cycling (P49). In: *The Engineering of Sport* 7. Springer Paris, pp 263-271
10. Bolourchi F, Hull M (1985) Measurement of rider induced loads during simulated bicycling. *Int J Sport Biomech* 1:178-198
11. De Lorenzo DS, Hull ML (1999) A hub dynamometer for measurement of wheel forces in off-road bicycling. *J Biomech Eng* 121:132-137
12. Drouet J, Champoux Y (2010) A novel dynamometric hubset design to measure wheel loads in road cycling. *Procedia Engineering* 2:2925-2930
13. Drouet J, Champoux Y (2012) Development of a three-load component instrumented stem for road cycling. *Procedia Engineering* 34:502-507

14. Caya A, Champoux Y, Drouet J (2012) Dynamic behaviour and measurement accuracy of a bicycle brake hood force transducer. *Procedia Engineering* 34:526-531
15. Champoux Y, Vittecoq P, Maltais P, Auger E, Gauthier B (2004) Measuring The Dynamic Structural Load Of An Off-Road Bicycle Frame. *Exp Tech* 28:33-36
16. Arpinar-Avsar P, Birlik G, Sezgin ÖC, Soylu AR (2013) The Effects of Surface-Induced Loads on Forearm Muscle Activity during Steering a Bicycle. *Journal of Sports Science and Medicine* 12:512-520
17. Chiementin X, Rigaut M, Crequy S, Bolaers F, Bertucci W (2012) Hand-arm vibration in cycling. *Journal of Vibration and Control*
18. Lepine J, Champoux Y, Drouet J (2011) Excitation techniques for testing bike vibration transmission in the laboratory. *Conf Proc Soc Exp Mech Ser* 6:35-43
19. Petrone N, Giubilato F (2011) Comparative Analysis of Wheels Vibration Transmissibility after Full Bicycle Laboratory Tests. *AIAS*:147
20. Olieman M, Marin-Perianu R, Marin-Perianu M (2012) Measurement of dynamic comfort in cycling using wireless acceleration sensors. *Procedia Engineering* 34:568-573
21. Giubilato F, Petrone N (2012) A method for evaluating the vibrational response of racing bicycles wheels under road roughness excitation. *Procedia Engineering* 34:409-414
22. Lepine J, Champoux Y, Drouet J (2012) Technique to measure the dynamic behavior of road bike wheels. *Conf Proc Soc Exp Mech Ser* 6:465-470
23. Thite AN, Gerguri S, Coleman F, Doody M, Fisher N (2013) Development of an experimental methodology to evaluate the influence of a bamboo frame on the bicycle ride comfort. *Veh Syst Dyn*:1-18
24. Perrier S, Champoux Y, Drouet J (2012) Using substructuring to predict the human hand influence on a mechanical structure. *Conf Proc Soc Exp Mech Ser* 2:33-44
25. Perrier S, Champoux Y, Drouet J (2011) Coupling a compliant structure with a Hand - Arm system using FBS 3:65-78
26. Lepine J, Champoux Y, Drouet J (2013) Influence of Test Conditions on Comfort Ranking of Road Bicycle Wheels. *Conf Proc Soc Exp Mech Ser*
27. Champoux Y, Richard S, Drouet J- (2007) Bicycle structural dynamics. *Sound and Vib* 41:16-24

4.4 Faits saillants de l'article

- Le classement des roues ne dépend pas des techniques d'excitation utilisées dans l'article.
- Le contrôle de la position du cycliste (force appliquée au cintre, position des mains, angle des poignets) est essentiel à la répétabilité des essais.
- Le système vélo-cycliste est stochastique, il est donc impératif d'analyser les mesures de VIB avec une approche statistique.

4.5 Autorisation de publication

AUTORISATION D'INTÉGRATION D'UN ARTICLE ÉCRIT EN COLLABORATION À UN MÉMOIRE OU UNE THÈSE

Je (ou nous), soussigné(e)s, soussigné(s), co-auteur(e)s, co-auteur(s) de l'article intitulé :

Road Bike Comfort : On the Measurement of Vibration Induced to Cyclist

reconnais (reconnaissons) que ledit article sera inclus comme partie constituante du mémoire de la thèse

de l'étudiant(e) (nom) : Julien Lépine

inscrit(e) au programme de Génie mécanique

de la Faculté de Génie de l'Université de Sherbrooke

En foi de quoi, j'ai (nous avons) signé cet engagement en un nombre suffisant d'exemplaires*

Signature

Date : 2013-12-13

Nom Julien Lépine

Coordonnées Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique

Signature

Date : 13/12/2013

Nom Yvan Lampron

Coordonnées Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique

Signature

Date : 13 déc. 2013

Nom Jean-Marc Drouet

Coordonnées Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique

* Un exemplaire pour l'étudiante, l'étudiant, un exemplaire pour chaque personne signataire et un exemplaire pour le Service des bibliothèques (à remettre avec le mémoire ou la thèse au moment du dépôt final).

CHAPITRE 5 : PLAN D'EXPÉRIENCE

Les chapitres 3 et 4 ont décrit respectivement la méthode d'excitation et le protocole expérimental. Le contenu de ces chapitres permet de tracer un portrait plus précis des bonnes techniques à utiliser pour mesurer des VIB (vibrations induites au cycliste par la bicyclette). Il s'avère nécessaire de bien définir le plan d'expérience (organisation des essais) afin de déterminer avec justesse la contribution relative des composants de vélo sur la transmission de vibrations au cycliste.

Les composants de vélo inclus dans l'analyse des contributions sont d'abord définis dans la première section du chapitre. L'approche statistique utilisée pour déterminer ces contributions est ensuite présentée dans la seconde section. Ces deux éléments seront aussi abordés dans l'article présenté au chapitre 6, mais étant donné que les paramètres utilisés y sont seulement définis, l'auteur trouve important de les présenter plus en détail.

5.1 Composants inclus dans l'analyse des contributions

Pour déterminer la contribution relative des composants de vélo, il faut d'abord cibler les composants de vélo qui sont susceptibles d'avoir une influence majeure sur le niveau de VIB. Les composants de transmission et de freinage (engrenage, dérailleurs, freins, câbles...) sont éliminés de cette liste, car ils transmettent plutôt un effort du cycliste à la route. La selle est aussi éliminée, car elle est trop dépendante du confort statique, qui est différent d'un cycliste à l'autre. La même selle est donc utilisée pendant tous les essais. Des composants restants, cinq sont identifiées : les roues, le cadre, la fourche, la potence et le cintre (Figure 5-1). La tige de selle et les cocottes sont exclues de l'étude, car ils font office de capteurs de VIB. Une méthode de mesure de puissance absorbée par le cycliste par insertion d'un capteur entre le vélo et le cycliste récemment développée par VélUS permettrait maintenant d'inclure ces composants dans l'étude, mais elle n'était pas encore développée lors de la réalisation de ses essais. Le pédalier et les pédales quant à eux sont exclus, car selon la norme ISO 2631 [8], la sensation des vibrations par les pieds est quatre fois inférieure à celle de tout le corps.

Le composant « roues » inclut le pneu, la jante, les rayons et le moyeu. Les autres composants (le cadre, la fourche, la potence et le cintre) incluent seulement le composant portant son nom. La guidoline (ruban posé sur le cintre) n'est pas installée sur le cintre pour simplifier les essais et l'analyse.

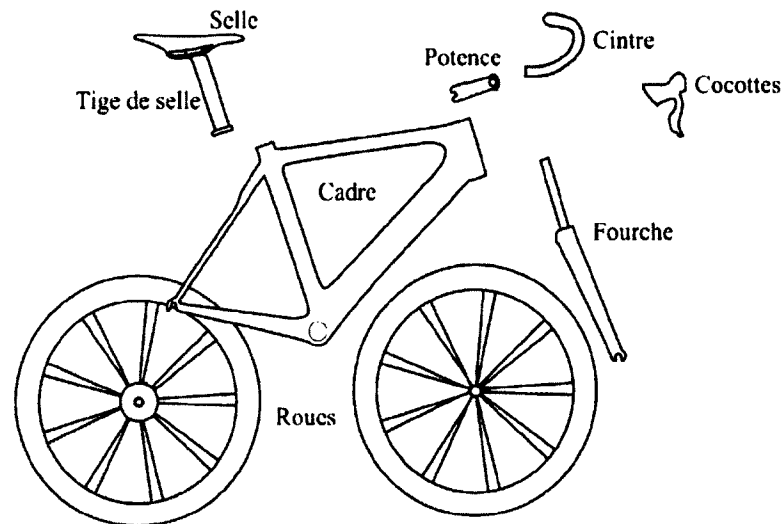


Figure 5-1 : Principaux composants d'un vélo de route transmettant des vibrations au cycliste

5.2 Approche statistique

L'objectif de ce chapitre est d'illustrer la démarche originale élaborée afin de déterminer la contribution relative des cinq composants de vélo définis précédemment. L'effet respectif de ces composants sur le niveau des VIB doit ainsi être déterminé.

Une approche relativement bien connue pour déterminer l'effet de plusieurs facteurs sur une variable est le plan d'expérience factoriel 2^k . Cette approche consiste à déterminer l'effet de k facteurs séparés en deux niveaux (deux conditions différentes) en testant toutes les 2^k combinaisons de facteurs possibles.

Le plan d'expérience factoriel est tout à fait approprié pour répondre à l'objectif du mémoire [32]. Les facteurs du plan d'expérience sont les cinq composants prédéfinis et ses variables sont les VIB aux mains et aux fesses du cycliste. En d'autres mots, les effets des cinq composants sur les VIB seront étudiés dans ce plan d'expérience.

Les étapes de mise en œuvre du plan d'expérience factoriel sont développées dans les sous-sections suivantes :

- 5.2.1. l'estimation de l'effet des facteurs;
- 5.2.2. la formation du modèle initial;
- 5.2.3. la réalisation des essais;
- 5.2.4. le raffinement du modèle;
- 5.2.5. l'analyse des résidus;
- 5.2.6. l'interprétation des résultats.

5.2.1 L'estimation de l'effet des facteurs

Cette étape préliminaire consiste à tester l'effet de chaque facteur sur la ou les variables à l'étude. Cela permet de définir les niveaux des facteurs, en d'autres mots si la variation du facteur a un effet positif ou négatif sur la variable.

Dans le cas présent, les composants de vélo sont les facteurs et les variables sont les VIB. Il existe autant de niveaux de ces facteurs qu'il existe de modèle d'un composant. Par exemple, tous les cadres de vélo du monde sont des niveaux du facteur-cadre.

Pour bien mettre en œuvre le plan d'analyse factoriel, il faut par contre sélectionner deux niveaux par facteur, soit un premier niveau (–), qui a un effet négatif sur les VIB, et un second niveau (+), qui a un effet positif sur les VIB¹. Il faut donc sélectionner deux modèles de chaque composant qui transmettent moins (–) et plus (+) de vibration au cycliste. Cette sélection doit aussi rester dans le domaine des pièces utilisées sur les vélos de route, car en y incluant un niveau trop différent de la réalité, l'analyse des résultats sera biaisée. L'exemple suivant illustre bien ce possible biais. Imaginons qu'une fourche à suspension de vélo de descentes (suspension très souple à très grand débattement) est sélectionnée comme niveau (–) et une fourche rigide comme niveau (+). La variation de VIB entre ces deux fourches serait si grande par rapport aux niveaux des cinq autres composants de vélo que la fourche deviendrait le composant avec le plus d'effet sur les VIB. Cependant, cela ne serait pas nécessairement le cas en réalité, car les cyclistes de route n'utilisent pas de fourche à suspension de vélo de descente.

Un premier effort de présélection des pièces de vélo est donc important pour choisir une gamme de composants utilisée par les cyclistes de route qui est la plus variée possible afin d'y inclure des pièces qui transmettent peu ou beaucoup de vibrations. Cette présélection se base donc sur l'expérience de l'auteur, ses collègues et les ingénieurs du partenaire ainsi que sur les évaluations de composants réalisés par des magazines spécialisés en cyclisme.

À partir de cette présélection, les deux niveaux de chaque facteur peuvent être définis. Pour ce faire, les VIB de tous les modèles d'un composant sont mesurées. Le modèle avec les plus faibles VIB devient le niveau (–) et celui avec les plus élevés devient le niveau (+). La méthode détaillée pour procéder à cette étape de mesure est présentée dans l'article du chapitre 6.

¹ Un effet positif sur les VIB veut dire que le niveau de vibrations augmente, l'effet n'est donc pas positif dans le sens du confort du cycliste

L'étape d'estimation de l'effet des facteurs permet aussi d'ajuster l'ordre du plan d'expérience factoriel. Si un facteur a un effet négligeable par rapport aux autres facteurs, il peut ainsi être exclu de l'expérience. Cela simplifie la mise en œuvre de l'expérience en réduisant le nombre d'essais nécessaire à sa réalisation. Par exemple, les résultats présentés dans l'article du chapitre 6 montrent que la puissance peut être exclue de l'analyse, car aucune différence significative en ce qui concerne les VIB n'a été mesurée entre les puissances testées.

5.2.2 La formation du modèle initial

Après l'étape de l'estimation de l'effet des facteurs, le modèle initial peut être défini. Il s'agit donc d'établir le plan d'expérience factoriel qui répond aux besoins et exigences définis à l'étape précédente. Il existe plusieurs types de plan factoriel : le 2^k complet, le 2^k complet à échantillonnage multiple, le 2^k fractionné et le 2^k confondu en blocs. Les principes généraux de chacun d'eux sont les mêmes. Ces derniers sont présentés à la subdivision (i).

Le plan le mieux adapté à cette recherche est le 2^k confondu en blocs, car il permet de réaliser les essais en plusieurs blocs (session de mesure) tout en sacrifiant un minimum d'informations. Les particularités de ce plan factoriel sont présentées à la subdivision (ii).

(i) Généralité sur les plans factoriels

Un plan d'expérience factoriel consiste à déterminer les effets des k facteurs en testant les 2^k combinaisons possibles de ces facteurs. En testant toutes les combinaisons des facteurs, il est aussi possible d'évaluer l'effet de toutes leurs interactions, c'est-à-dire qu'il permet d'évaluer si l'interaction entre des facteurs a un effet croisé.

Pour comprendre ce qu'est un effet croisé, imaginons qu'un expérimentateur veut déterminer l'effet de la grandeur du cycliste et du vélo sur la vitesse maximale du cycliste en sprint. Le petit cycliste aurait une plus grande vitesse avec le petit vélo que le grand cycliste avec le petit vélo, mais le grand cycliste aurait une plus grande vitesse avec le grand vélo que le petit cycliste avec le grand vélo. Il y a donc un effet croisé qui est plus important que l'effet direct des facteurs.

(ii) Particularité sur le plan factoriel 2^k confondu en blocs

Le plan d'expérience factoriel 2^k confondu en blocs est le meilleur compromis lorsque plusieurs facteurs sont évalués et que les essais sont longs à réaliser. Il permet d'évaluer les interactions entre les facteurs et de réaliser les essais en plusieurs blocs. Les interactions considérées par ce plan factoriel dépendent directement du nombre d'essais de blocs réalisés.

Prenons l'exemple d'un 2^3 où il est impossible de réaliser plus de 4 essais de suite. Ce dernier pourrait être fractionné en 2 blocs de 4 essais. Par contre, ces deux blocs ne peuvent pas être directement comparés, car les paramètres d'essais pourraient avoir varié entre les essais (exemple : la calibration d'un appareil, température du laboratoire, le bruit électromagnétique...) et biaiser les données d'un des blocs. Cela est communément appelé l'effet du bloc ou l'effet du temps. Dans le plan d'expérience confondu en blocs, aucune combinaison de facteurs n'est répétée dans les blocs, cet effet est donc confondu avec l'effet d'un facteur ou d'une interaction.

Il est possible de répéter les combinaisons pour éviter de confondre des effets des facteurs et de leurs interactions avec l'effet de blocs. Le 2^3 par exemple pourrait être réalisé en 4 blocs de 4 essais et faire en sorte que chaque bloc soit confondu avec une interaction différente. L'effet de l'interaction confondu par un bloc serait évalué en combinant les 3 autres blocs.

Deux inconvénients sont associés à ce type de plan. Le premier est que le nombre d'essais nécessaire à sa réalisation devient très grand à mesure que le nombre de facteurs augmente. Le second est que les combinaisons de facteurs ne sont jamais répétées. Dans le cas d'une expérience très bruitée, avec une incertitude de mesure élevée, il peut donc arriver que la puissance statistique du plan soit insuffisante pour discriminer l'effet des facteurs.

5.2.3 La réalisation des essais

Cette étape est la plus simple à décrire, mais la plus longue à exécuter. Il suffit ici de réaliser les essais dans l'ordre défini dans le plan d'expérience. Cette étape est critique à la réussite de l'analyse, car il est très difficile de traiter les résultats plus ou moins erronés d'une expérimentation bâclée, comme le dit l'expression suivante : *déchets à l'entrée, déchets à la sortie*. Le mot d'ordre est donc la constance dans la réalisation des essais pour réduire l'erreur sur la mesure et l'ajout de biais par la variation des paramètres d'essais.

5.2.4 Le raffinement du modèle

Une fois toutes les données d'essais comptabilisées, l'analyse préliminaire des résultats est réalisée. Cette analyse ressemble beaucoup à une analyse de variance (ANOVA). Plusieurs logiciels font très bien ce genre d'analyse comme ProcessMA², le complément Excel qui a été utilisé pendant cette maîtrise.

² ProcessMA, Process Excellence © 2006-2009, www.processma.com

Cette analyse préliminaire calcule le niveau de signifiante de l'effet de chaque facteur et interaction. Il se peut que dans une expérimentation très bruitée par exemple que ces niveaux de signifiante soient supérieurs au seuil établi par l'analyste (typiquement 0.05). Cela voudrait dire qu'aucun facteur n'aurait d'effet significatif, car le niveau de signifiante détermine la probabilité que les différences mesurées soient causées par le hasard (l'incertitude de mesure). Si ce niveau est 0.40, cela voudrait dire par exemple qu'il y a 40 % de probabilité que l'effet mesuré soit dû au hasard, ce qui est considérable.

Il y a une technique qui dans certains cas peut réduire les niveaux de signifiante. Cela consiste à faire une meilleure approximation de l'erreur en augmentant son nombre de degrés de liberté. Ces degrés de liberté sont le nombre d'essais redondants, qui permet d'estimer l'erreur. Prenons l'exemple de la comparaison de a niveaux d'un facteur donné. La mesure obtenue est décrite par le modèle suivant :

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad (2.4)$$

où y_{ij} est la valeur mesurée à la j^{e} répétition du i^{e} niveau du facteur, μ est la valeur à l'origine, τ_i l'effet moyen du i^{e} niveau du facteur et ε_{ij} la variable statistique³ de l'erreur de mesure associée à la ij^{e} observation. Selon ce modèle, il serait impossible de déterminer l'erreur de mesure ε si les niveaux ne sont pas répétés, car cela équivaldrait à mesurer un modèle déterministe (sans variable aléatoire). Suivant cette logique plus le nombre de répétitions j augmente, plus le nombre de degrés de liberté de ε augmente. Le nombre de degrés de liberté ddl_{ε} se calcule en soustrayant le nombre total d'essais N avec le nombre de niveaux (facteurs) a :

$$ddl_{\varepsilon} = N - a \quad (2.5)$$

Le niveau de signifiante de l'analyse est dépendant de ce nombre de degrés de liberté. En supposant que la variable statistique de l'erreur est normale et que sa moyenne est nulle, elle n'a plus d'effet sur les valeurs moyennes du modèle (2.4) lorsque les nombres d'essais sont très grands. Le niveau de signifiante devient donc seulement dépendant de la variable statistique τ , soit l'effet du facteur.

Dans le cas d'un plan d'expérience factoriel 2^3 de facteurs A, B et C, le modèle statistique utilisé dans l'analyse des données est :

$$y_i = \beta_0 + \beta_A x_{Ai} + \beta_B x_{Bi} + \beta_C x_{Ci} + \beta_{AB} x_{Ai} x_{Bi} + \beta_{BC} x_{Bi} x_{Ci} + \beta_{AC} x_{Ai} x_{Ci} + \beta_{ABC} x_{Ai} x_{Bi} x_{Ci} + \varepsilon_i \quad (2.6)$$

³ Une variable statistique est une distribution aléatoire. Dans le cas d'une distribution normale, elle peut être définie par une moyenne et un écart type.

Où y_i est la valeur mesurée au i^{e} essai, β est l'effet de chaque facteur et interaction (β_0 est la valeur à l'origine), x_i le niveau de chaque facteur au i^{e} essai (d'une valeur de ± 1) et ε_i est l'erreur associée au i^{e} essai.

Pour augmenter le nombre de degrés de liberté de l'erreur, certaines interactions β peuvent être exclues du modèle pour être volontairement confondues avec l'erreur ε . On choisit ici les interactions qui ont eu le moins d'effets dans l'analyse préliminaire, car ce sont elles qui sont les plus susceptibles de ne pas être réelles. C'est-à-dire que leurs effets proviennent uniquement du hasard, donc de l'erreur. Il est alors justifié de les inclure dans le calcul de l'erreur. Dans l'étude des contributions relatives des composants de vélo exemple, les interactions supérieures aux interactions doubles ont été exclues du modèle statistique.

5.2.5 Analyse des résidus

Cette étape est la plus importante, car c'est elle qui valide l'hypothèse de normalité sur laquelle se base le plan d'expérience factoriel. La distribution normale des données est impérative à la validité de l'analyse et sans cela elle ne vaut absolument rien et mène à de fausses conclusions. Heureusement, la majorité des phénomènes aléatoires sont normaux. L'hypothèse de normalité est donc fréquemment valable, et à l'inverse, la non-normalité s'explique plus souvent par des problèmes de méthodologies et métrologies que par des phénomènes particuliers.

Plusieurs techniques peuvent être utilisées pour valider la normalité et celle proposée par Montgomery [32] est l'analyse des résidus. Le résidu est l'écart de la valeur mesurée selon la valeur prédite par un modèle statistique :

$$e_i = y_i - \hat{y}_i \quad (2.7)$$

Où e_i est le résidu du i^{e} essai, y_i est la valeur mesurée au i^{e} essai et \hat{y}_i est la valeur prédite par le modèle statistique au i^{e} essai calculé de la façon suivante :

$$\hat{y}_i = \mu + \tau_i \quad (2.8)$$

Lorsque les résidus ont une distribution normale, cela veut dire que le phénomène observé est également normal. Il n'y a par contre pas de règles claires qui définissent le niveau de normalité acceptable. L'hypothèse de normalité est donc validée par le jugement du statisticien. Pour l'aider dans sa prise de décision, le graphique à échelle normale est fort utile. Il consiste à tracer tous les résidus en ordre croissant par rapport à leur valeur sur un graphique avec l'axe vertical normalement espacée. Si les résidus forment une ligne droite, leur répartition peut être définie comme normale, comme pour les

mesures de puissance à la cocotte droite lors de la réalisation du plan factorielle (Figure 5-2). Par contre, si les résidus forment une courbe, ils ne sont pas normalement répartis (Figure 5-3).

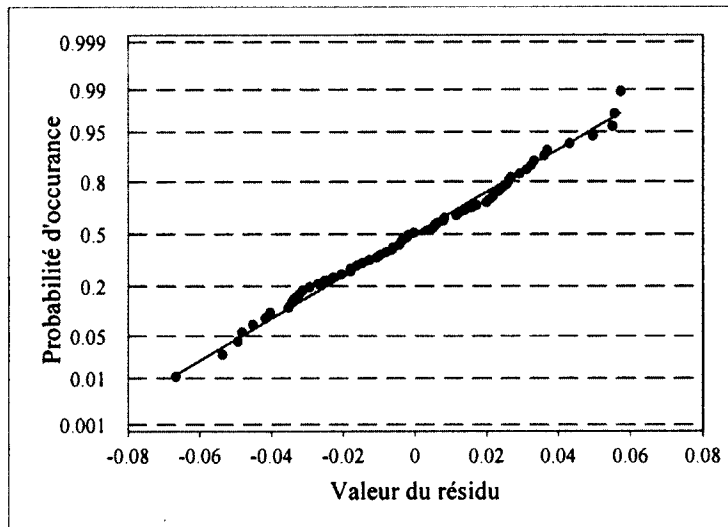


Figure 5-2 : Graphique à échelle normale des résidus provenant des mesures de puissance à la cocotte droite du plan factoriel, cette distribution est normale

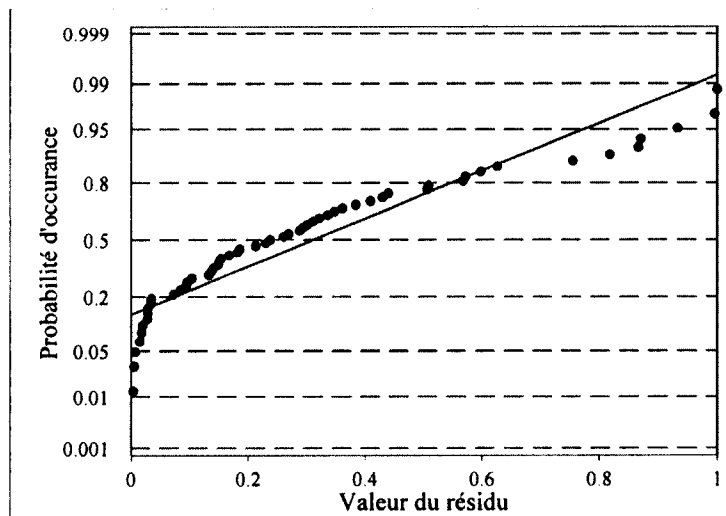


Figure 5-3 : Graphique à échelle normale de résidus provenant d'une distribution quelconque

L'analyse des résidus permet aussi de vérifier si le temps a eu un effet sur l'expérience. Pour ce faire, il suffit de tracer les résidus en ordre d'échantillonnage et de s'assurer qu'il n'y a pas tendance dans leur répartition comme dans le cas des mesures de puissance absorbée par le cycliste à la cocotte droite du plan factoriel (Figure 5-4). À l'opposé, la figure 5-5 montre un exemple de la répartition des résidus d'une expérimentation perturbée par le temps, car les valeurs des résidus augmentent avec l'ordre d'échantillonnage.



Figure 5-4 : Répartition chronologique des résidus provenant des mesures de puissance absorbée par le cycliste à la cocotte droite du plan factoriel

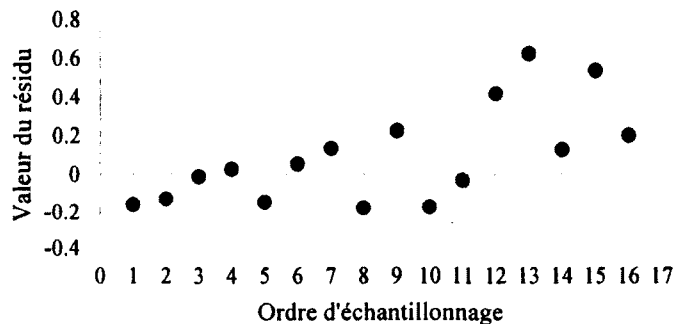


Figure 5-5 : Répartition chronologique des résidus d'une expérimentation perturbée par le temps

Les résidus doivent aussi être indépendants des valeurs prédites par le modèle d'analyse, car le modèle le suppose ainsi. Pour le vérifier, aucune tendance ne doit être décelée dans le graphique présentant les résidus en fonction des valeurs prédites comme dans le cas des mesures de puissance absorbée par le cycliste à la cocotte droite du plan factoriel (Figure 5-6). À l'opposé, la figure 5-7 présente un exemple d'une expérimentation où l'erreur de mesure est multiplicative, la répartition des résidus est donc proportionnelle aux valeurs prédites.

Un essai présentant des résidus dépendants du temps ou de la valeur prédite ne pourrait pas être analysé avec les méthodes statistiques standards. Il est donc fortement suggéré de trouver la cause de cette dépendance et de recommencer l'essai.

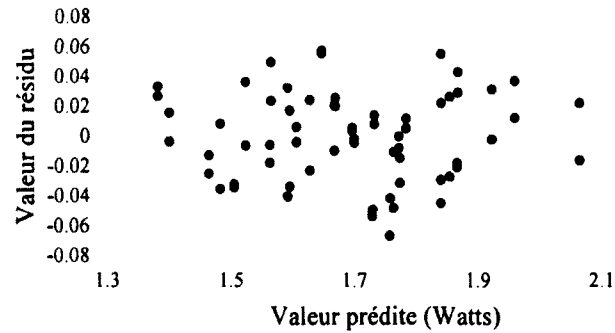


Figure 5-6 : Répartition des résidus en fonction des valeurs prédites des mesures de puissance absorbée par le cycliste à la cocotte droite du plan factoriel

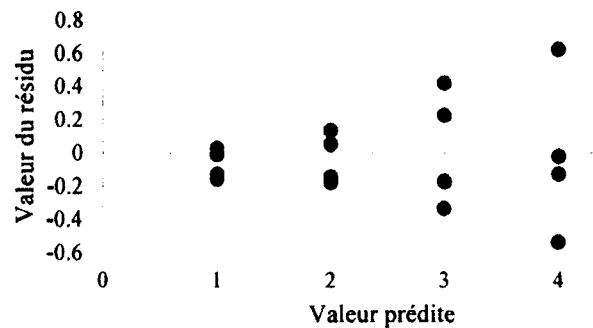


Figure 5-7 : Répartition des résidus en fonction des valeurs prédites d'une expérience où l'erreur est multiplicative

5.2.6 Interprétation des résultats

Même lorsque l'analyse des résultats relève un problème avec les résidus, l'interprétation des résultats à lieu, à la différence près que l'interprétation sert dans ce cas à comprendre d'où vient le problème. Il faut ensuite le corriger et refaire le plan d'expérience de façon à ce que les résidus soient normalement distribués et indépendants.

Dans le cas « normal », les résultats peuvent être utilisés pour déterminer l'effet relatif des facteurs et leurs interactions. Un outil utile à cette interprétation est le diagramme de Pareto (Figure 5-8), qui peut être généré par des logiciels d'analyse statistique comme ProcessMA. Dans le diagramme présenté à la figure 5-8, l'ordonnée de gauche présente l'effet des composants de vélo et leurs interactions sur la puissance absorbée à la cocotte droite. Un facteur (composant) ou une interaction a un effet significatif lorsque sa valeur est supérieure au seuil de signifiante, qui lui est déterminé à partir de l'estimation de l'erreur et du niveau de signifiante voulu (typiquement 0.05).

Sur l'ordonnée de droite, il y a la somme cumulative en pourcentage. Cette somme présente le pourcentage du modèle qui peut être expliqué par les x premiers facteurs et interactions. Par exemple à la figure 5-8, 81 % du modèle peut être expliqué par l'effet du cintre, de la fourche, des roues et du cadre.

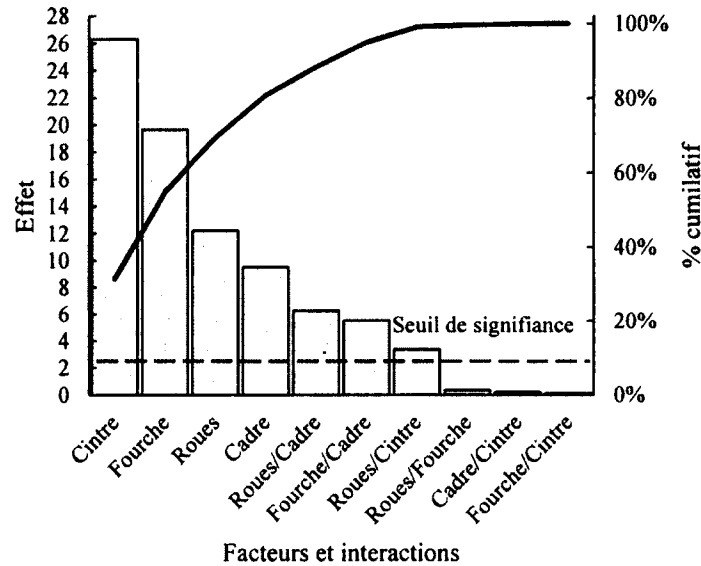


Figure 5-8 : Diagramme de Pareto des mesures de puissance absorbée par le cycliste à la cocotte droite du plan factoriel

CHAPITRE 6 : RÉSULTATS

L'article présenté dans ce chapitre décrit la contribution relative des composants de vélo de route sur la vibration transmise au cycliste. C'est donc l'article qui répond à la question de recherche de ce mémoire.

Auteurs et affiliation :

Julien Lépine : étudiant à la maîtrise, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique

Yvan Champoux, professeur, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique

Jean-Marc Drouet, professeur, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique

Date de soumission :

Revue : Sports Engineering

Titre en français : Contribution relative des composants de vélo de route sur la vibration transmise au cycliste

6.1 Contribution au mémoire

Cet article est l'élément clé du mémoire, car il répond à la question de recherche. Basé sur les éléments élaborés dans le chapitre 5 sur le plan d'expérience, il présente d'abord le plan d'expérience factoriel qui permet la détermination de la contribution relative des composants de vélo de route sur les VIB. La technique utilisée pour choisir les composants inclus dans le plan d'expérience est aussi abordée.

Le mesurande en puissance est aussi présenté dans l'article. Il n'est pas question de ce mesurande dans les articles du chapitre 3 et 4 pour une question chronologique. La mesure de puissance demande un certain savoir-faire et l'utilisation de capteurs qui n'étaient pas encore développés lors de la rédaction de ces précédents articles. Le développement de ces capteurs s'est fait par des membres du groupe de recherche VÉIUS pendant les activités de maîtrise de l'auteur. Cela a permis de mesurer la puissance absorbée aux fesses avec une tige de selle instrumentée. Une potence et des cocottes instrumentées ont aussi permis de mesurer la puissance absorbée aux mains du cycliste. Des articles

et des actes de conférence paraîtront bientôt sur les aspects du savoir-faire sur la mesure de puissance et sur les capteurs de force essentiels à cette mesure.

6.2 Résumé en français

Le cyclisme de route est un sport où la performance de l'équipement a un impact majeur sur la performance et l'appréciation du cycliste. Un des critères de performance du vélo réduisant la performance est le confort dynamique, exprimé dans cet article comme la capacité à réduire le niveau de VIB. Plusieurs chercheurs ont étudié cette capacité en développant des techniques de mesure des VIB. D'autres ont aussi étudié le comportement dynamique de différents composants de vélo de route comme les roues et le cadre.

À la connaissance de l'auteur, personne ne s'était intéressé à la contribution relative de ses composants sur les VIB afin de connaître le potentiel de réduction de chacune d'elle. Cet article propose d'utiliser un plan d'expérience factoriel pour connaître la contribution relative des roues, du cadre, de la fourche, de la potence et du cintre sur le niveau de vibration transmise aux mains et aux fesses d'un cycliste. Cette détermination se base sur trois mesurandes : l'accélération, la force et la puissance absorbée. Les résultats montrent que les composants prépondérants aux mains sont le cintre et la fourche. Aux fesses, ce sont plutôt le cadre et les roues qui ont le plus d'effet sur le niveau de VIB.

6.3 Article 3

The Relative Contribution of Road Bicycle Components on Vibration Induced to the Cyclist

ABSTRACT

Improving comfort in road bicycle design is a paramount concern for cyclists, who are affected by the vibrations caused by constant contact with the road surface. The cycling community has deployed many efforts in the attempt to understand and improve bicycle comfort. However, these attempts have been focused on specific components such as the fork, frame and wheels without knowing their relative influence on vibration induced to the bicyclist (VIB). The objective of this paper is to assess the relative contribution of bicycle components on the VIB at the cyclist's hands and buttocks. A factorial design test comparing the VIB in acceleration, force and power of different bicycle components has already shown that the handlebar and fork are the preponderant components for the VIB measured at the cyclist's hands. At the buttocks, the preponderant components are the wheels and frame.

Keywords: Bicycle Dynamic Comfort, Bicycle Testing, Factorial Design, Vibration Measurement.

1. INTRODUCTION

Road cycling is a sport in which equipment design has a major impact on the cyclist's overall performance and experience. As this sport has progressed over the years, most of improvements in bicycle design have been focused on reducing the bicycle's mass and aerodynamic drag, and on increasing stiffness. More recently however, the ride quality of road bicycles has become a more desirable characteristic for users as well as an important design issue for bicycle manufacturers. If we want the cyclist to "fit" properly on the bicycle, then we need to consider that the quality of the ride is most closely related to the level of vibration transmitted from the road to the cyclist via the various components of the bike.

In the process of increasing the quality of the ride and improving cyclist comfort, the assessment of the vibrations induced to the bicyclist (VIB) is an essential step and an active research topic in sports engineering. This research topic is divided into three parts: (1) developing force transducers, (2) developing excitation techniques, and (3) investigating the characteristics of a bicycle that reduce the VIB.

An important part of research on VIB is the development of bicycle force transducers such as instrumented pedals, stems and seat posts. These transducers measure loads at the contact interface between the cyclist and the bicycle¹⁻⁶. They also enable us to assess a metric to quantify VIB with the ultimate goal of reducing it. Richard et al.⁷ used force and energy transmitted to the cyclist measured by an instrumented stem to investigate comfort. Vanwallenghem et al.⁸ also used an instrumented handlebar and seat post to measure the absorbed power as a metric for cyclist comfort.

Embedded force transducers and accelerometers have been incorporated on instrumented bicycles to measure VIB with different excitation techniques. The most common excitation technique for a bicycle is to ride on a road⁸⁻¹². The VIB has also been measured using different excitation techniques in the controlled environment of the laboratory. Hastings et al.¹³ compared the VIB among three bicycle frames mounted by a cyclist on a treadmill. Thite et al.¹⁴ compared the VIB between two different mountain bike frames and a dummy cyclist excited by a shaker. Lépine et al.¹⁵ developed a test rig that mimics the road excitation in a laboratory in order to compare the VIB between different bicycles. Bicycle component vibration transmissibilities were also compared using an incomplete bicycle assembly. For example, wheel transmissibility was studied via different test rigs; one developed by Petrone et al.¹⁶ and the other developed by Lépine et al.¹⁷.

Force transducers and excitation techniques allowed some research on the bicycle's characteristics that could reduce VIB. The fork and frame structural damping effect on bicycle vibrational behaviour and VIB were studied^{14,18,19}. The modal proprieties and mode shapes of bicycles were also studied in order to provide a better understanding of bicycle dynamic response to improve comfort^{20,21}. The relationship between VIB and wheel set characteristics such as tire pressure, number of spokes, rim material, radial stiffness, etc. has also been studied and discussed in the literature^{10,11,16,17,22}.

Several attempts have thus been made to understand the effect of a bicycle's characteristics on vibrational behaviour and to ultimately increase cyclist comfort. However, these studies have been focused on specific components such as the fork, frame and wheels without knowing their relative influence on VIB on a fully assembled bicycle. The objective of this paper is to assess the relative contribution of bicycle components on the VIB at the cyclist's hands and buttocks. This will draw the cycling community's attention to the VIB preponderant components during the selection and assembly of components in order to design more comfortable bicycles.

2. METHODOLOGY

The relative contribution of road bicycle components on VIB is determined via a factorial design experiment. This factorial design investigates the effect of all possible combinations of the factor levels on the VIB. In this case, the factors represent the bicycle component categories and are separated into two levels: the lowest (–) and the highest (+) vibration transmitting component. In other words, the bicycle assembly is divided into 5 factors (bicycle component categories): wheels, fork, frame, stem and handlebar. As well, each factor has two different levels (component selection): the components with the lowest (–) and the highest (+) VIB level. The seat post and the brake hood are used as transducers; consequently they were not included in these factors. The method used to measure and compare VIBs between component categories is presented in part (a) of this paper. Part (b) presents how the factor levels are selected to finally perform the factorial design experiments used to quantify the relative contribution of road bicycle component categories on VIB detailed in part (c).

a) VIB measurement method

In this paper, VIBs are measured on a bicycle in the controlled environment of the laboratory. The bicycle is vertically excited by a road simulator composed of two hydraulic shakers positioned under the wheels (Fig. 1). These shakers reproduce a 30 second excitation simulation of a bicycle at 26 km/h on a granular road as described by Lépine et al.¹⁵. A cyclist is seated on the bicycle during the measurement. The cyclist's position is controlled by the static force applied by the hands on the handlebar. The hands are resting (not grasping) on the brake hoods and the pedals are set at a horizontal position.

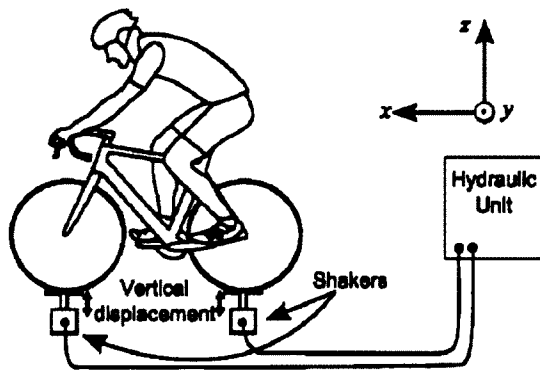


Fig. 1 Bicycle excitation setup: the road simulator

VIBs are measured at three different cyclist contact points on the bicycle depending on the test performed: (1) the vertical force and acceleration transmitted via the saddle and to the cyclist's buttocks is measured with a strain gauge instrumented seat post and a PCB 352C65 accelerometer (Fig. 2); (2) the force and the acceleration transmitted via the handlebars to the cyclist's hands is measured with a strain gauge instrumented stem and a PCB 352C68 accelerometer (Fig. 3); (3) the force and the acceleration transmitted to the cyclist's hands is measured with a strain gauge instrumented brake hood and a PCB 352C68 accelerometer under the hands (Fig. 4).

Using instrumented bicycle components, three measurands are used to quantify the level of VIB: (1) the acceleration a_{VIB} , (2) the force F_{VIB} and (3) the absorbed power P_{VIB} . Seat post a_{VIB} and F_{VIB} are calculated using the RMS value of the transducer signal filtered with the 2631 ISO standard vertical frequency-weighting curves for whole body transmitted vibrations²³. The stem and brake hoods a_{VIB} and F_{VIB} are

calculated at all contact points with the combination of the force and velocity. The velocity is calculated from the integration of the accelerometer time signal.

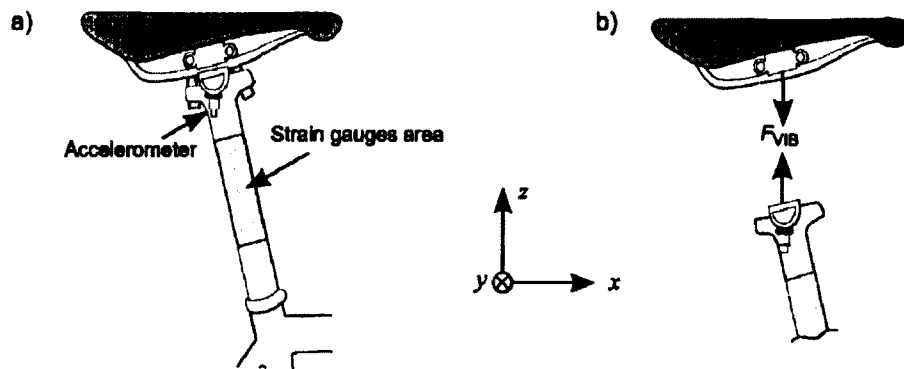


Fig. 2 Instrumented seat post: (a) transducers position; (b) applied position of the measured force

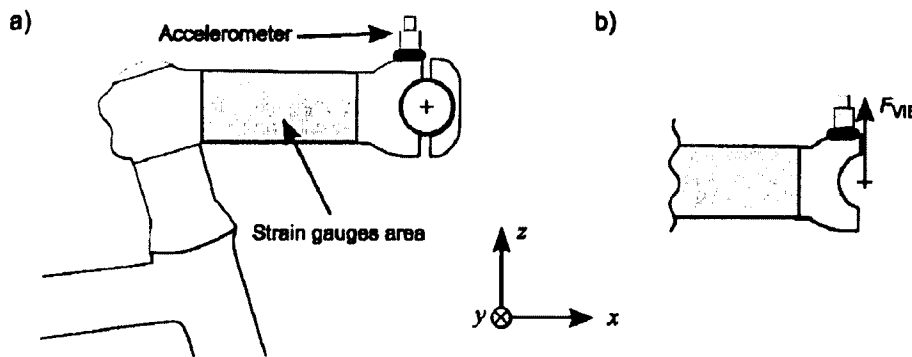


Fig. 3 Instrumented stem: (a) transducers position; (b) applied position of the measured force

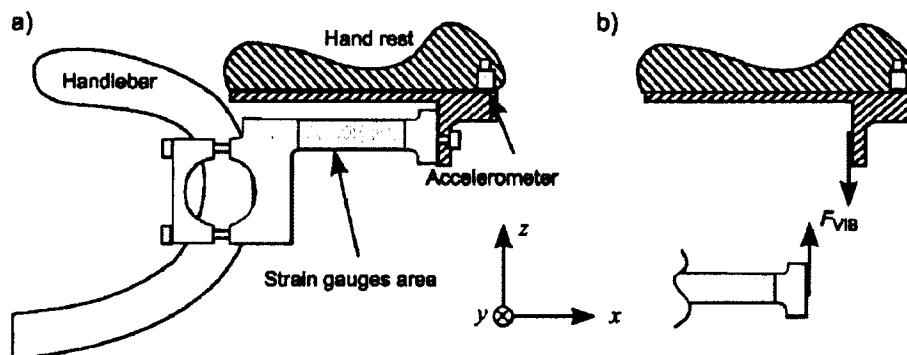


Fig. 4 Instrumented brake hood: (a) transducers position; (b) applied position of the measured force

b) Factor levels selection

To define the levels of each factor (bicycle component category) used in the factorial design, the VIB level of several components available on the market were compared and ranked. The ranking was done by swapping the component on the same bicycle and measuring the VIB variation in acceleration, force and power. The component with the highest VIB level will be the (+) in its respective category (factor) and vice versa. The list of components and the characteristics of each factor are presented in Table 1-6. The dimensions of the components were selected to keep the cyclist's position as constant as possible.

The wheel set transmission ranking was done by comparing the VIB variation between different front wheels (Table 1). Identical clincher or tubular tires were installed on the rim, i.e. Vittoria Rubino Pro Slick 700x23c with Vittoria inner tube for the clincher tire and Vittoria Corsa CX 21-28' for the tubular tire. The width is the axial length of the rim and the depth is the radial length of the rim. The total mass includes the wheel and the tire but not the skewer.

The Fulcrum 7 rear wheel was installed on the bicycle frame during every comparison. Each wheel was tested 5 times in a random order. The VIBs were measured in force, acceleration and power at the brake hoods for wheel rankings. The same cyclist, frame, fork, stem and handlebar were used for all tests. The tire pressure was set at 8 bars.

Only the front wheels were compared due to wheel set availability. Nevertheless, the factorial design includes both the front and the rear wheels as one factor. The hypothesis is that the front and rear wheel dynamic is similar; the lowest or highest transmitting front wheel should also be the lowest or highest transmitting rear wheel.

Table 1. Components tested for the wheel factor

Name	Tire type	Number of spokes	Spoke pattern	Spoke material	Rim material	Rim width (mm)	Rim depth (mm)	Total mass (g)
Fulcrum 7	Clincher	20	Radial	Steel	Aluminum	21.0	25.5	1160
Kinlin XR-200	Clincher	20	Radial	Steel	Aluminum	18.5	23.0	900
Campagnolo NeutronUltra	Clincher	22	Radial	Steel	Aluminum	20.9	19.0	990
Lightweight	Tubular	16	Radial	Carbon	Carbon	20.2	53.0	780
Campagnolo Victory Strada	Tubular	32	Cross	Steel	Aluminum	19.9	11.0	910
Zipp 404 Firecrest	Tubular	16	Radial	Steel	Carbon	24.0	58.0	850
Zipp 202	Tubular	20	Cross	Steel	Carbon	21.5	25.0	810

The fork transmission ranking was done by comparing the VIB variation at the brake hoods between different forks (Table 2). Each fork was tested 6 times in a random order. The same cyclist, frame, wheel set, stem and handlebar were used for all tests. The tire pressure was set at 8 bars.

Table 2. Components tested for the fork factor

Name	Steering column material	Blades and crown material	Total mass (g)
Easton EC90SL	Carbon	Carbon	360
Cervélo FK30 SL	Carbon	Carbon	340
Cervélo TT Wolf	Aluminum	Carbon/Aluminum	600
Look HSC 5 SL	Carbon	Carbon	320
Specialized Roubaix FACT	Carbon	Carbon	414

The frame transmission ranking was obtained by comparing the VIB variation at the brake hoods and the seat post using different frames (Table 3). The frame size is the size given by the frame manufacturer. The top

tube length is the horizontal distance between the head tube and top tube junction to the seat tube (or its prolongation). The total mass included the bottom bracket and the seat post clamp.

Each frame was tested 7 times in a random order. The VIBs were measured in force, acceleration and power at the stem and the seat post. The same cyclist, fork, wheel set, stem and handlebar were used for all tests. The tire pressure was set at 8 bars.

Table 3. Components tested for the frame factor

Name	Material	Size	Stem tube length (cm)	Total mass (g)
Masi Gran Criterium	Steel	56	56.5	2240
Focus Culebro	Aluminum	XL	56.0	1920
Merlin Agilis	Titan	M	55.5	1540
Specialized Comp Roubaix	Carbon	L	56.5	1340
Cervelo R3	Carbon	56	56.4	1070
Cervelo R5ca	Carbon	56	56.4	800

The stem transmission ranking was done by comparing the VIB variation at the brake hoods using different stems (Table 4). The stem length is the distance between the center of the fork and the handlebar attachment. The total mass includes all the stem's screws. Each stem was tested 6 times in a random order. The same cyclist, frame, fork, wheel set and handlebars were used for all tests. The tire pressure was set at 8 bars.

Table 4. Components tested for the stem factor

Name	Material	Length (mm)	Total mass (g)
3T ARX-PRO	Aluminum	110	132
3T ARX-LTD	Carbon	110	126
FSA OS-99 CSI	Aluminum wrapped with Carbon	110	141

The handlebar transmission ranking was done by comparing the VIB variation at the brake hoods between different handlebars (Table 5). The width is the overall dimension of the handlebar. Every handlebar was tested 5 times in a random order. The same cyclist, frame, fork, wheel set and stem were used during these tests. The tire pressure was set at 8 bars.

Table 5. Components tested for the handlebar factor

Name	Material	Width (cm)	Total mass (g)
3T Ergonova Pro	Aluminum	44	260
FSA K-Wing	Carbon	44	240
3T 4GXL	Aluminum	44	290
3T THE	Aluminum	44	340
3T Ergonova LTD	Carbon	44	190

c) Factorial design plan

Once the (–) and (+) levels of each factor (bicycle component) were defined, the factorial design was conducted. To assess the relative contribution of the bicycle components, the VIB level for each factor combination is measured. A sample combination is: wheels (–) with the fork (–), frame (+) and handlebar (–). Even though five factors were considered in the selection, only four are included in the factorial design:

wheels, fork, frame and handlebar. The stem is excluded from the factorial design because no significant difference was measured between the tested stems. This exclusion is explained in the factor selection results and analysis (presented in Section 3.a-b).

The factorial design used was a 2⁴ factorial performed in 4 blocks (measurement session) with 2 replicates completely randomized for a total of 32 combinations (Table 6-7). The experiment design is made of blocks of 8 combinations to ensure that testing can be performed in a relatively short timeframe (about 2 hours including assembly and disassembly). Dividing up the test in this way minimizes the tester’s level of fatigue, as well as any natural variations in dynamic behaviour and other time-dependent phenomena that could alter the measurements.

Two techniques are used to increase the degree of freedom of the analysis and therefore increase the statistical power: the combinations are replicated twice and only the main factor and two-factor interactions effect are included in the analysis²⁵.

Table 6. Replicate 1 of the 2⁴ factorial design in 4 blocks and 2 replicates combination matrix used to assess the relative contribution of bicycle components on VIB

Run Order	Replicate 1							
	Block 1				Block 2			
	Wheels	Fork	Frame	Handlebar	Wheels	Fork	Frame	Handlebar
1	(-)	(-)	(+)	(-)	(-)	(+)	(-)	(+)
2	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)
3	(+)	(-)	(-)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
4	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(-)
5	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(-)	(-)	(-)
6	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(-)	(+)
7	(-)	(+)	(-)	(-)	(-)	(-)	(+)	(+)
8	(-)	(-)	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)

Table 7. Replicate 2 of the 2⁴ factorial design in 4 blocks and 2 replicate combination matrix used to assess the relative contribution of bicycle components on VIB

Run Order	Replicate 2							
	Block 3				Block 4			
	Wheels	Fork	Frame	Handlebar	Wheels	Fork	Frame	Handlebar
1	(-)	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)
2	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(-)	(-)	(-)
3	(-)	(-)	(-)	(+)	(+)	(+)	(-)	(-)
4	(+)	(-)	(-)	(-)	(+)	(-)	(-)	(+)
5	(+)	(+)	(+)	(-)	(-)	(+)	(+)	(-)
6	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)
7	(-)	(+)	(+)	(+)	(-)	(-)	(+)	(+)
8	(-)	(+)	(-)	(-)	(-)	(+)	(-)	(+)

3. RESULTS AND ANALYSIS

The experimental results are separated in two parts. Part (a) presents the results from the factor level selection tests and these results are analysed in part (b). Part (c) presents the results of the factorial design based on the factor level selection made in part (b). The factorial design results are analysed in Part (d).

a) Factors levels selection results

The significant levels (p -value) of the three measurands are calculated by means of an ANOVA (analysis of variance) at the measurement points for each factor levels selection test (Table 8). When the p -value is below 0.05, a significant difference of VIB between the bicycle's components tested is concluded.

Table 8 p -value of the factor levels selection tests

Factor	Measurement point	p -value for a_{VIB}	p -value for f_{VIB}	p -value for P_{VIB}
Wheel	Left Brake Hood	0.164	0.115	0.000
	Right Brake Hood	0.208	0.084	0.000
Fork	Left Brake Hood	0.280	0.017	0.000
	Right Brake Hood	0.201	0.263	0.000
Frames	Stem	0.000	0.007	0.000
	Seat Post	0.000	0.016	0.003
Stem	Left Brake Hood	0.967	0.644	0.282
	Right Brake Hood	0.611	0.402	0.298
Handlebar	Left Brake Hood	0.115	0.001	0.000
	Right Brake Hood	0.038	0.000	0.000

The key results of Table 8 and Figures 5-10 are:

VIB comparison between the front wheels at the right and the left brake hoods (Fig. 5)

- A significant difference is measured for P_{VIB} at both measurement points.
- Wheel ranking is similar for both brake hoods.

VIB comparison between the forks at the right and left brake hoods (Fig. 6)

- A significant difference is measured for F_{VIB} and P_{VIB} at the left brake hood but at the right brake hood, a significant difference for only P_{VIB} is measured.
- Fork ranking is similar for both brake hoods.

VIB comparison between the frames at the stem and seat post (Fig. 7 and Fig. 8.)

- A significant difference is measured with all three measurands at both measurement points.

VIB comparison between the stems made at the right and the left brake hoods (Fig. 9)

- No significant difference is measured at either brake hoods.

VIB comparison between the handlebars made at the right and the left brake hood (Fig. 10)

- A significant difference is measured with all three measurands at both measurement points except for a_{VIB} measured at the left brake hood.

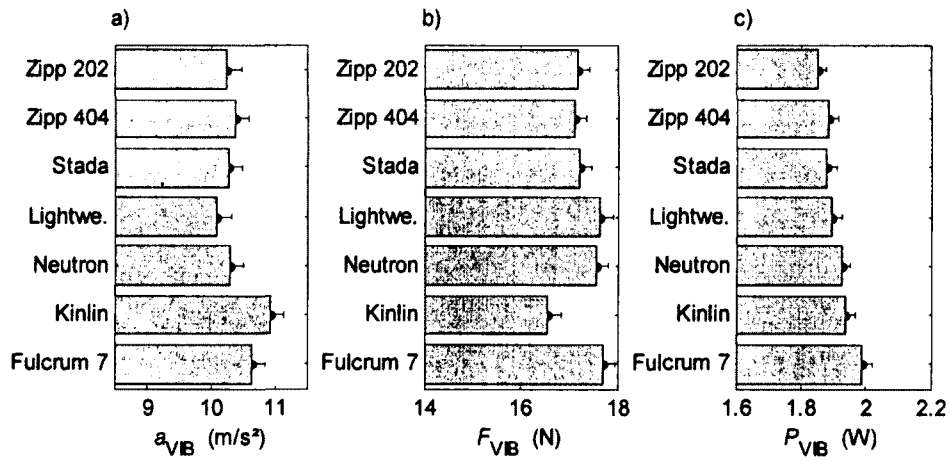


Fig. 5 Wheel VIB measurements at the right brake hood, uncertainty bars are at a confidence level of 95%

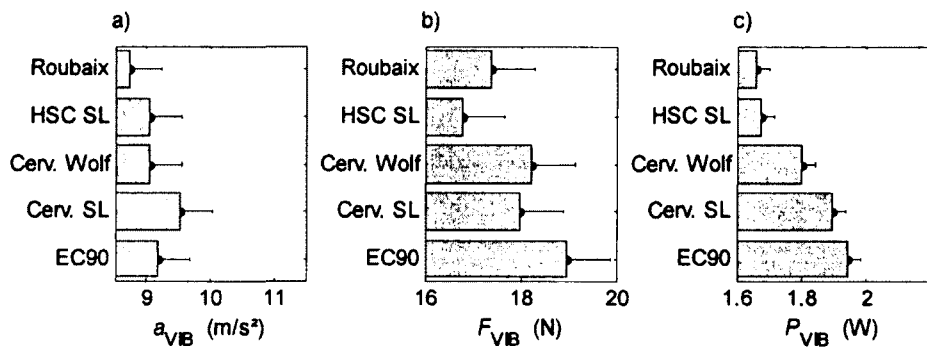


Fig. 6 Forks VIB measurements at the left brake hood, uncertainty bars are at a confidence level of 95%

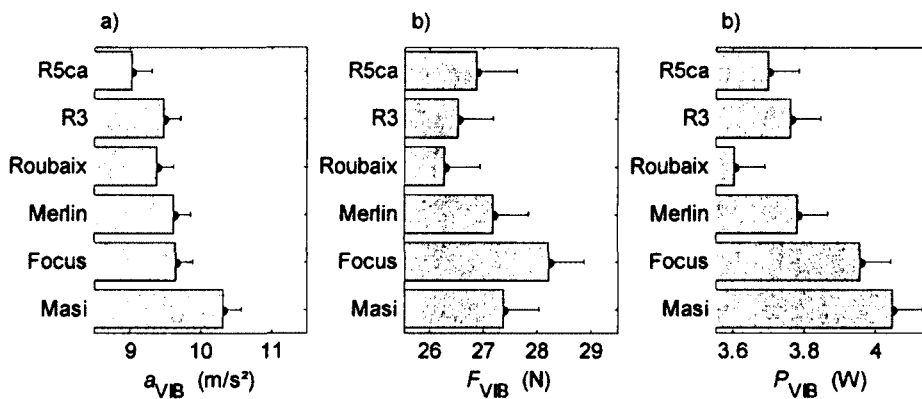


Fig. 7 Frames VIB measurements at the stem, uncertainty bars are at a confidence level of 95%

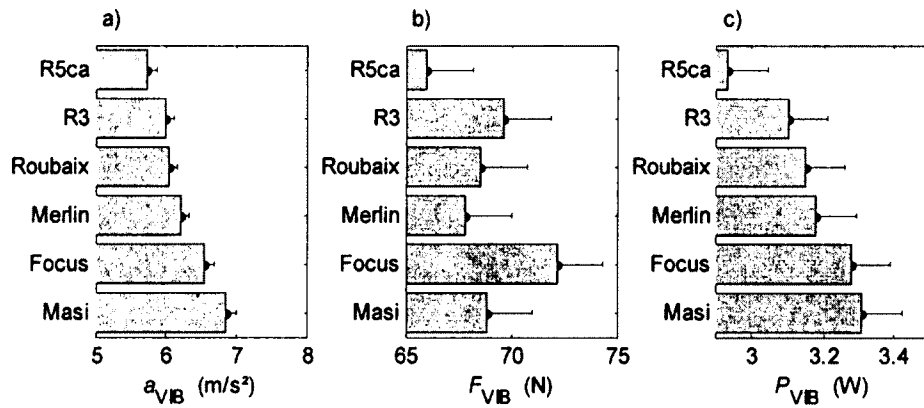


Fig. 8 Frame VIB measurements at the seat post, uncertainty bars are at a confidence level of 95%

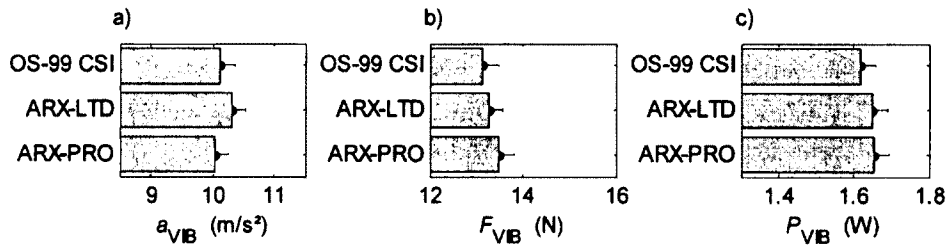


Fig. 9 Stem VIB measurement at the right brake hood, uncertainty bars are at a confidence level of 95%

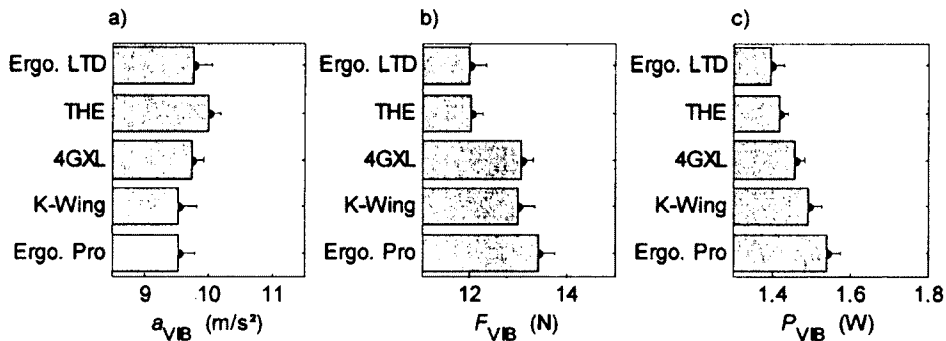


Fig. 10 Handlebar VIB measurements at the right brake hood, uncertainty bars are at a confidence level of 95%

b) Factors levels selection analysis and discussion

The objective of this section is to select the lowest and highest transmitting component for each factor. These selected components will be respectively the (–) and (+) level. The selection is summarised in Table 9.

The wheel level selection is based on P_{VIB} values because it is the only measurand that has a significant impact on both measurement points (Table 8). The lowest transmitting wheel is the Zipp 202 and the highest is the Fulcrum 7 (Fig. 5 c).

Like the wheel selection, the fork level selection is based on absorbed power P_{VIB} values because it is the only measurand that has a significant impact on both measurement points (Table 8). The lowest transmitting fork is the Specialized Roubaix Fact and the highest transmitting fork is the Easton EC90SL (Fig. 6 c).

The frame level selection is based on all three measurands and both measurement points because they all present significant differences (Table 8). As seen on Fig. 7 and Fig. 8, the Cervélo R5ca is the lowest transmitting frame at 4 measurands out of a total of 6 and the Masi Gran Criterium is the highest transmitting frame at 4 measurands out of a total of 6. These frames are therefore the (-) and (+) level for the frame factor.

No significant difference can be made between the tested stems (Table 8). The stem factor is therefore excluded from the factorial design.

The handlebar level selection is based on the measurands presenting a significant difference on both measurement points, i.e. a_{VIB} , F_{VIB} and P_{VIB} at the right brake hood and F_{VIB} and P_{VIB} at the left brake hood (Table 8). The 3T Ergonova LTD and the 3T Ergonova Pro are respectively the lowest and highest transmitting handlebars except for the a_{VIB} at the right brake hood. They will be respectively the (-) and (+) level for the handlebar factor.

The power absorbed by the cyclist (P_{VIB}) seems to be the most consistent measurand because it allows the lower p -value in the factor levels selection (Table 8). It is also the only measurand that presents the same result at the left and right brake hoods in the factorial design.

Table 9. Factors level selection

Factor	(-) level	(+) level
Wheels	Zipp 202	Fulcrum 7
Forks	Specialized Roubaix Fact	Easton EC90SL
Frame	Cervélo R5ca	Masi Gran Criterium
Stem	Excluded from the factorial analysis	
Handlebar	3T Ergonova LTD	3T Ergonova PRO

c) Factorial design results

The standardized effect of each factor (bicycle component) and component interaction are represented with Pareto charts for each measurand. In these charts it is also possible to assess the VIB variation percentage explained by the sum of the more influent components and their interaction. Discrepancies between the effect of the factors' ranking at the left and right brake hoods are explained by the asymmetric dynamic behaviour of the cyclist. These discrepancies are mainly seen on factors with a lower effect on the VIB.

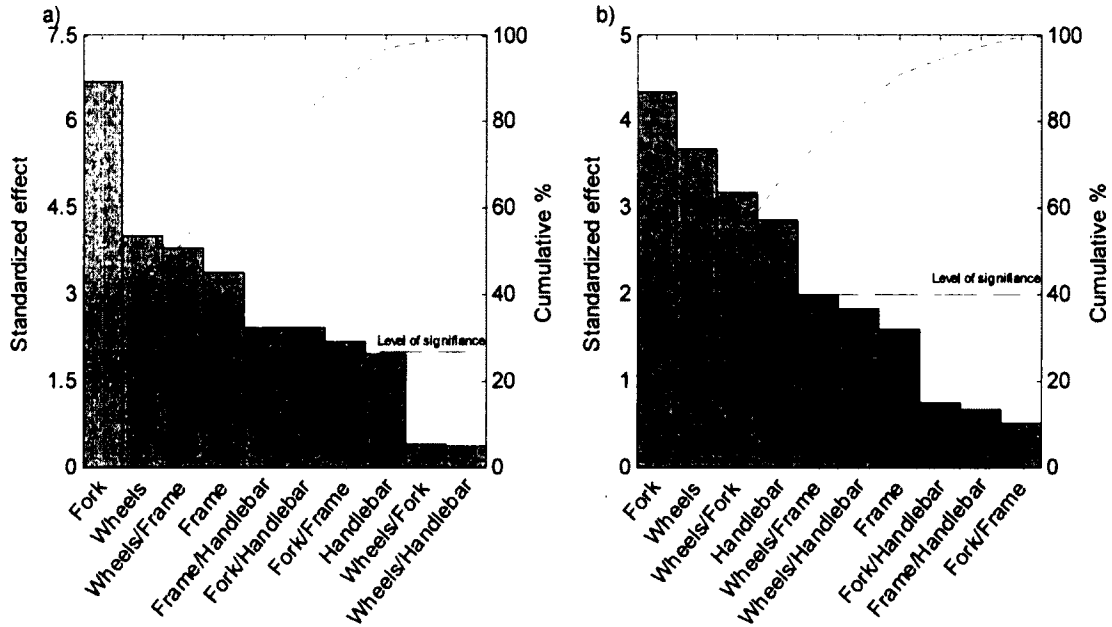


Fig. 11 Pareto Chart, standardized effects and cumulative effects of the bicycle components on v_{18} : a) at the left brake hood; b) at the right brake hood; the factors above the level of significance have a p -value below 0.05

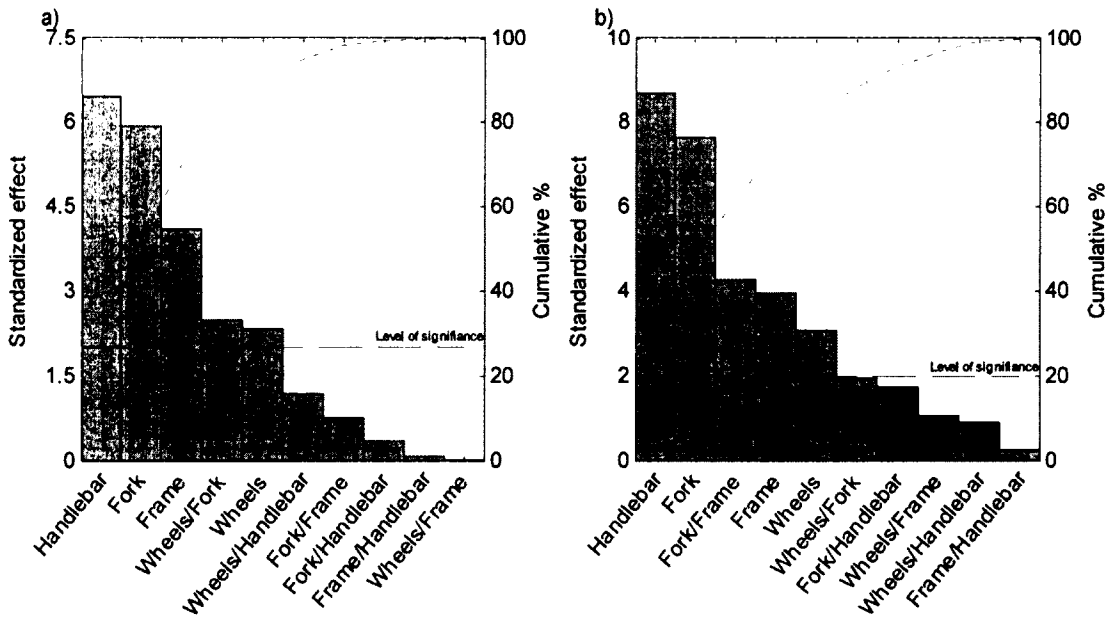


Fig. 12 Pareto Chart, standardized effects and cumulative effects of the bicycle components on FV_{18} : a) at the left brake hood; b) at the right brake hood; the factors above the level of significance have a p -value below 0.05

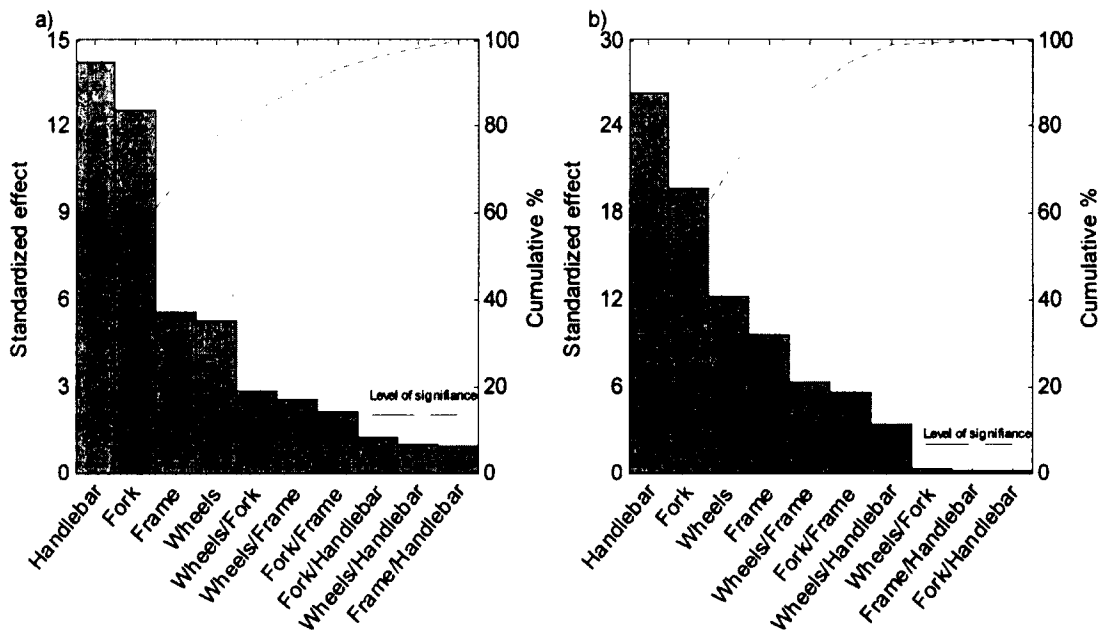


Fig. 13 Pareto Chart, standardized effects and cumulative effects of the bicycle components on P_{vib} : a) at the left brake hood; b) at the right brake hood; the factors above the level of significance have a p -value below 0.05

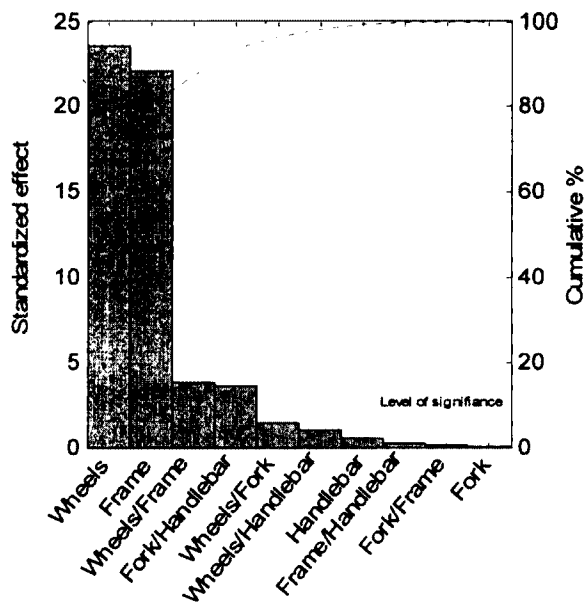


Fig. 14 Pareto Chart, standardized effects and cumulative effects of the bicycle components on a_{VIB} at the seat post; the factors above the level of significance have a p -value below 0.05

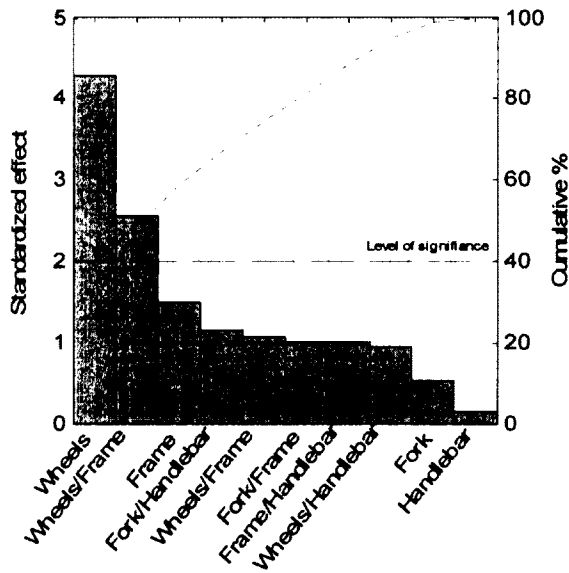


Fig. 15 Pareto Chart, standardized effects and cumulative effects of the bicycle components on FVIB at the seat post; the factors above the level of significance have a p-value below 0.05

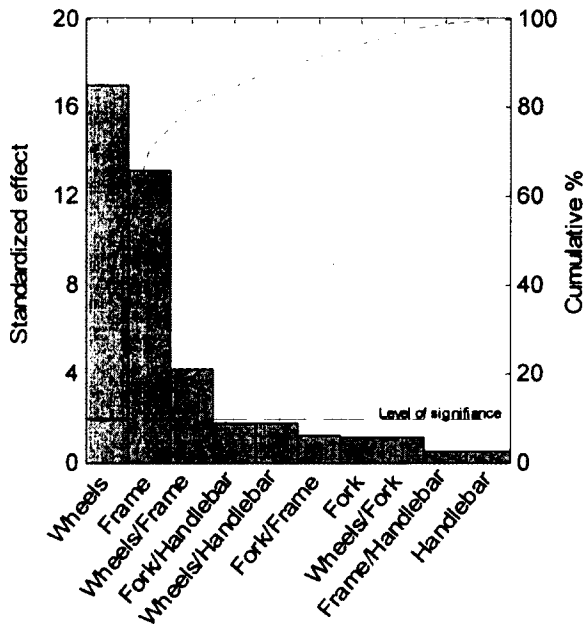


Fig. 16 Pareto Chart, standardized effects and cumulative effects of the bicycle components on PVIB at the seat post; the factors above the level of significance have a p-value below 0.05

Table 10. Component ranking contribution explaining at least 80 % of the VIB variations at 5 % significance for each measurement point

Measurement point	a_{VIB}			F_{VIB}			P_{VIB}		
	Factor	Contribution %	p-value	Factor	Contribution %	p-value	Factor	Contribution %	p-value
Left Brake Hood	Fork	24	0.000	Handlebar	27	0.000	Handlebar	29	0.000
	Wheels	39	0.000	Fork	52	0.000	Fork	55	0.000
	Wheels/Frame	52	0.000	Frame	70	0.000	Frame	67	0.000
	Frame	65	0.001	Wheels/Fork	80	0.016	Wheels	78	0.000
	Frame/Handlebar	73	0.019				Wheels/Fork	83	0.006
	Fork/Handlebar	82	0.019						
Right Brake Hood	Fork	20	0.000	Handlebar	26	0.000	Handlebar	31	0.000
	Wheels	37	0.001	Fork	49	0.000	Fork	55	0.000
	Wheels/Fork	52	0.003	Fork/Frame	62	0.000	Wheels	70	0.000
	Handlebar	66	0.006	Frame	73	0.000	Frame	81	0.000
				Wheels	82	0.003			
Seat Post	Wheels	42	0.000	Wheels	30	0.000	Wheels	40	0.000
	Frame	70	0.000	Wheels/Frame	48	0.013	Frame	71	0.000
	Wheels/Frame	87	0.000				Wheels/Frame	81	0.000

The key results of Table 10 and Figures 11-16 are:

Regarding a_{VIB} at the brake hoods (Fig. 11)

- The fork and wheels are the 2 factors with the most influence.
- At the left brake hood, the handlebars, wheels/fork and wheels/handlebar interactions do not have a significant effect on a_{VIB} .
- The effects of the first 6 factors and interactions (from fork to fork/handlebar, Table 10) account for 82 % of the a_{VIB} variation measured at the left brake hood.
- At the right brake hood, in addition to the fork and wheels, the wheel/fork interaction and the handlebar have a significant effect on a_{VIB} .
- These first 4 factors and interaction effects (Table 10) account for 66 % of the a_{VIB} variation measured at the right brake hood.

Regarding F_{VIB} at the brake hoods (Fig. 12)

- The handlebars and fork are the 2 factors with the greatest influence.
- All factors have a significant effect on F_{VIB} the interactions do not except for the wheels/fork interaction at the left brake hood and the fork/frame interaction at the right brake hood, which have an effect on F_{VIB} .
- The effects of the first 4 factors and interaction (from handlebars to wheels/fork, Table 10) account for 80 % of the F_{VIB} variation measured at the left brake hood.
- The effects of the first 5 factors and interactions (from handlebar to wheels, Table 10) account for 82 % of the F_{VIB} variation measured at the left brake hood.

Regarding P_{VIB} at the brake hoods (Fig. 13)

- The handlebars and fork are also the 2 most influential factors followed by the other factors.
- At the left brake hood, only the handlebar interactions (fork/handlebar, wheels/handlebar and frame/handlebar) do not have a significant effect on P_{VIB} .

- The effects of the first 5 factors and interaction (from handlebar to wheels/fork, Table 10) explain 83 % of the P_{VIB} variation measured at the left brake hood.
- At the right brake hood, the wheels/fork, frame/handlebar and fork/handlebar interactions do not significantly effect P_{VIB} .
- The effects of the 4 factors (from handlebar to frame, Table 10) account for 81 % of the P_{VIB} variation measured at the right brake hood.

Regarding a_{VIB} at the seat post (Fig. 14)

- The wheels and frame are the 2 factors with the greatest effect.
- In addition to these factors, only the wheels/frame and fork/frame interactions have a significant effect on a_{VIB} .
- The effects of the 3 first factors and interactions (from wheels to wheels/frame, Table 10) account for 87 % of the a_{VIB} variation measured at the seat post.

Regarding F_{VIB} at the seat post (Fig. 15)

- Wheels and wheels/frame interactions are the 2 factors with the most influence and the only ones with a significant effect on F_{VIB} .
- The effects of the two factors account for 48 % of the F_{VIB} variation measured at the seat post (Table 10).

Regarding P_{VIB} at the seat post (Fig. 15)

- The wheels and frame are the two factors with the greatest effect.
- In addition to these, the wheel/frame interaction is the only other factor with a significant effect on P_{VIB} .
- The effects of these first 3 factors account for 81 % of the P_{VIB} variation at the seat post (Table 10).

d) Factorial design analysis and discussion

Determining the predominant factors (bicycle components) on the VIB is not trivial because these depend on the measurement point and the measurand considered. At the brake hoods, for example, the fork and wheels are the most influential factors for a_{VIB} , but for F_{VIB} and P_{VIB} it is the handlebar and the fork. Only the fork is one of the most influential factors for each measurand at the brake hoods.

For F_{VIB} and P_{VIB} at the brake hoods, the handlebar and the fork account for approximately 50 % of all the variations. This shows their predominance on these measurands. It is only for P_{VIB} that all 4 factors explain at least 80 % of the variation on P_{VIB} . This enables us to assume that component interactions can be neglected when the power absorbed by the cyclist is used to measure VIB.

For a_{VIB} and P_{VIB} at the seat post, the wheels are always the most influential factors following by the frame. For F_{VIB} , the wheels/frame interaction is the second most influential factor and this interaction is the third factor for the other measurands.

For a_{VIB} and P_{VIB} at the seat post, the wheels and frame account for approximately 70 % of the VIB variation and the wheels/frame interaction only account for 17 % and 10 %, respectively, of the VIB variation. That indicates that the wheels and frame are the predominant factors for these measurands.

Regarding the P_{VIB} which was the most consistent measurand in the factor selection, two main conclusions can be made: the handlebar and the fork are the predominant bicycle components for the VIB level at the hands (brake hoods); and the wheels and frame are the predominant bicycle components for the VIB level at

the buttocks (seat post). This means it is important to select a lower-transmitting pair of wheels and frame to reduce the VIB at the seat post. But this does not mean that the other bicycle components do not have any effect. It only means that considering the components tested in this study, it is the wheels and the frame that have the greatest effect on the P_{VIB} at the seat post. The same statement can be made with regard to the brake hood results.

Therefore, to reduce the P_{VIB} at the brake hoods, it is not useful to change the frame if the bicycle is not already equipped with a lower-transmitting fork and handlebar mount, because changing these two components should have a more significant effect on P_{VIB} than changing the frame.

4. CONCLUSION

The aim of this study was to investigate the relative contribution of the bicycle components on the VIB. To achieve this objective, the bicycle was divided into its 5 main components. Four of these bicycle components were used as factors for a factorial design experiment.

For each bicycle component, the lowest and highest transmitting components were defined and used to establish the level for the factors in the factorial design. The selection and factorial analysis were based on 3 measurement points (left and right brake hood and seat post) and 3 different measurands (acceleration, force and power).

The factor levels selection and factorial design results show that the power absorbed by the cyclist is the most consistent of the three measurands to quantify the VIB. According to the P_{VIB} it is the handlebar and the fork that have the greatest effect on VIB at the brake hoods whereas the wheels and frame have the greatest effect on the VIB at the seat post. These results provide valuable insight as to which components must be evaluated in order to improve dynamic comfort.

5. REFERENCES

1. Alvarez G, Vinyolas J. A new bicycle pedal design for on-road measurements of cycling forces. *J of Appl Biomech.* 1996;12(1):130-142.
2. Rowe T, Hull M, Wang E. A pedal dynamometer for off-road bicycling. *Am Soc of Mec Eng J of Biomed Eng.* 1998;120:160-164.
3. Reiser RF, Peterson ML, Broker JP. Instrumented bicycle pedals for dynamic measurement of propulsive cycling loads. *Sport Eng.* 2003;6(1):41-48.
4. Champoux Y, Vittecoq P, Maltais P, Auger E, Gauthier B. Measuring the dynamic structural load of an off-road bicycle frame. *Exp Tech.* 2004;28(3):33-36.

5. Drouet J, Champoux Y, Dorel S. Development of multi-platform instrumented force pedals for track cycling (P49). In: *The engineering of sport 7*. Springer Paris; 2008:263-271. http://dx.doi.org/10.1007/978-2-287-09411-8_32. 10.1007/978-2-287-09411-8_32.
6. Drouet J, Champoux Y. Development of a three-load component instrumented stem for road cycling. *Procedia Engineering*. 2012;34(0):502-507.
7. Richard S, Champoux Y. Development of a metric related to the dynamic comfort of a road bike. . 2006:Society for Experimental Mechanics (SEM).
8. Vanwalleghe J, Mortier F, De Baere I, Loccupier M, Van Paepegem W. Design of an instrumented bicycle for the evaluation of bicycle dynamics and its relation with the cyclist's comfort. *Procedia Engineering*. 2012;34(0):485-490.
9. Hölzel C, Höchtel F, Senner V. Cycling comfort on different road surfaces. *Procedia Engineering*. 2012;34(0):479-484.
10. Giubilato F, Petrone N. A method for evaluating the vibrational response of racing bicycles wheels under road roughness excitation. *Procedia Engineering*. 2012;34(0):409-414.
11. Olieman M, Marin-Perianu R, Marin-Perianu M. Measurement of dynamic comfort in cycling using wireless acceleration sensors. *Procedia Engineering*. 2012;34(0):568-573.
12. Vanwalleghe J, Mortier F, De Baere I, Loccupier M, Van Paepegem W. Instrumentation of a racing bicycle for outdoor field testing and evaluation of the cyclist's comfort perception. . 2012:637-638.
13. Hastings AZ, Blair KB, Culligan KF. Measuring the effect of transmitted road vibration on cycling performance. . 2004;2:619.
14. Thite AN, Gerguri S, Coleman F, Doody M, Fisher N. Development of an experimental methodology to evaluate the influence of a bamboo frame on the bicycle ride comfort. *Veh Syst Dyn*. 2013:1-18.

15. Lepine J, Champoux Y, Drouet J. A laboratory excitation technique to test road bike vibration transmission. *Exp Tech*. doi 10.1111/ext12058
16. Petrone N, Giubilato F. Comparative analysis of wheels vibration transmissibility after full bicycle laboratory tests. *AIAS*. 2011:147.
17. Lepine J, Champoux Y, Drouet J. Technique to measure the dynamic behavior of road bike wheels. *Conf Proc Soc Exp Mech Ser*. 2012;6:465-470.
18. Richard S, Champoux Y. Evaluating the influence of damping material applied on an aluminum bike fork. . 2007:Society for Experimental Mechanics (SEM).
19. Vanwalleghem J. *Study of the damping and vibration behaviour of flax-carbon composite bicycle racing frames*. [Master]. Universiteit Gent; 2010.
20. Champoux Y, Richard S, Drouet J-. Bicycle structural dynamics. *Sound and Vib*. 2007;41(7):16-24.
21. Wojtowicki J-, Champoux Y, Thibault J. Modal properties of road bikes vs ride comfort. *Proc Int Modal Anal Conf IMAC*. 2001;1:648-652.
22. Petrone N, Giubilato F. Methods for evaluating the radial structural behaviour of racing bicycle wheels. *Procedia Engineering*. 2011;13(0):88-93.
23. ISO 2631-1. Mechanical vibration and shock - evaluation of human exposure to whole-body vibration - part 1: General requirements. . 1997.
24. ISO 5349-1. Mechanical vibration - measurement and evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration - part 1: General requirements. . 2001.
25. Montgomery DC. *Design and analysis of experiments*. Hoboken, NJ: Wiley; 2009.

6.4 Faits saillants de l'article

- La puissance est le mesurande qui présente les tendances les plus répétables et constantes dans le classement en VIB de composants de vélo.
- Avec les composants étudiés dans cet article :
 - il n'y a pas de différence significative en VIB entre des potences de même longueur;
 - ce sont le cintre et la fourche qui sont prépondérants par rapport aux VIB mesurées aux mains;
 - ce sont le cadre et les roues qui sont prépondérants par rapport aux VIB mesurées aux fesses.

6.5 Autorisation de publication

AUTORISATION D'INTÉGRATION D'UN ARTICLE ÉCRIT EN COLLABORATION À UN MÉMOIRE OU UNE THÈSE

Je (ou nous), soussignée(s), soussigné(s), co-auteur(s), co-auteur(s) de l'article intitulé :

The Relative Contribution of Road Bicycle ^{components} on Vibration Induced to the Cyclist

reconnais (reconnaissons) que ledit article sera inclus comme partie constituante du mémoire de la thèse

de l'étudiant(e) (nom) : Julien Lépine

inscrit(e) au programme de Génie mécanique

de la Faculté de Génie de l'Université de Sherbrooke

En foi de quoi, j'ai (nous avons) signé cet engagement en un nombre suffisant d'exemplaires*

Signature

Date : 2013-12-13

Nom Julien Lépine

Coordonnées Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique

Sig:

Date : 13/12/2013

Nom Yvan Champoux

Coordonnées Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique

Signature

Date : 13 déc. 2013

Nom Jean-Marc Drouet

Coordonnées Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique

* Un exemplaire pour l'étudiante, l'étudiant, un exemplaire pour chaque personne signataire et un exemplaire pour le Service des bibliothèques (à remettre avec le mémoire ou la thèse au moment du dépôt final).

6.6 Éléments à ajouter dans l'article avec sa publication

Cet article est présenté dans la forme exacte de sa soumission. Les trois éléments suivants seront ajoutés lors de sa première révision :

- La façon de procéder pour recréer l'excitation de la route sous les deux roues du vélo sera mieux décrite en ajoutant des informations concernant les signaux utilisés avec les deux excitateurs :
 - Un signal de profil de route pour chacun des excitateurs a été créé en utilisant la fonction de transfert entre l'accélération au moyeu arrière et le signal de l'actionneur (référence [15] dans l'article). Cette technique est valide pour les deux excitateurs, car une fois créé, le signal simule une excitation similaire à celle d'une route indépendamment du vélo et du cycliste utilisés.
 - Pour reproduire une route granulaire (sans crevasses et sans trous), deux portions de route différentes sont reproduites par les actionneurs. Il y a donc très peu de corrélation entre les excitations, car les deux excitateurs reproduisent des excitations indépendantes. Cela permet d'exciter le vélo verticalement et en tangage.
- La composition du vélo de référence utilisé lors de la comparaison de composants sera incluse dans la méthodologie de l'article. Cette composition est la suivante :
 - Cadre, Cervélo R3
 - Roues, Fulcrum 7
 - Fourche, Cervélo FK26
 - Potence, instrumentée ou 3T ARX-PRO 110 mm
 - Cintre, 3T Ergonova Pro
- Lors de la description des mesurandes (accélération, forces et puissance transmise au cycliste), il sera expliqué que seulement la composante verticale du mouvement est prise en considération parce que l'humain est beaucoup moins sensible dans les autres directions aux fréquences excitées par le vélo (norme ISO 2631, référence [26] dans l'article). De plus, comme mentionné dans l'article du chapitre 3 (référence [15] dans l'article), l'excitation verticale recréée par le simulateur est 4 fois supérieure dans la direction verticale que dans la direction horizontale. Les niveaux de vibrations horizontales sont donc très faibles et très peu perceptibles, ce qui limite leur utilisation pour comparer les VIB des composants de vélo.

CHAPITRE 7 : DISCUSSION

Dans ce mémoire, la méthode de mesure développée est toute aussi importante que le résultat lui-même. La détermination de la contribution relative des composants de vélo de route sur la vibration transmise de la route au cycliste sera grandement utile aux fabricants de vélos et la méthode de mesure servira de bases solides à tous ceux qui s'intéresseront à mesurer les niveaux de VIB (vibrations induites au cycliste par la bicyclette). Il y a donc matière à discussion sur ces deux aspects du mémoire afin de bien mettre en perspective les éléments présentés dans ce mémoire.

7.1 Méthode de mesure

L'état d'art sur les mesures de vibrations sur des vélos de route montre bien que c'est un axe de recherche relativement jeune. On a pu déceler dans plusieurs publications que les méthodologies employées comportent des lacunes importantes, car les difficultés liées à la mesure sur des vélos sont mal définies.

L'article présenté au chapitre 3 relève une difficulté fondamentale qui touche à l'excitation vibratoire du vélo. Mesurer les niveaux de vibration sur un vélo roulant sur différentes routes peut sembler être une méthode simple et efficace pour exciter un vélo en vibration, mais les sources de variabilités inhérentes aux mesures in situ comme : la répétabilité de l'excitation (trajet exact où passe le vélo sur la route), le contrôle de la vitesse de déplacement et le positionnement du cycliste rendent l'analyse des résultats très incertaine. En contrepartie, l'excitation en laboratoire du vélo demande une reproduction juste de l'excitation de la route afin de bien prendre en compte l'effet non linéaire qu'a le cycliste sur la dynamique du vélo.

En reproduisant l'excitation de la route telle que mesurée en accélération sur le moyeu arrière d'un vélo remorqué par une automobile sur la route, on s'assure que l'excitation en laboratoire est juste. Cela semble donc la meilleure méthode pour exciter le vélo. Une route très rugueuse avec peu de crevasses et trous (route du parc du mont Orford) a donc été choisie comme mauvaise route typique d'Europe. L'excitation utilisée pour obtenir les résultats présentés dans l'article du chapitre 3 montrait certaines lacunes. Des excitateurs plus puissants ont permis de corriger ces lacunes. Par contre, les excitations horizontales ne sont pas pour autant reproduites correctement. Tous les essais subséquents à cet article (essais du chapitre 5 et 6) ont donc été réalisés avec le système hydraulique Xcite, qui reproduit fidèlement l'excitation de la route du parc du mont Orford entre 0 à 200 Hz. Grâce aux capacités de ce système d'excitation hydraulique, il serait envisageable de créer une banque d'excitations de différentes routes, et ainsi, étudier l'effet de plusieurs types de routes sur le niveau de VIB.

Même si l'excitation en laboratoire est parfaitement répétable, l'effet de l'humain sur la dynamique du vélo fait varier les mesures de VIB près des mains et des fesses. Comme en témoigne l'article du chapitre 4, il est donc essentiel de contrôler la position du cycliste sur le vélo pour minimiser la variabilité des résultats. Même en contrôlant la position des mains, des pieds et la force statique appliquée par les mains aux cocottes, les mesures de vibrations restent variables. Une approche statistique doit donc être utilisée avec rigueur autant dans la réalisation des essais que dans le traitement des données. Toutes comparaisons de vélos ou composants de vélo doivent donc être répétées dans un ordre aléatoire. C'est ensuite avec des analyses de moyennes et d'écart type, c'est-à-dire des analyses de variances (ANOVA), que les résultats doivent être comparés.

L'utilisation d'une approche statistique est importante pour bien réaliser et analyser les mesures de VIB, mais il faut aussi considérer que de bonnes mesures passent par de bons capteurs. Il a été peu question de capteurs dans ce mémoire, car ils n'ont pas été spécifiquement développés dans le cadre de cette maîtrise. Leur développement a par contre été essentiel à la réalisation des essais. Les cocottes et la tige de selle instrumentées ont permis de mesurer les forces aux points d'interfaces entre le vélo et le cycliste avec un degré de justesse et précision adéquat, cela grâce à l'utilisation de jauges extensométriques de 1000Ω et une calibration statique et dynamique minutieuse. Ces précautions ont aussi permis de mesurer la puissance absorbée par le cycliste à partir des mesures de force de ces capteurs et d'accéléromètres. Les limites de ces capteurs seront d'ailleurs abordées dans des actes de conférence et des articles publiés dans un futur proche.

7.2 Résultats

L'analyse des résultats au chapitre 6 montre qu'à l'arrière du vélo, ce sont le cadre et les roues qui ont un effet prédominant sur les niveaux d'accélération, de force et de puissance mesurés à la tige de selle. À l'avant du vélo, la prépondérance de certains composants de vélo sur les VIB est moins éloquente. En force transmise et en puissance absorbée, ce sont le cintre et la fourche qui ont clairement le plus d'effet aux cocottes. Par contre, pour l'accélération transmise aux cocottes ce sont la fourche et les roues qui prédominent. Le cintre n'a un effet significatif que sur l'une des deux cocottes où il est le quatrième facteur le plus prépondérant, après la fourche, les roues et l'interaction roue/fourche.

En résumé, pour les composants testés dans l'article du chapitre 6, on peut affirmer que les plus grandes différences de VIB observées aux fesses proviennent d'un changement du cadre et des roues. Aux mains, les plus grandes variations VIB observées proviennent d'un changement du cintre et de la fourche, sauf en accélération où ce sont plutôt la fourche et les roues qui provoquent de grandes variations.

Il est donc très important de sélectionner un cadre et des roues transmettant moins de vibration pour améliorer le confort aux fesses. Cependant, cela ne signifie pas que les autres composants n'ont pas d'influence ou de potentiel d'amélioration. Il faut plutôt retenir qu'avec la gamme de composants testée, c'est avec les cadres et les roues qu'on voit le plus de différence aux fesses. Le même raisonnement est aussi valable pour les mains.

Par contre, on peut s'imaginer que si l'on veut réduire le niveau de vibration aux mains du cycliste, il est peu utile de modifier le cadre si l'on n'a pas au départ une bonne fourche et un bon cintre, car la modification de ces deux composants a un effet qui risque d'être plus significatif que la modification du cadre.

Les résultats présentés au chapitre 6 peuvent aussi être fort utiles pour valider des prototypes de composants de vélo visant à améliorer le confort. L'écart de 0.24 W de puissance absorbée à une main entre deux fourches peut par exemple servir de référence comme amélioration possible d'un composant. Sachant cela, un prototype de cadre réduisant de 0.3 W la puissance absorbée à une main serait par exemple une amélioration considérable.

CHAPITRE 8 : CONCLUSION

Ce mémoire de maîtrise présente la démarche expérimentale qui a permis de déterminer la contribution relative des composants d'un vélo de route sur les vibrations induites au cycliste par la bicyclette (VIB). C'est avec trois articles de journaux que la démarche pour y arriver est présentée, ce qui augmente grandement la visibilité de cette recherche. La technique de comparaison fidèle des VIB entre différents composants de vélo avec un simulateur d'excitation de routes présentée dans ce mémoire surmonte les difficultés reliées à l'étude du confort des vélos. Son élaboration a mis en évidence l'importance de l'interaction entre le cycliste et le vélo, pour ainsi mieux comprendre la dynamique vibratoire du vélo. La planification et l'analyse statistique des essais paraissent aussi essentielles à la comparaison de composants de vélo. Ces nouvelles connaissances serviront certainement aux chercheurs travaillant sur le confort des vélos en améliorant leurs techniques de mesure.

Outre la technique de comparaison, les résultats concernant la contribution relative des composants du vélo sur les VIB auront un impact intéressant. Avant la publication du troisième article inclus dans ce mémoire (chapitre 6), personne ne connaissait avec certitude les composants prépondérants par rapport au confort des vélos. L'acquisition de ces connaissances permettra à Cervélo et dans le futur aux autres fabricants de vélos de concevoir des vélos qui offriront le meilleur compromis entre le confort et la performance.

Ultimement, ce sont les cyclistes qui seront gagnants, car ils pourront profiter de vélos rapides et confortables et profiter de leur passion pendant encore plus d'heures avec moins de fatigue.

LISTE DES RÉFÉRENCES

- [1] Dettori, N. J. et Norvell, D. C. (2006). Non-traumatic bicycle injuries : a review of the literature. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, volume 36, numéro 1, p. 7-18.
- [2] Zinn, L. (2012). *Getting the most from your post*. Velo news, 88-94 p.
- [3] Fretz, C., Legan Nick et Zinn, L. (2011). *tech and training : Endurance Bike Test*. Velo news, 84-94 p.
- [4] Champoux, Y., Richard, S. et Drouet, J. -. (2007). Bicycle structural dynamics. *Sound and Vibration*, volume 41, numéro 7, p. 16-24.
- [5] Richard, S. (2005). *Etude du comportement dynamique d'un velo de route en lien avec le confort du cycliste*. M.Sc.A., Universite de Sherbrooke (Canada), Canada,
- [6] Nordstrom, K. I. (2000). *Discomfort Transmission A Method for Measuring the Ride Comfort of Full-Suspension Mountain Bicycles*. Master of Applied Sciences, University of Victoria,
- [7] ISO 5349-1 (2001). *Mechanical vibration - Measurement and evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration - Part 1: General requirements*
- [8] ISO 2631-1 (1997). *Mechanical vibration and shock - Evaluation of humain exposure to whole-body vibration - Part 1: General requirements*
- [9] Giubilato, F. et Petrone, N. (2012). A method for evaluating the vibrational response of racing bicycles wheels under road roughness excitation. *Procedia Engineering*, volume 34, numéro 0, p. 409-414.
- [10] Lepine, J., Champoux, Y. et Drouet, J. (2012). Technique to measure the dynamic behavior of road bike wheels. Dans *30th IMAC, A Conference on Structural Dynamics, 2012, January 30, 2012 - February 2*, volume 6. Springer New York, Jacksonville, FL, United states, p. 465-470.
- [11] Olieman, M., Marin-Perianu, R. et Marin-Perianu, M. (2012). Measurement of dynamic comfort in cycling using wireless acceleration sensors. *Procedia Engineering*, volume 34, numéro 0, p. 568-573.
- [12] 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*, volume 34, numéro 0, p. 485-490.

- [13] Thite, A. N., Gerguri, S., Coleman, F., Doody, M. et Fisher, N. (2013). Development of an experimental methodology to evaluate the influence of a bamboo frame on the bicycle ride comfort. *Vehicle System Dynamics*, p. 1-18.
- [14] Alvarez, G. et Vinyolas, J. (1996). A new bicycle pedal design for on-road measurements of cycling forces. *Journal of Applied Biomechanics*, volume 12, numéro 1, p. 130-142.
- [15] Rowe, T., Hull, M. et Wang, E. (1998). A pedal dynamometer for off-road bicycling. *TRANSACTIONS-AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS JOURNAL OF BIOMECHANICAL ENGINEERING*, volume 120, p. 160-164.
- [16] Reiser, R. F., Peterson, M. L. et Broker, J. P. (2003). Instrumented bicycle pedals for dynamic measurement of propulsive cycling loads. *Sports Engineering*, volume 6, numéro 1, p. 41-48.
- [17] Drouet, J., Champoux, Y. et Dorel, S. (2008). Development of Multi-platform Instrumented Force Pedals for Track Cycling (P49). Dans *The Engineering of Sport 7*. Springer Paris, p. 263-271.
- [18] Bolourchi, F. et Hull, M. (1985). Measurement of rider induced loads during simulated bicycling. Dans *ISBS-Conference Proceedings Archive*, volume 1p. 178-198.
- [19] De Lorenzo, D. S. et Hull, M. L. (1999). A hub dynamometer for measurement of wheel forces in off-road bicycling. *Journal of Biomechanical Engineering*, volume 121, numéro 1, p. 132-137.
- [20] Drouet, J. et Champoux, Y. (2010). A novel dynamometric hubset design to measure wheel loads in road cycling. *Procedia Engineering*, volume 2, numéro 2, p. 2925-2930.
- [21] Caya, A., Champoux, Y. et Drouet, J. (2012). Dynamic behaviour and measurement accuracy of a bicycle brake hood force transducer. *Procedia Engineering*, volume 34, numéro 0, p. 526-531.
- [22] Champoux, Y., Vittecoq, P., Maltais, P., Auger, E. et Gauthier, B. (2004). Measuring The Dynamic Structural Load Of An Off-Road Bicycle Frame. *Experimental Techniques*, volume 28, numéro 3, p. 33-36.
- [23] Richard, S. et Champoux, Y. (2006). Development of a metric related to the dynamic comfort of a road bike. Dans *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).

- [24] 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*, volume 36, numéro 1, p. 45-59.
- [25] 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*, volume 311, numéro 3-5, p. 1286-1304.
- [26] Hastings, A. Z., Blair, K. B. et Culligan, K. F. (2004). Measuring the effect of transmitted road vibration on cycling performance. Dans *The Engineering of Sport 5*, volume 2. International Sports Engineering Association, p. 619.
- [27] Vanwalleghem, J. (2010). Damping and vibration behaviour of flax-carbon composite bicycle racing frames. *UGent-FirW Doctoraatssymposium, 11e*, p. 89.
- [28] Petrone, N. et Giubilato, F. (2011). Comparative Analysis of Wheels Vibration Transmissibility after Full Bicycle Laboratory Tests. Dans *AIASPalermo*, p. 147.
- [29] Lepine, J., Champoux, Y. et Drouet, J. (2011). Excitation techniques for testing bike vibration transmission in the laboratory. Dans *29th IMAC, a Conference on Structural Dynamics, 2011, January 31, 2011 - February 3*, volume 6. Springer New York, Jacksonville, FL, United states, p. 35-43.
- [30] Lepine, J., Champoux, Y. et Drouet, J. (2013). Influence of Test Conditions on Comfort Ranking of Road Bicycle Wheels. Dans *30th IMAC, A Conference on Structural Dynamics, 2012, January 30, 2012 - February 2*. Springer New York, Jacksonville, FL, United states,
- [31] Hölzel, C., Höchtl, F. et Senner, V. (2012). Cycling comfort on different road surfaces. *Procedia Engineering*, volume 34, numéro 0, p. 479-484.
- [32] Montgomery, D. C. (2009). *Design and analysis of experiments*. Wiley, Hoboken, NJ,

ANNEXE A : BANC D'ESSAI POUR ROUES

L'acte de conférence présenté dans cette annexe présente un banc d'essai pour mesurer les forces transmises entre différentes roues de vélo.

Auteurs et affiliation :

Julien Lépine : étudiant à la maîtrise, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique

Yvan Champoux, professeur, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique

Jean-Marc Drouet, professeur, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique

Date d'acceptation : Novembre 2011

Conférence : IMAC XXX, Jacksonville

État de l'acceptation : Version finale en consultation en ligne

Revue : Experimental Techniques

Référence : Lepine J, Champoux Y, Drouet J. Technique to Measure the Dynamic Behavior of Road Bike Wheels. *Conf Proc Soc Exp Mech Ser.* 2012; 6:465-470.

Titre en français : Technique de mesure du comportement vibratoire des roues de vélo de route

A.1 Contribution au mémoire

Cet acte de conférence ajoute de l'information supplémentaire sur la technique de mesure du comportement vibratoire des roues de vélo de route. Cette technique développée par l'auteur est intéressante, car elle propose un montage qui mesure les forces bloquées sur la roue. Par contre, rien ne montre que les mesures en transmissibilité obtenues avec celle-ci permettent de faire un lien avec les VIB. Des essais exploratoires réalisés dans le laboratoire de VÉIUS montrent d'ailleurs qu'un classement de roues basé sur les forces transmises sur un moyen bloqué est différent d'un classement basé sur le niveau de VIB. D'autres études devraient donc être réalisées avant d'utiliser la transmission de force en condition bloquée comme mesurande du confort.

A.2 Résumé en français

Dans le but d'améliorer le confort en cyclisme sur route, l'industrie du vélo de route a une préoccupation par rapport aux vibrations générées par la route et transmises aux mains et aux fesses du cycliste. Les roues sont considérées comme l'un des principaux éléments qui contribuent à l'isolation des vibrations du vélo. Dans cet acte de conférence, il est décrit une technique qui utilise la mesure d'une force bloquée au niveau du moyeu de la roue. Pour ce faire, un simulateur de route a été utilisé pour imposer un bruit blanc déplacement vertical contrôlé sous le pneu. Des mesures de transmissibilité ont ensuite été prises entre la force sous le pneu et la force bloquée au niveau du moyeu. La transmissibilité entre six roues différentes a été mesurée.

Les résultats montrent que l'emplacement où la force est appliquée sur la circonférence de la roue influence grandement la transmissibilité de certaines roues. Ils montrent aussi que cette technique permet une différenciation et une hiérarchisation des 6 roues testées. Chaque roue a été également caractérisée par sa rigidité statique radiale. Les résultats préliminaires montrent d'ailleurs qu'il existe une faible corrélation ($R^2 = 0.41$) entre la rigidité statique radiale et la transmissibilité des roues.

A.3 Acte de conférence 1

Proceedings of the SEM IMAC XXX Conference Jan. 30 – Feb. 2, 2012, Jacksonville, FL USA ©2011 Society for Experimental Mechanics Inc.

Technique to Measure the Dynamic Behavior of Road Bike Wheels

Julien Lépine, M.Sc. (Engineering) candidate
Dr. Yvan Champoux, Professor
Dr. Jean-Marc Drouet, Associate Professor
VéIUS, Department of Mechanical Engineering
Université de Sherbrooke,
2500 boul. de l'Université, Sherbrooke (Québec),
CANADA J1K 2R1

ABSTRACT

In the quest to improve comfort in road cycling, a primary concern of the bike manufacturing industry is the vibration generated by the road and transmitted to the cyclist's hands and buttocks. The bike wheels are considered to be one of the major components contributing to the bike's vibration isolation. In this paper, we describe a technique that uses the measurement of a blocked force at the hub. A road simulator was used to impose a controlled white noise vertical displacement under the tire. Measurements were taken of the force under the tire and the blocked force at the wheel hub. Six different wheels were tested. When the force was applied at different locations on the wheel, some of the wheels showed important spatial variations of the blocked force. The results show that this technique is successful in differentiating and ranking the wheels. Each wheel was also characterized by its radial static stiffness. Preliminary results show that there is poor correlation $R^2 = 0.41$ between radial static stiffness and the blocked force at the dynamic hub.

Introduction

Over recent decades, several measurement techniques have been developed to enhance cycling performance, ranging from rider performance measurements to in situ load and stress measurements on the bike frame and components. Rider comfort has also emerged as a significant performance issue. Devoted cyclists spend hundreds of hours each year on their bikes, thus justifying a desire for better comfort. Vibrations generated by road surface defects are a major source of discomfort, fatigue and disincentive to ride; therefore the ability to filter these vibrations is paramount. Designing a road bike with comfort in mind is a major challenge, because contrary to other types of bicycles (i.e. mountain bikes), road bikes have no suspension system: isolation from vibrations therefore depends mainly on the dynamic behavior structure which is characterized by a modal analysis of the full bike, in [1] and [2]. Because of the complexity and sheer number of components on a bicycle, each part must be studied individually in order to better understand and improve the full assemblage.

Road bike wheels are often considered to be one of the components with the greatest influence on cyclist comfort. For one thing, the wheels are in direct contact with the source of excitation: the road surface. So far, the only measurement that has been used to characterize and compare wheels has been a static quantity: the static radial stiffness. Note that in this paper, a bike wheel is composed of a hub, spokes, a rim, and a tire or tube.

The purpose of the research reported in this paper is to experimentally characterize the dynamic behavior of road bike wheels. The specific objectives are (1) to develop a test rig to measure the hub transmitted force and static radial stiffness of road bike wheels; (2) to experimentally measure and analyze these quantities using several wheels in order to disclose intra and inter variability; and (3) to investigate if static radial stiffness could be correlated to the transmitted force at the hub.

Materials and Methods

Figure 1 provides a schematic diagram of the test rig developed for studying wheel dynamic characteristics. The dynamic wheel test rig measures the blocked force at both ends of wheel axle. These ends are respectively clamped to a force transducer (Sensortronics 60001 S-Beam, capacity: 1000 lb) to measure transmitted vertical force. Both transducers are clamped to a very stiff rigid structure connected to the ground in order to measure the hub axle vertical blocked forces. An 8 channels LMS SCADAS Mobile data acquisition system was used and the data was analysed using LMS Virtual.lab software package

A road simulator is used to impose controlled vertical displacement under the tested wheel. The test rig uses a horizontal swing arm rotating freely around a pivot. A motion displacement actuator, the D-BOX KAI Kinetron, drives the swing arm. The use of a swing arm allows for stabilizing the push force in the XZ plane and its length is such that near vertical displacement is obtained under the wheel. The displacement of the actuator is measured with an LVDT (Trans-Tek AC LVDT Series 290). A force transducer (Sensortronics 60001 S-Beam, capacity: 500 lb) located under the wheel measures the push force applied to the tire. A half-cylinder element (13 mm in diameter) is attached to the top of a plate and is in contact with the tire. This force-transmitting element allows the simulation of local contact similar to a road bump. The tire pressure is adjusted to 8 bars.

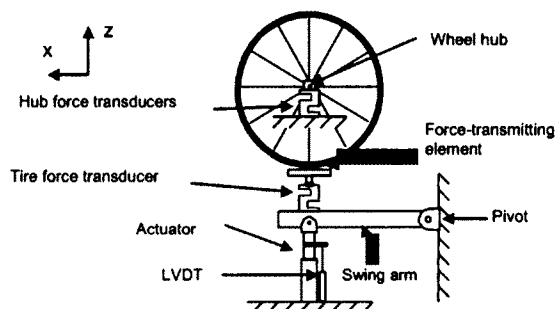


Fig. 1: Dynamic wheel test rig

For the purposes of this paper, only the front wheels were tested. To simulate the typical preload of a 75 kg cyclist, the actuator is positioned to generate a nominal preload force of 250 N on the wheel

In all the tests we conducted, the preload was adjusted to compensate any wheel out of round variation. A white noise signal was provided to the actuator with an average displacement range of ± 0.25 mm. A typical displacement power spectrum density (PSD) measured by the LVDT is shown in Fig. 2. The DC component of the curve is due to the preload force. The amplitude response of the actuator drops drastically above 100 Hz. This is caused by the actuator speed limitation. The bandwidth of interest is 0-100 Hz, with the knowledge that human sensitivity to vibration diminishes drastically above 100 Hz [3].

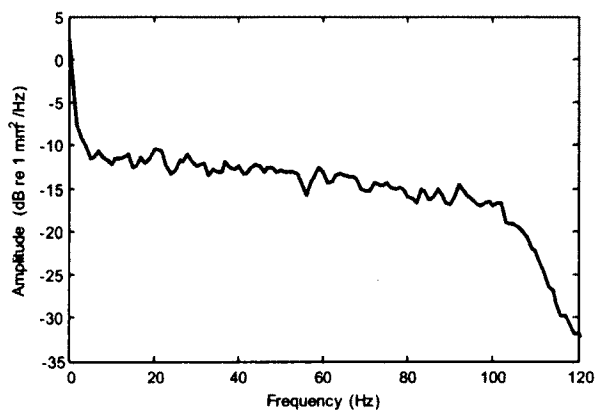


Fig. 2: PSD of the simulator vertical displacement

Wheel force transmission characteristics

Figure 3 illustrates the typical PSD of the total blocked force transmitted by the hub. All the PSDs in this paper are calculated using 60 averages of 1 s segments overlapped at 67%. The curve shows that the wheel has a dynamic amplification between 70 and 100 Hz.

This measurement represents the total force that would typically be transmitted to the front fork, but in this case this measurement is done in a block condition. The root mean square value of the PSD, F_{rms} , is measured for a frequency bandwidth ranging from 2 to 110 Hz, for which there is enough input energy injected in the system by the test rig [4]. This frequency bandwidth also allows for the removal of the DC force component.

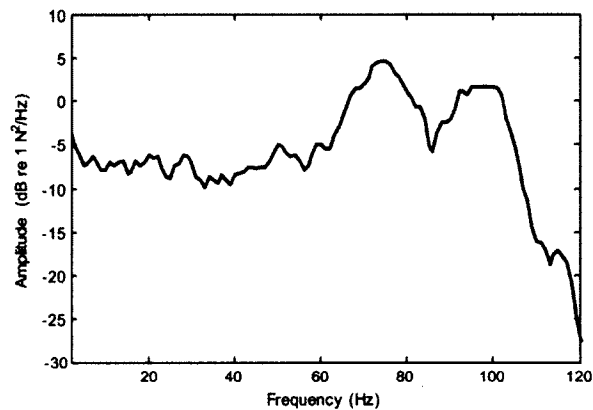


Fig. 3: PSD of the total blocked force transmitted at the hub

We measured the local blocked force F_{rms} at several circumferential locations in order to explore potential variability related to the measurement location. Figure 4 shows the spatial distribution of F_{rms} measured three times at 16 locations evenly spaced around the wheel, on two different wheels. Significant F_{rms} variation around the wheels is easily observed. Wheel *B* (Fig 4b) shows a much greater variation than wheel *A* (Fig 4a). The maximum variation range measured on a single wheel is 25.2%, with a standard deviation of 5.0% relative to the mean value. The mean of all the 16 F_{rms} measured around the circumference for a test is calculated and designated as \bar{F}_{rms} . This provides a single number for a test that will ease wheel behavior comparison analysis. The two wheels show very different mean values of $\bar{F}_{rms} = 8.18$ N for wheel *A* and $\bar{F}_{rms} = 6.78$ N for wheel *B*.

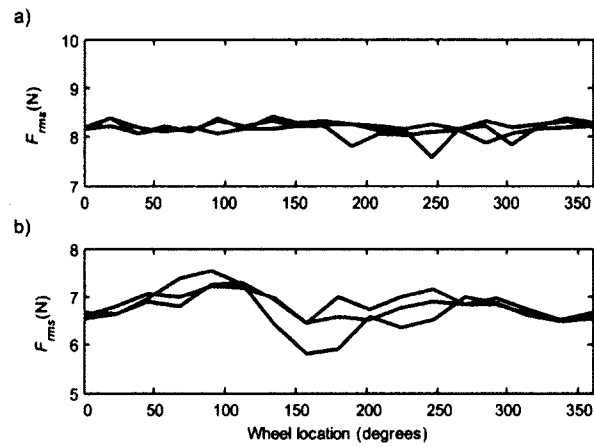


Fig. 4: F_{rms} for different locations around the wheel circumference. The test is repeated three times

a) Wheel A: low F_{rms} variability with $\bar{F}_{rms} = 8.18$ N;

b) Wheel B: high F_{rms} variability with $\bar{F}_{rms} = 6.78$ N

To explore the merit of this new testing technique, it is interesting to quantify the F_{rms} intra-variability using several wheels of the same model. Two same-model front wheels were tested with identical tubes and tires (Fig. 5). The mean difference between the curves is 0.25 N, which represents 3% of the average F_{rms} over all measurement locations.

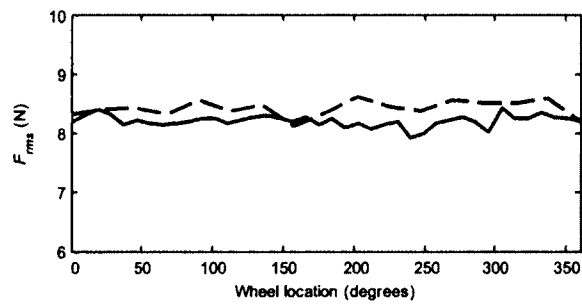


Fig. 5: F_{rms} comparison of two same-model wheels with measurements taken at 16 locations around each circumference:

— Wheel sample A $\bar{F}_{rms} = 8.18$ N and - - - Wheel sample B $\bar{F}_{rms} = 8.43$ N

Wheel rankings

The ability of the blocked force measurement to differentiate between different wheels was assessed with a test campaign using 5 different wheels. Each wheel was tested 3 times at 16 locations and the mean value at each location is presented for each wheel in Fig. 5. The \bar{F}_{rms} is also presented for each wheel.

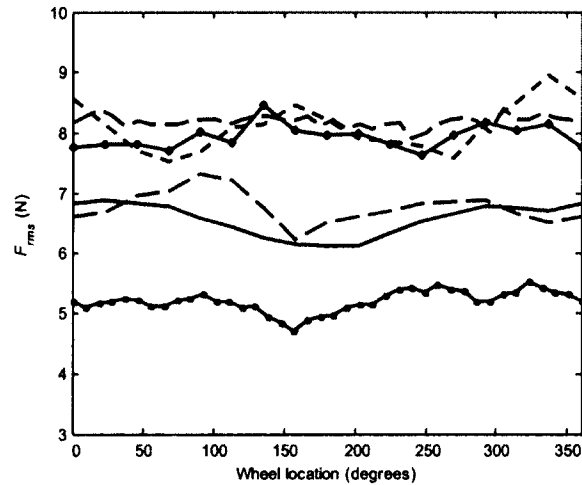


Fig. 6: Hub transmitted force (F_{rms}) for 6 different wheel models:

●— Wheel 1, $\bar{F}_{rms} = 5.20$ N, ___ Wheel 2, $\bar{F}_{rms} = 6.56$ N, Wheel 3, $\bar{F}_{rms} = 6.78$ N, ◆— Wheel 4, $\bar{F}_{rms} = 7.96$ N, ___ Wheel 5, $\bar{F}_{rms} = 8.09$ N, Wheel 6, $\bar{F}_{rms} = 8.18$ N

A significant difference between \bar{F}_{rms} was found using hypothesis testing with a 5% level of significance. Based on Student's t distribution (t -test) the equivalence of two \bar{F}_{rms} is rejected when $t_0 > t_{0.05, \nu}$. The test was performed based on the fact that the variances between the wheels are not equal and with ν representing the degrees of freedom of the analysis [5]. This hypothesis testing shows that using \bar{F}_{rms} , it is possible to differentiate the wheels, except between wheels 4 and 5 and wheels 5 and 6.

Static radial stiffness and dynamic behavior

The static radial stiffness test is commonly used to compare wheels because it is a relatively simple test to perform. One of our research objectives is to investigate if the dynamic behavior of wheels can be correlated to their static radial stiffness.

Static radial stiffness was measured on the wheels using the test rig. A vertical displacement under the tire was imposed by the simulator and measured with the LVDT. The force applied to the tire was simultaneously measured, allowing for direct stiffness calculations. To avoid any viscoelastic or dynamic effect, a total displacement time of 30 s was used with a maximum displacement of 2.5 mm. To avoid local effects and obtain a global characterization of the wheel, static radial stiffness was measured at 16 locations evenly spaced around the wheel. In parallel, the dynamic test protocol described

previously was used to provide corresponding hub transmitted force. A 250 N preload force was applied during stiffness measurements.

Static radial stiffness as a function of \bar{F}_{rms} is shown in Fig. 7. According to the value of the coefficient of determination ($R^2 = 0.41$), linear correlation between the static radial stiffness and the \bar{F}_{rms} cannot be established.

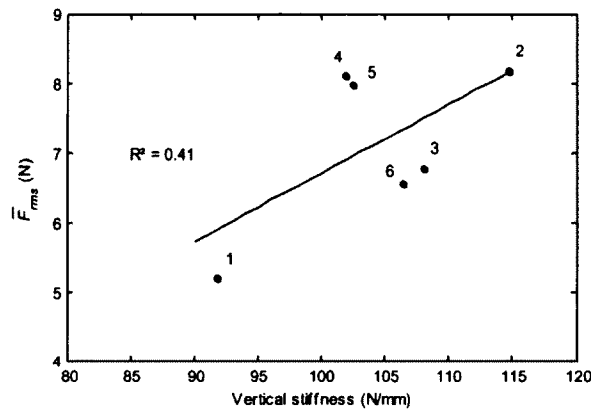


Fig. 7: Static radial stiffness as a function of \bar{F}_{rms} (wheels 1 to 6)

Discussion

Measurement of the force transmitted at the hub generated by displacement imposed over the circumference of the wheel, and the corresponding average value \bar{F}_{rms} for several different wheel models shows that wheels do behave differently and that they do not transmit the same force level. Statistical analysis indicates that this is not due to chance and it allows to differentiate the wheels among them. As well, these measurements require a specific rig. However, this approach still offers a relatively easy way to dynamically evaluate and compare wheel behavior. It was also shown that measurements must be made at several locations around the wheel circumference in order to obtain average values, because wheels may have significant behavior variability around the circumference. This may be related to spoke characteristics tension, asymmetry of the rim, or the location of the force relative to the point where the spoke is attached on the rim.

One interesting hypothesis is that the wheel with the lowest \bar{F}_{rms} value is the most comfortable one. However, certain elements must be considered before drawing such a definitive conclusion. The technique uses a blocked force which allows us to make sure that all wheels are tested under the exact same boundary conditions at the hub for the force measurement. A real fork would not apply the same boundary conditions and this will influence the amplitude of the transmitted force. Although this may not change the ranking obtained with the blocked force situation, further investigation is nevertheless

Proceedings of the SEM IMAC XXX Conference Jan. 30 – Feb. 2, 2012, Jacksonville, FL USA ©2011 Society for Experimental Mechanics Inc.

required to explore this aspect. A flat frequency displacement spectrum was used in this paper. It would be useful to use a spectrum that is similar to real road excitation.

The radial wheel stiffness and the \bar{F}_{rm} measurement on the tested wheels did not show good correlation. The vibration transmitted to the cyclist's hands and buttocks is a complex physical issue, and a better understanding of the transmission mechanism of several components must be achieved before a definitive conclusion regarding the relationship between the static radial stiffness of the wheels and cyclist comfort can be reached.

Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge financial support from the National Science and Engineering Council of Canada (NSERC) and the participation of Cervélo and Vroomen-White Design.

References

- [1] Richard, S. and Champoux, Y., "Evaluation of road bike comfort using classical and operational modal analysis", Proceedings of IMAC XXIII, 2005.
- [2] Champoux Y and al. "Bicycle Structural Dynamics", Sound and Vibration, July, pages 16-22, 2007.
- [3] ISO 2631-1 (1997). "Mechanical vibration and shock -Evaluation of human exposure to whole-body vibration -Part 1: General requirements"
- [4] Lépine, J., Champoux, Y., Drouet J.-M. "Excitation techniques for testing bike vibration transmission in the laboratory", Proceedings of IMAC XXIX, 2011.
- [5] Montgomery, D. C. "Design and Analysis of Experiments", Wiley, 7th ed., 2008.

A.4 Autorisation de publication

AUTORISATION D'INTÉGRATION D'UN ARTICLE ÉCRIT EN COLLABORATION À UN MÉMOIRE OU UNE THÈSE

Je (ou nous), soussigné(e), soussigné(s), co-auteur(s), co-auteur(s) de l'article intitulé :

Technique to Measure the Dynamic Behavior of Road Bike Wheels

reconnais (reconnaissons) que ledit article sera inclus comme partie constituante du mémoire



de la thèse

de l'étudiant(e) (nom) : Julien Lépine

inscrit(e) au programme de Génie mécanique

de la Faculté de Génie

de l'Université de Sherbrooke

En foi de quoi, j'ai (nous avons) signé cet engagement en un nombre suffisant d'exemplaires*

Signature

Date :

2013-12-15

Nom Julien Lépine

Coordonnées Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique

Signature

Date :

13/12/2013

Nom Yvan Champoux

Coordonnées Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique

Signature

Date :

13 déc. 2013

Nom Jean-Marc Drouet

Coordonnées Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique

* Un exemplaire pour l'étudiante, l'étudiant, un exemplaire pour chaque personne signataire et un exemplaire pour le Service des bibliothèques (à remettre avec le mémoire ou la thèse au moment du dépôt final).

ANNEXE B : CHOIX DU TYPE D'EXCITATION

L'acte de conférence présenté dans cette annexe présente l'étude qui a permis de choisir le type d'excitation à utiliser pour recréer le plus fidèlement possible l'excitation de la route en laboratoire.

Auteurs et affiliation :

Julien Lépine : étudiant à la maîtrise, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique

Yvan Champoux, professeur, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique

Jean-Marc Drouet, professeur, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique

Date d'acceptation : Novembre 2010

Conférence : IMAC XXIX, Jacksonville

Référence : Lepine J, Champoux Y, Drouet J. Excitation techniques for testing bike vibration transmission in the laboratory. *Conf Proc Soc Exp Mech Ser.* 2011;6:35-43.

Titre en français : Technique d'excitation en laboratoire pour tester la transmission de vibration sur des vélos

B.1 Contribution au mémoire

Cet acte de conférence ajoute de l'information supplémentaire sur deux techniques d'excitation de vélo en laboratoire, soit avec un tapis roulant et avec des excitateurs linéaires. La comparaison entre les deux techniques présente bien les avantages et inconvénients de chacune d'elle. Une partie de l'information présentée dans cet acte se retrouve également dans l'article présenté au chapitre 3, car ce dernier est basé sur ce document.

B.2 Résumé en français :

Les vibrations engendrées par les défauts de surface de la route sont une source importante d'inconfort pour les cyclistes. Cet acte de conférence présente deux techniques d'excitation en laboratoire pour

étudier le comportement vibrations de vélo de route. La première technique utilise un tapis roulant avec une surface de la courroie de modification. La seconde technique est basée sur l'utilisation d'un simulateur de route qui a été développé spécifiquement pour générer un déplacement sous les roues du vélo.

L'objectif de cette étude est d'évaluer et de comparer les avantages respectifs de ces deux techniques. Aux fins de l'évaluation, une technique de mesure de l'excitation de la route sur un vélo est aussi décrite. L'excitation à large bande générée par la route utilisée pour la comparaison est également évaluée dans cette étude.

Les résultats démontrent que le simulateur de route produit adéquatement des profils de déplacement vertical de la route. Les limitations en vitesse de déplacement de l'actionneur utilisé dans l'étude empêchent de reproduire des routes très dégradées. Finalement, d'autres travaux sont nécessaires pour développer une surface de tapis roulant qui peut générer une excitation suffisante au-dessus de 25 Hz.

B.3 Acte de conférence 2

Excitation techniques for testing bike vibration transmission in the laboratory

Julien Lépine, M.E. student
Dr. Yvan Champoux, Professor
Dr. Jean-Marc Drouet, Associate Professor
VélUS, Department of mechanical engineering
Université de Sherbrooke,
2500 boul. de l'Université, Sherbrooke (Québec),
CANADA J1K 2R1

ABSTRACT

Vibrations generated by road surface defects are a significant source of discomfort for cyclists. This paper presents two very different laboratory techniques for studying road bike vibration. The first technique uses a treadmill with a modified belt surface. The second technique is based on the use of a road simulator that was developed specifically to generate displacement excitation under the wheels of the bike. Broadband excitation generated by coarse pavement surface is also evaluated in this study.

The objective of this paper is to evaluate and compare the relative merits of these two approaches. For the purposes of evaluation, we have described a technique to obtain a realistic measurement of input in real road conditions.

Our results demonstrate that the road simulator succeeds in producing adequate displacement profiles in the vertical axis resulting in a vibration frequency spectrum that closely resembles the measurements in real road conditions. Limitations in current actuator capacity prevent to reproduce very coarse road conditions. Finally, more work is needed to develop an appropriate belt surface that can generate sufficient energy excitation above the 25 Hz range.

Introduction

Next to being lightweight, one of the most oft-mentioned desirable characteristics in a road bike is the capacity to filter vibrations. Because the cyclist has a very significant influence on the bike's dynamic behaviour due mainly to position and posture while cycling, laboratory excitation techniques are useful when we need to

2

obtain accurate and repeatable results. It is also important to use excitation signals that mimic road profiles, due to the non-linear behaviour of the cyclist's buttocks and hand-arm system. In this work, a rough granular pavement surface is considered to generate continuous random excitation.

The respective merits of two techniques are described and evaluated: one uses a treadmill with small wood studs glued onto the belt to create an uneven surface, while the second technique involves a road simulator apparatus that we developed specifically to generate road profile displacement under the bike's wheels. The same bike and same cyclist were used for all on-road and laboratory measurements. Acceleration signals are also measured at the same location in all tests.

In order to evaluate and compare the techniques, it was necessary to obtain a typical reference vibration signal on the bike and to carry out the measurements on the road. The technique to obtain this reference signal is described in the first section of this paper. Both techniques are presented in the second section, and the respective measured frequency spectrums are used to compare them. The final section of this paper compares and discusses the relative merits and limitations of both techniques.

Road reference signal measurement

The reference signal for evaluating the vibration replication fidelity of the two techniques was measured using the system shown in Fig. 1: the cyclist is sitting on a bike that is being towed by a car. A fixture connects the bike's front fork to the rear of the car, and a dummy front hub allows the fork to rotate freely along the front axle. The cyclist does not pedal and the chain has been removed. An instrumented stem monitors the vertical force applied by the cyclist on the handlebar. A triaxial accelerometer (PCB model 356B11) is secured to the left rear frame dropout of the bike. All cables are routed along the frame and connected to the power supply and data acquisition system installed in the car. This measurement technique is similar to the one used to rank road surfaces for cars [1]; it offers several advantages for bike testing, such as obtaining high quality signals related to road excitation. Speed is an important parameter that can be kept constant within ± 1 km/h; monitoring the leaning force [2] allows us to minimize the signal variability related to the cyclist's position and posture; gear and chain noise have been eliminated. The low natural frequency of the car's suspension system does not disturb the signal because it is below the selected frequency range of interest between 8 Hz and 100 Hz [3].

The measurements were repeated four times on the same 1.5 km section of the road located in Mont-Orford National Park (Quebec, Canada) at three different speeds: 26, 30 and 36 km/h. This road was selected because it does not have any major cracks or potholes and mainly because its surface is coarse enough to provide the desired random excitation.

3

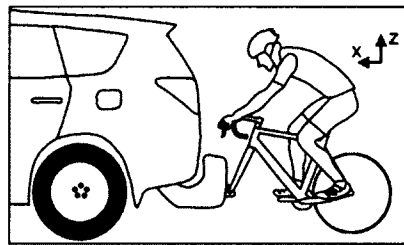


Fig. 1: Road test setup

The power spectral density (PSD) measured in the Z axis provided by the accelerometer are shown in Fig. 2 at all three speeds. Each curve represents the average spectrum over the 4 tests for each speed. The average absolute difference across all frequencies between the average spectrum and all curves at a specific speed is less than 0.5 dB. This shows that the technique provides repeatable measurements. The RMS and kurtosis values are also provided. The signals were bandpass filtered (8-100Hz) to calculate the kurtosis and RMS values. The frequency spectrums have the same smooth shape illustrating that there is no strong dynamic behaviour in the system. As expected, the spectrums as well as the RMS amplitudes increase along with speed. The maximum variation between the 20 and 36 km/h frequency spectrum curves is in the 4 dB range.

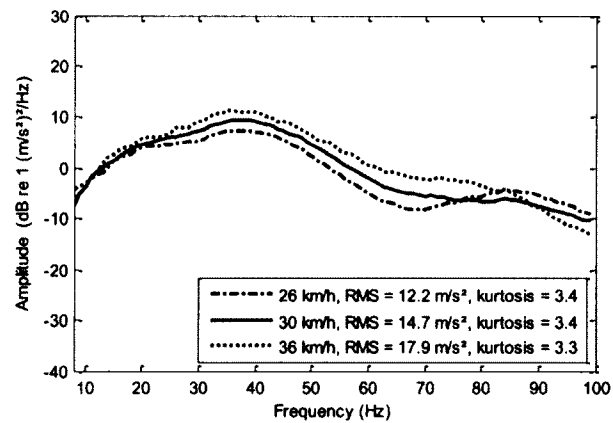


Fig. 2: Average PSD for the vertical accelerations (Z) at three speeds on the Mont-Orford National Park road.

4

The treadmill

For this research program, we custom-designed a treadmill to test road bikes mounted by cyclists in the laboratory [4]. It is powered by a 10 Hp variable speed electric motor. The rolling surface dimensions of 0.75 x 2 m provide enough space for the cyclist to move freely while pedaling normally. To reproduce road excitation, wooden dowels with diameters ranging from 6.4 mm to 7.9 mm were hot-glued onto the belt surface. The dowels are all approximately 30 mm long. The spacing between dowels follows a Gaussian distribution centred at 7 mm with a standard deviation of 3 mm. Fig. 3 shows the typical spacing of the dowels. Two rows with different span distribution were glued side by side to minimize the inherent periodicity provided by the treadmill. All parameters were selected according to road profile observation and road bike wheel dimension and with the goal of maintaining partial contact between the tire and the belt surface.

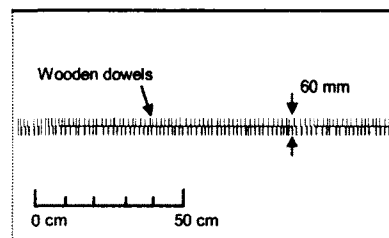


Fig. 3: Dowel distribution on the treadmill belt surface

During testing, the front wheel hangs above the rolling surface and does not touch the belt. This reproduces the same conditions used during on-road measurements for the reference signal. For this preliminary work, tests were carried out only at 26 km/h. The cyclist's position was also controlled for by monitoring the instrumented stem signal. An 8 channel LMS data acquisition system was used and the data was analysed using LMS Virtual.lab software package.

Fig. 4 shows a comparison of the reference signal frequency spectrum measured on the road and the average PSD of the vertical acceleration (z) measured on the treadmill. There are important discrepancies at high frequencies between the two frequency spectrums. The RMS and the kurtosis amplitudes are also quite different. The RMS level on the treadmill is 33% lower than the reference signal measured on the road. The modifications tested at the surface of the belt were not successful in replicating the high frequency content when compared to on-road measurements.

5

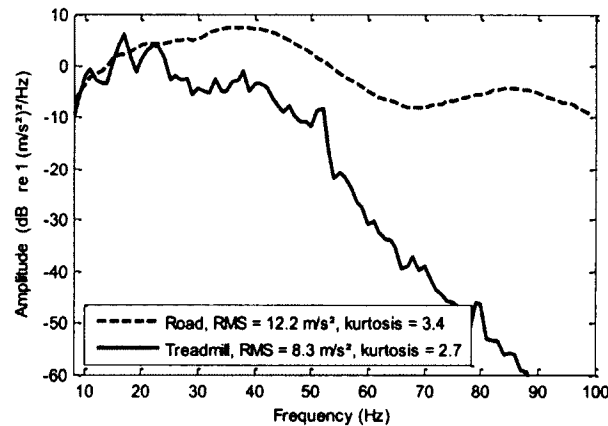


Fig. 4: Comparison of the average acceleration PSD measured using the treadmill and the PSD of the reference signal measured on the road. The speed is 26 km/h.

Road simulator

The second technique uses a road simulator (shown in Fig. 5) that was developed specifically for bike testing [5]. In the current stage of development, the bike wheels are not rolling and consequently the cyclist is not pedaling or steering the bike. Two D-BOX Kinetron motion actuators produce the required force to move a horizontal beam with one freely rotating end along a horizontal axis. At the other end of the beam this creates a displacement that is near-vertical to the wheel of the bike that rests on top of the beam. These actuators were selected because of their relative low price and because they can support a significant DC load. They are designed to equip motion platforms for home theatre applications. Their effective bandwidth ranges from DC to 100 Hz. They can provide a peak to peak displacement of 25 mm with a maximum linear velocity of 10 m/s and a maximum acceleration of 10 m/s².

The driving signal is provided by the sound card output of a PC using a USB connector with the D-BOX KAI interface device. This feature eliminates the opportunity to use an analog closed loop field replication scheme that would have used the in-situ road acceleration measurement as a control signal. We therefore used a different approach developed to calculate the actuator's input signals. The ultimate objective here was to find the actuator input signal that would drive the simulator to ideally obtain the same rear drop-out acceleration measured on the road. We measured the system transfer function between the simulator's

6

numerical signal input and the vertical acceleration at the rear dropout of the test bicycle mounted on the simulator. We used the same cyclist and the same bike as we used for on-road measurements. Cyclist posture was controlled by the stem force.

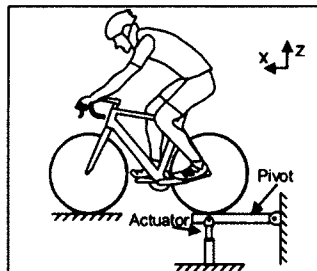


Fig. 5: Rear section of the road simulator

For non-linearity verification, the transfer function was measured six times with different signal amplitudes covering the full amplitude range of the device. Fig.6 reveals the average transfer function along with the transfer function with maximum and minimum amplitudes. The maximum amplitude variation span of the transfer function was less than 1 dB; this was satisfactory evidence by which to assume that the system behaves linearly.

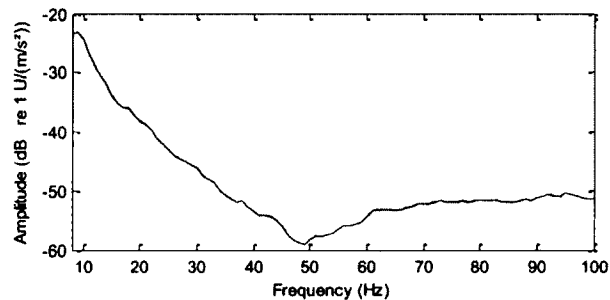


Fig. 6: Transfer functions between the simulator input signal and the vertical rear dropout acceleration (Z). Solid line: average transfer function
Dashed lines: minimum and maximum limits of the transfer function

The impulse response corresponding to the system transfer function was calculated using the inverse Fourier transform. The resulting time signal corresponds to the FIR digital filter coefficients of the system. To calculate the required actuator input, the expected rear dropout acceleration time signal must simply be filtered.

7

To evaluate the road simulator's replication capability, road measurements at 26 km/h were used to calculate the input actuator signals. Due to actuator velocity limits, it was not possible to reproduce higher speed excitation. The simulator mainly creates vertical displacement under the wheels. This leads to speculation as to how well the horizontal acceleration can be replicated in view of vertical displacement only.

Results are shown in the two graphs of Fig. 7. These graphs compare the PSD of the road signal with the signal measured on the simulator. The top graph shows the horizontal acceleration (X) and the bottom displays vertical acceleration (Z).

The horizontal acceleration generated by the simulator is lower than the road values with an average difference of 7 dB. The RMS value is also 50% lower than road RMS value. The road and simulator vertical acceleration PSD and RMS are very similar with the curves showing a 3 dB difference in range. Using the correction with the transfer function to account for the dynamic response of the actuators thus provides reliable results. The simulator RMS value is only 6% below the road value. Kurtosis values are also similar.

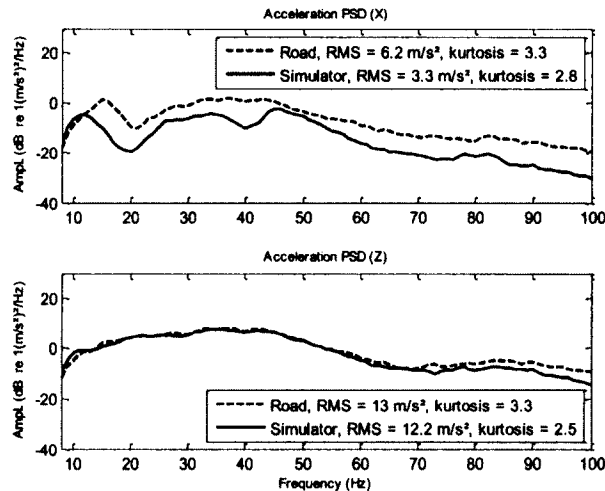


Fig.7: Comparison between the average measured PSDs in the X and Z axes for the road and the simulator. The RMS and kurtosis values of the accelerations at the rear dropout are also provided. Bike velocity is 26 km/h

Discussion

In elucidating the physics related to the vibration behaviour of road bikes, it has been determined that road measurements are quite difficult to perform and results are often unreliable [2]. Several important parameters such as the cyclist's posture, speed, road profiles etc., all strongly influence vibration measurement. On the road, the cyclist's attention is focused on guiding and propelling the bike and it may be difficult to pay sufficient attention to other issues. This highlights the advantage of developing apparatus and techniques to "bring the road to the lab". Moreover, lab measurements can be performed in a controlled environment all year round. The input impedances related to the human body are known to be non-linear [6] and this is certainly the case for the hands and buttocks during cycling. To overcome this difficulty, one classical approach is to take measurements at the running condition amplitude [7]. Laboratory measurements enable control over the excitation amplitudes.

The techniques presented in this work both have limitations, advantages and disadvantages. Neither succeeds in perfectly mimicking road excitation. For example, more work is needed on the treadmill to modify the belt surface in order to increase high frequency content. This would however require a significant amount of work because surface modification is based on a trial and error approach and only a single profile would be obtained. The limited stiffness of the plate supporting the belt may be responsible for the high frequency limitation. Guaranteeing good measurement repeatability is a big challenge in bike testing. Measurement repeatability on the treadmill was found to be inferior to repeatability using the simulator. Notwithstanding these limitations, we believe that the realistic aspects provided by the cyclist pedaling and steering the bike under loading conditions makes the treadmill suitable for perception and qualitative testing.

On the road, vertical and horizontal forces are applied to the wheels of the bike. The simulator generates vertical displacement only. It should be noted that this is no different than what is used in NVH studies in the automobile industry. The requirement to generate accurate horizontal excitation is also somewhat alleviated by the fact that vertical forces predominate. The vertical acceleration average power measurement is 4 times greater than horizontal power.

The simulator technique requires that we use an in-situ road measurement to calculate the actuator's input signals. The displacement generated by the simulator can be associated with a specific "road profile". Different roads could conceivably be profiled to constitute a data bank for testing bikes in different conditions. This is likely the major advantage of the simulator. Moreover, when comparing dynamic behaviour, the simulator allows exactly the same profile to be played when different bikes are tested or when components are swapped.

Table 1 provides a summary of the major features of the two techniques tested in this research, based on the current stage of development of our testing apparatus.

Table 1: Features of the excitation technique tested in this study

	Treadmill	Simulator
Features	<ul style="list-style-type: none"> - Very similar to road conditions: wheels are rolling; the cyclist pedals normally - Vertical and longitudinal excitation forces - It is possible to test one wheel at a time 	<ul style="list-style-type: none"> - Very good replication for Z - Road data bank available - Good repeatability - Good control over the excitation amplitudes and features - Ideal for bike comparison and perception evaluation.
Limitations	<ul style="list-style-type: none"> - Difficult to replicate variety in road conditions - Repeatability is average - Inherent periodicity in the excitation signal - Changing the road profile is costly and time-consuming 	<ul style="list-style-type: none"> - Vertical excitation only; horizontal excitation is not replicated as accurately as the vertical one - Powerful actuators are required for rough-surface roads

Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge financial support from the National Science and Engineering Council of Canada (NSERC) and the participation of Cervélo and Vroomen-White Design.

References

- [1] Adams, D.E and al., "Lab Lessons Learned-Part 2: Road Quality Determination Using Vehicle Data", *Experimental techniques*, vol. 30, no. 1, pages: 61-66, 2007.
- [2] Richard, S, "Étude du comportement dynamique d'un vélo de route en lien avec le confort du cycliste", MSc. Thesis, Université de Sherbrooke, 2005
- [3] ISO 2631-1 (1997), *Mechanical vibration and shock -Evaluation of human exposure to whole-body vibration -Part 1: General requirements*
- [4] Richard, S. and Champoux, Y., Evaluation of road bike comfort using classical and operational modal analysis, *Proceedings of IMAC XXIII*, 2005.
- [5] Brassard, F, "Développement d'un simulateur de vibration pour vélo de route", under revision, 2010
- [6] Panzke, K.-J and Balasus, W , "Time dependence and non-linearity of the impedance of the human hand-arm system while exposed to intense vibration", *Int Arch Occup Environ Health*, 57 :35-45, 1985
- [7] Ewins, D.J., "Modal Testing Theory, Practice and application, 2nd edition Research Studies Press, 2000

B.4 Autorisation de publication

AUTORISATION D'INTÉGRATION D'UN ARTICLE ÉCRIT EN COLLABORATION À UN MÉMOIRE OU UNE THÈSE

Je (ou nous), soussignée(s), soussigné(s), co-auteur(s), co-auteur(s) de l'article intitulé :

. Excitation techniques for testing bike vibration transmission in the laboratory

reconnais (reconnaissons) que ledit article sera inclus comme partie constituante du mémoire



de la thèse

de l'étudiant(e) (nom) : Julien Lépine

inscrit(e) au programme de Génie mécanique

de la Faculté de Génie

de l'Université de Sherbrooke

En foi de quoi, j'ai (nous avons) signé cet engagement en un nombre suffisant d'exemplaires*

Signature

Date :

2013-12-13

Nom Julien Lépine

Coordonnées Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique

Signature

Date :

13/12/2013

Nom Yvan Champoux

Coordonnées Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique

Signature

Date :

13 dec. 2013

Nom Jean-Marc Drouet

Coordonnées Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique

* Un exemplaire pour l'étudiante, l'étudiant, un exemplaire pour chaque personne signataire et un exemplaire pour le Service des bibliothèques (à remettre avec le mémoire ou la thèse au moment du dépôt final).

ANNEXE C : EFFET DU TYPE D'EXCITATION

L'acte de conférence présenté dans cette annexe présente l'effet du type d'excitation sur le classement des roues de vélos

Auteurs et affiliation :

Julien Lépine : étudiant à la maîtrise, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique

Yvan Champoux, professeur, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique

Jean-Marc Drouet, professeur, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique

Date d'acceptation : Novembre 2012

Conférence : IMAC XXIX, Jacksonville

Référence : Lepine J, Champoux Y, Drouet J. Influence of Test Conditions on Comfort Ranking of Road Bicycle Wheels. *Conf Proc Soc Exp Mech Ser.* 2013

Titre en français : Influence des conditions d'essais sur le classement en confort des roues d'un vélo de route

C.1 Contribution au mémoire

Cet acte de conférence ajoute de l'information supplémentaire sur l'effet des types d'excitation sur le classement des roues de vélo. Une grande partie de l'information présente dans cet acte de conférence se retrouve également dans l'article du chapitre 6, car ce dernier est basé sur ce document.

C.2 Résumé en français

Au cours des dernières années, le confort dynamique de vélos de route est devenu très important dans l'industrie du vélo. Pour améliorer le confort, une grande variété de tests dynamiques (comme des essais de transmissibilité) est utilisée pour caractériser et comparer les vélos. Parce que ces tests impliquent généralement un cycliste et que les pneus ont un effet non linéaire sur le système, les

protocoles d'essai peuvent avoir un impact important sur les caractéristiques dynamiques et le classement en transmissibilité des vélos.

Dans le but d'établir de bonnes pratiques lorsque l'on compare la transmissibilité de différentes roues, ce document présente l'influence de plusieurs paramètres de test sur les VIB (vibrations induites au cycliste par la bicyclette) mesurées près des mains et des fesses. L'influence de deux surfaces d'excitation sur le comportement dynamique du vélo est étudiée : une surface d'excitation plane et une surface irrégulière qui déforme localement le pneu. L'effet du type d'excitation utilisé comme le bruit blanc, les impacts et l'excitation de route typique sont également étudiés. Et finalement l'effet de la masse du cycliste est aussi présenté.

La conclusion de cette étude montre que même si ces paramètres ont une influence significative sur les VIB, ils n'ont pas d'incidence sur le classement en transmissibilité de deux roues. Il convient toutefois de noter que les changements observés dans la posture et la position du cycliste peuvent influencer sur ce classement de roues. Il est donc fortement conseillé de contrôler la posture et l'attitude du cycliste sur le vélo pendant les essais.

C.3 Acte de conférence 3

Influence of Test Conditions on Comfort Ranking of Road Bicycle Wheels

Julien Lépine, MSc candidate (Engineering)
Dr. Yvan Champoux, Professor
Dr. Jean-Marc Drouet, Professor
VÉIUS Research Group, Department of Mechanical Engineering
Université de Sherbrooke,
2500 boul. de l'Université, Sherbrooke (Québec),
CANADA J1K 2R1

ABSTRACT

In the past few years, the dynamic comfort of bicycles has become a hot topic in the cycling industry. To improve comfort, a wide variety of dynamic tests is used to characterize and compare bikes. Because these tests usually involve a cyclist, and since the tires have a non-linear effect on the system, test protocols are expected to have an impact on the dynamic characteristics and bicycle ranking. With the objective of establishing good practices when comparing wheel comfort, this paper presents the influence of several test parameters on the vibrations induced to the cyclist at the hands and buttocks. The influence of two excitation surfaces on bicycle dynamics is studied: a flat excitation surface and an irregular surface that locally deforms the tire. The type of excitation, such as white noise, impacts and typical road excitation, are also investigated. Results with regard to the effect of the cyclist's mass are also presented. The conclusion of this study shows that even if those parameters have a significant influence on the vibration levels transmitted to the cyclist, they do not affect the transmissibility ranking of two wheelsets. It should be noted however that the changes observed in the cyclist's posture and position on the bicycle can affect wheelset ranking. Great care is therefore advised in controlling the cyclist's posture and attitude on the bicycle during the tests.

Keywords: Bicycle Dynamic Comfort, Bicycle Wheel, Vibrations Transmission, Vibration Measurement, Excitation Technique

INTRODUCTION

Vibrational comfort is a somewhat vague term used in several fields and is related to the level of vibration transmitted from vibrating objects to humans. Several studies have focused on vibrational comfort, especially in the field of health and safety at work and in the field of passenger transport. Two ISO standards have been developed to establish protocols to measure accelerations transmitted to humans [1, 2]. These standards serve as guidelines for measurement and analysis of the vibration level transmitted to humans taking into account human sensitivity to vibrations, which varies with frequency. The vibration transmitted to humans is also the subject of several studies in sports such as ice hockey [3], baseball [4] and golf [5]. The vibrational comfort of road bicycles is also an important issue for bicycle manufacturers and, in the past decade, has become an important design criterion for their products. In this regard, it is essential to have an in-depth understanding of the vibrational behaviour of the bicycle-cyclist system as well as an adequate assessment of the vibration induced to the cyclist/biker (VIB), [6, 7].

Of the main bicycle components, the vibrational behaviour of the wheels has received a lot of attention. Lépine *et al.* [8] and Petrone and Giubilato [9] have assessed differences in transmissibility of force and acceleration between wheels using test rigs that simulate the cyclist's weight. Olieman *et al.* [10] have compared wheel comfort with a cyclist riding on different roads. The acceleration at the saddle and handlebars was measured using the same bike for different sets of wheels. For the tested wheelsets, the results of this study did not show any significant difference in the VIB. Using in situ collected data, Giubilato and Petrone [11] have also compared the VIB in acceleration level using different sets of wheels. They observed significant differences in the VIB for different wheelsets. According to these results, the comfort ranking of wheels is related to the road surface condition. This same conclusion is also shared by *Cycling News* magazine [12, 13].

With regard to the aforementioned studies, there is no unanimous conclusion regarding the influence of the wheels on the VIB and ultimately, on the comfort ranking of wheels. Because test conditions such as the excitation level or the excitation surface seem to be related to the VIB, the aim of this study was to further investigate their influence on the VIB and on the comfort ranking of road bicycle wheels. Using the same bike, the VIB measured using two wheelsets are compared using two cyclists, four excitation types (white noise, road replication, shaker impact, treadmill impact) and two shaker contact surfaces (flat and dowel). This paper presents the results of this investigation.

METHODS

Two different wheelsets are used in this paper and identified as wheelset A and wheelset B. Their selection was based on a vibration transmissibility ranking carried out in a previous study [8]. According to the results of this previous study in which 6 wheels were tested, wheelset A is the one which transmitted most and wheelset B is the one which transmitted least.

All the tests are carried out using the same bicycle. Wheel tires are inflated at 8 bar. Two laboratory apparatuses are used: (1) a road simulator equipped with two hydraulic shakers enables us to control the vertical displacement under both wheels (Fig. 1a); (2) a homemade bicycle treadmill with a wooden dowel attached to the belt to generate an impact on the wheels (Fig. 1b).

During each test, the cyclist's posture is controlled as follows:

- The cyclist assumes as natural a position on the bike as possible, with the hands resting on (but not grasping) the brake levers.
- The cyclist applies and maintains a constant static vertical force at the hands. This force is measured using an instrumented stem.
- The bike cranks are fixed in a horizontal position with the left crank at the front.
- The cyclist does not pedal.

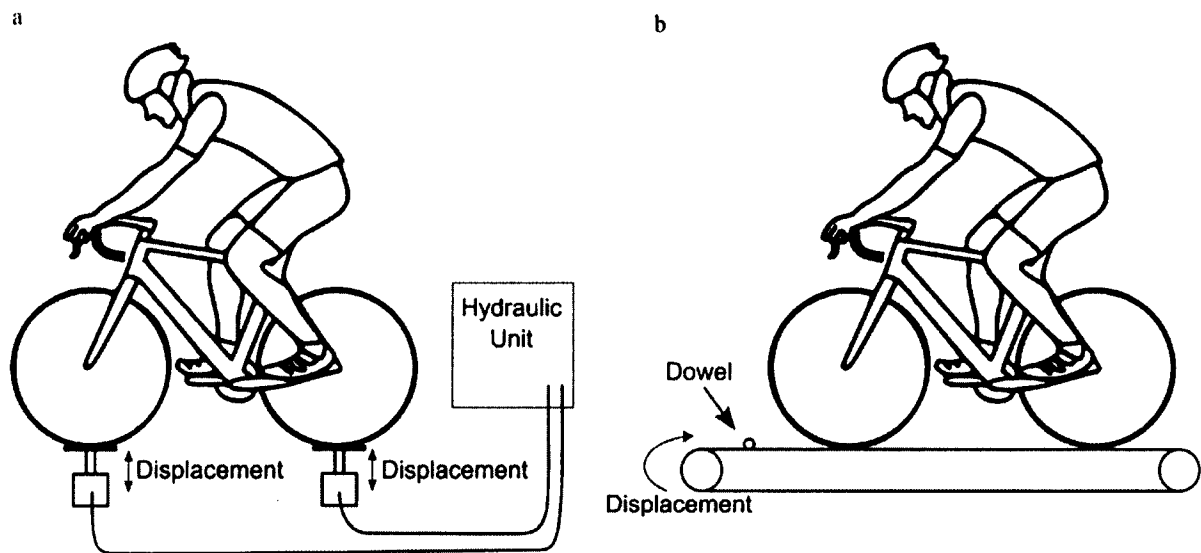


Fig. 1: a. hydraulic actuator excitation; b. treadmill excitation

To assess the VIB, the vertical acceleration (a_{VIB}) and the transmitted vertical force at the stem and at the saddle (F_{VIB}) are measured. At the saddle, the acceleration is measured using a PCB 352C68 accelerometer fixed on the upper part of the seat post and the force is measured using strain gauges located on the seat post (Figure 2). At the stem, the force is measured with an instrumented stem [14] and the acceleration is measured with a PCB 352C65 accelerometer attached near the handlebar clamp (Fig. 3).

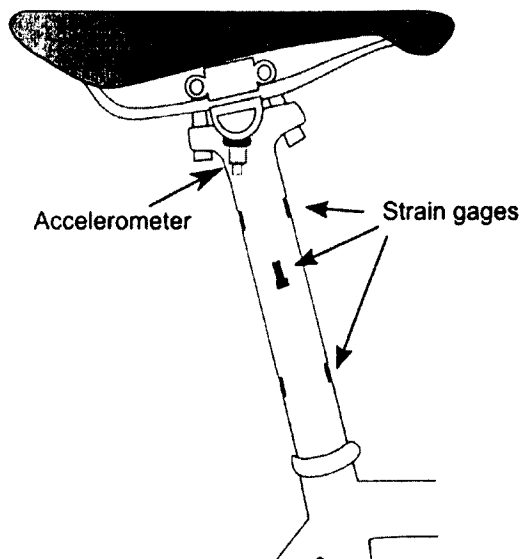


Fig. 2: Instrumented seat post

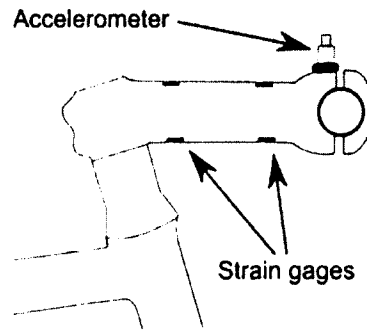


Fig. 3: Instrumented stem

The signals from the accelerometers and the force transducers at the stem and at the saddle are filtered according to standards ISO 2631 [2] (sensitivity of the hand in all directions) and ISO 5349 [1] (whole body sensitivity to vertical vibration) respectively. The RMS value of filtered signals is a measure to assess the VIB. This method allows us to compare the tests with a single RMS value, thus facilitating the analyses. In this study, the bicycle-cyclist system was considered as a stochastic system. Measurements were repeated in a random order to increase the power of the statistic test used to compare the wheelsets.

The three test condition categories considered are as follows:

- **Type of excitation**

White noise: Random white noise excitation up to 100 Hz with 0.3 mm of RMS amplitude generated by the hydraulic shakers (Figure 1a). This amplitude corresponds to the shakers' upper limit.

Road: Road excitation replication generated by the hydraulic actuators (Figure 1a) [15].

Shaker impact: Vertical impacts of 25 ms duration and 45 mm amplitude created by the hydraulic actuators (Figure 1a).

Treadmill impact: Vertical and horizontal impacts created by a 16 mm diameter wooden dowel attached to the treadmill belt rolling at 26 km/h (Figure 1b).

- **Shaker contact surface**

Flat: a flat surface in contact with the tires (Fig. 4a).

Dowel: a penetrative surface in contact with the tires (Fig. 4b).

- **Cyclist**

To evaluate the effect of the cyclist's mass, two cyclists are used as testers: cyclist #1-1.82 m, 70 kg; cyclist #2-1.80 m, 92 kg.

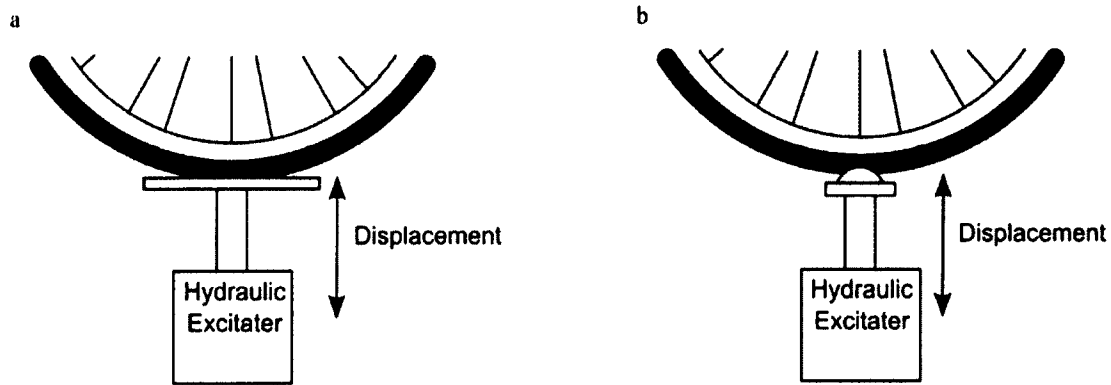


Fig. 4: Shaker contact surfaces: a. Flat; b. Dowel

RESULTS

The mean values of a_{VIB} and F_{VIB} of the test replications are presented for wheelsets A and B. For each of the three test condition categories, the results are displayed using four graphs in a 2x2 configuration representing (1) the mean values of a_{VIB} at the saddle (upper left graph); (2) the mean values of a_{VIB} at the stem (upper right graph); (3) the mean values of F_{VIB} at the saddle (lower left graph); (4) the mean values of F_{VIB} at the stem (lower right graph). Test results are also presented with a confidence interval at 95% estimated with Fisher's LSD (least significant difference) method [16]. To ensure the validity of this method, the normality of the RMS value residues distribution has been checked.

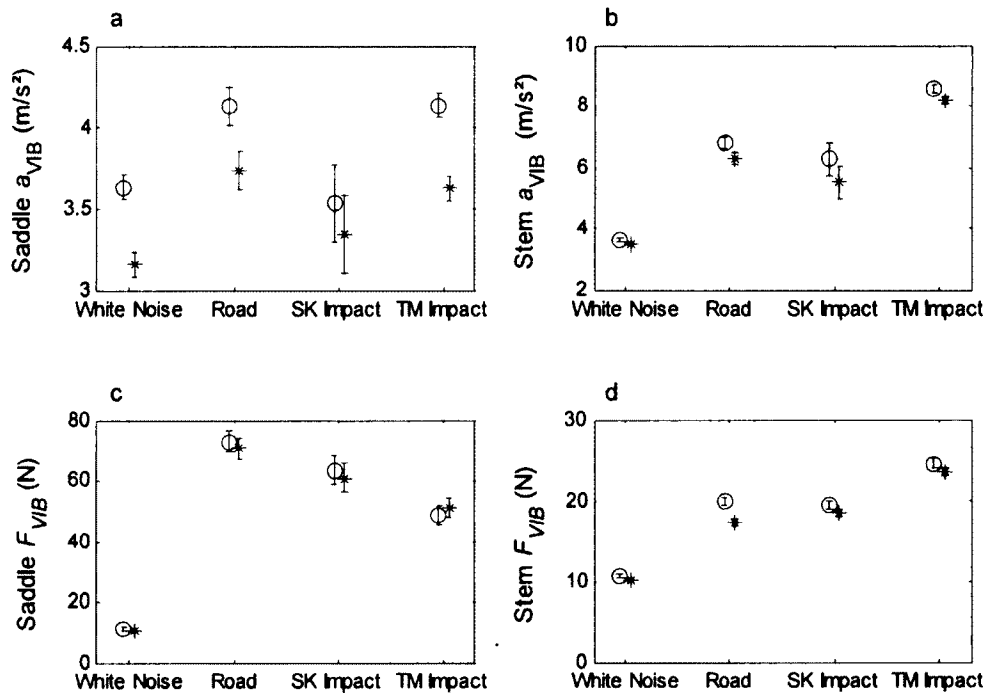


Fig. 5: Effect of the excitation type in discriminating between wheelset A (○) and wheelset B (*) with cyclist #1. SK impact means shake impact. Treadmill impacts (TM impact) were applied to the rear wheel only for graph a and c and to the front wheel only for graph b and d. Uncertainty bars correspond to high and low end values of 95 % confidence interval.

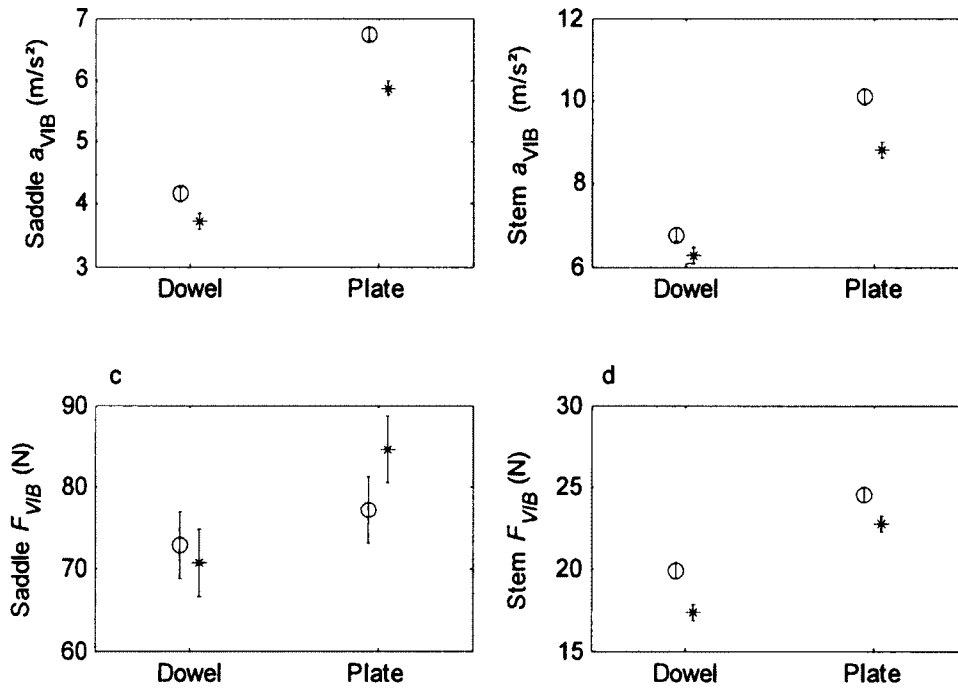


Fig. 6: Effect of the excitation type in discriminating between wheelset A (O) and wheelset B (*) with cyclist #1. Uncertainty bars correspond to high and low end values of the 95 % confidence interval.

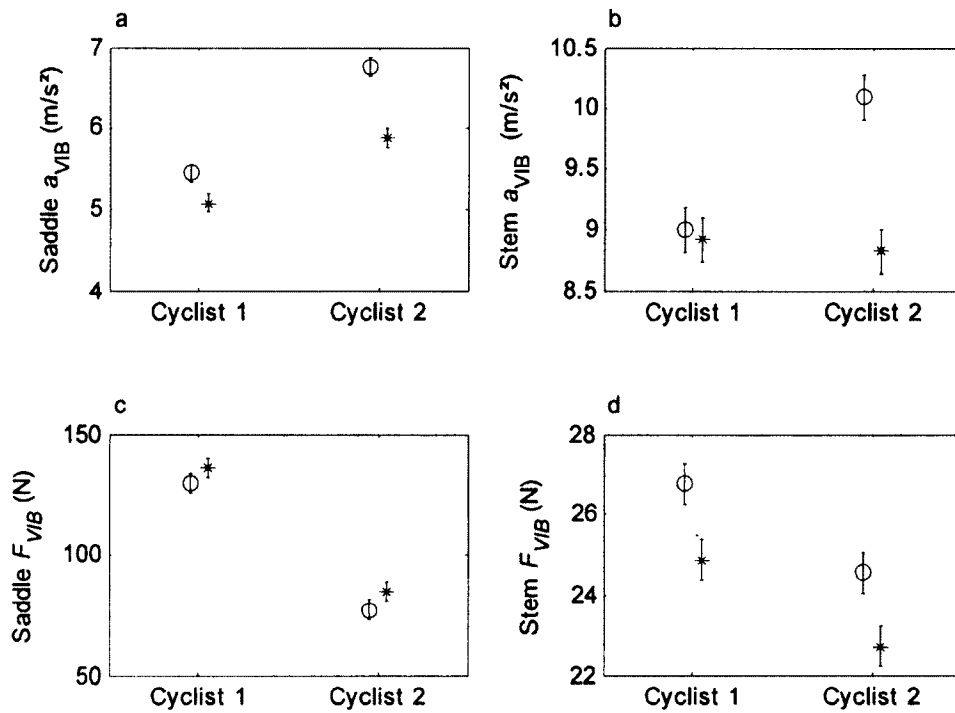


Fig. 7: Effect of the cyclist's mass in discriminating between wheelset A (O) and wheelset B (*) with cyclist #1. Uncertainty bars correspond to high and low end values of the 95 % confidence interval.

DISCUSSION

As shown by the results presented in this paper, it is possible to establish a transmissibility ranking of wheels based on the VIB in terms of acceleration and transmitted force. The VIB due to wheelset A is on the whole higher than to the one with wheelset B. White noise and treadmill impacts excitations only allow us to significantly distinguish between wheelset A and wheelset B based on a_{VIB} at the saddle (Fig. 5a). Road excitation allows us to significantly distinguish between wheelset A and wheelset B based on a_{VIB} at the saddle and stem and based on F_{VIB} at the stem (Fig. 5a, 5b, 5d). Shaker impact excitation only allows us to significantly distinguish between wheelset A and wheelset B based on a_{VIB} at the stem (Fig. 5b). No significant difference between wheelset A and wheelset B can be established using F_{VIB} at the saddle. Treadmill impact excitation allows us to significantly distinguish between wheelset A and wheelset B based on a_{VIB} at the saddle and the stem (Fig. 5a, 5b).

Both shaker contact surfaces yield similar results when it comes to distinguishing between wheelset A and wheelset B (Fig. 6). However, lower values of a_{VIB} and F_{VIB} at both the saddle and the stem are observed when the excitation surface is penetrating into the tires (dowel).

Even though results presented in Fig. 5 and 6 were obtained with cyclist #1, measurements for cyclist #2 were also carried out. Results for cyclist #2 exhibit the same trend as those presented for cyclist #1. Nonetheless, and as shown on Fig. 7, results for both cyclists differ in level. Higher acceleration levels are transmitted to cyclist #2 but higher force levels are transmitted to cyclist #1.

Some precautions were taken during acceleration and force measurements to reduce the effect of cyclist inter-variability. It was observed that the cyclist's influence on the vibrational behaviour of the bicycle is not constant. The cyclist always moves slightly on the bicycle even if he tries to maintain the same posture and attitude. These small postural displacements are detrimental to the repeatability of the tests. Proper statistical analysis must be performed for these tests to be compared.

CONCLUSION

With the objective of establishing good practices when comparing wheel comfort, this paper presented the influence of several test parameters on the vibrations induced to the cyclist at the hands and buttocks. The influence on the bicycle dynamics of two excitation surface was studied: a flat excitation surface and an irregular surface that locally deforms the tire. The type of excitation, such as white noise, impacts and typical road excitation, were also investigated. Results with regard to the effect of the cyclist's mass are presented. Even if these parameters have a significant influence on the vibration levels transmitted to the cyclist, they did not affect the transmissibility ranking of the two wheelsets used in this study. It should be noted however that observed changes in the cyclist's posture and attitude on the bicycle can impair measurement of a_{VIB} and F_{VIB} and hence affect the wheelset ranking. Great care should therefore be taken to control the cyclist's posture and attitude on the bicycle during the tests. Even with a proper posture and attitude control, measurements must be considered as a result of a stochastic process. No conclusion can be drawn on the basis of a single measurement. Tests must be replicated and statistically analysed.

REFERENCES

- [1] ISO 5349-1, "Mechanical Vibration - Measurement and Evaluation of Human Exposure to Hand-Transmitted Vibration - Part 1: General Requirements," 2001.
- [2] ISO 2631-1, "Mechanical Vibration and Shock - Evaluation of Humain Exposure to Whole-Body Vibration - Part 1: General Requirements," 1997.
- [3] Hunt, L., and Garcia, I., "Implementation of a Vibration Absorber for Composite Hockey Goalie Sticks," *Procedia Engineering*, Vol. 34, (0) p. 349-354, 2012.

- [4] Russell, D. A., "Bending Modes, Damping, and the Sensation of Sting in Baseball Bats," p. 11-16, 2006.
- [5] Roberts, J. R., Jones, R., Mansfield, N. J., "Evaluation of Vibrotactile Sensations in the 'Feel' of a Golf Shot," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 285, (1-2) p. 303-19, 2005.
- [6] Champoux, Y., Richard, S., and Drouet, J. -, "Bicycle Structural Dynamics," *Sound and Vibration*, Vol. 41, (7) p. 16-24, 2007.
- [7] Wojtowicki, J. -, Champoux, Y., and Thibault, J., "Modal Properties of Road Bikes Vs Ride Comfort," Vol. 1, p. 648-652, 2001.
- [8] Lépine, J., Champoux, Y., and Drouet, J. M., "Technique to Measure the Dynamic Behavior of Road Bike Wheels," *Topics in Modal Analysis II*, Volume 6, p. 465-470, 2012.
- [9] Petrone, N., and Giubilato, F., "COMPARATIVE ANALYSIS OF WHEELSVIBRATION TRANSMISSIBILITYAFTER FULL BICYCLE LABORATORY TESTS," 2011.
- [10] Olieman, M., Marin-Perianu, R., and Marin-Perianu, M., "Measurement of Dynamic Comfort in Cycling using Wireless Acceleration Sensors," *Procedia Engineering*, Vol. 34, (0) p. 568-573, 2012.
- [11] Giubilato, F., and Petrone, N., "A Method for Evaluating the Vibrational Response of Racing Bicycles Wheels Under Road Roughness Excitation," *Procedia Engineering*, Vol. 34, (0) p. 409-414, 2012.
- [12] Zinn, L., "Getting the most from Your Post," p. 88-94, 2012.
- [13] Fretz, C., Legan Nick, and Zinn, L., "Tech and Training : Endurance Bike Test," p. 84, 2011.
- [14] Drouet, J., and Champoux, Y., "Development of a Three-Load Component Instrumented Stem for Road Cycling," *Procedia Engineering*, Vol. 34, (0) p. 502-507, 2012.
- [15] Lépine, J., Champoux, Y., and Drouet, J., "Excitation Techniques for Testing Bike Vibration Transmission in the Laboratory," Vol. 6, p. 35, 2011.
- [16] Montgomery, D.C., "Design and analysis of experiments," Wiley, Hoboken, NJ, 2009, .

C.4 Autorisation de publication

AUTORISATION D'INTÉGRATION D'UN ARTICLE ÉCRIT EN COLLABORATION À UN MÉMOIRE OU UNE THÈSE

Je (ou nous), soussigné(e)s, soussigné(s), co-auteur(s), co-auteur(s) de l'article intitulé :

Influence of Test Conditions on Comfort Ranking of Road Bicycle Wheels

reconnais (reconnaissons) que ledit article sera inclus comme partie constituante du mémoire

de la thèse

de l'étudiant(e) (nom) : Julien Lépine

inscrit(e) au programme de Génie mécanique

de la Faculté de Génie

de l'Université de Sherbrooke

En foi de quoi, j'ai (nous avons) signé cet engagement en un nombre suffisant d'exemplaires*

Signature

Date :

2013-12-13

Nom Julien Lépine

Coordonnées Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique

Signature

Date :

13/12/2013

Nom Yvan Champoux

Coordonnées Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique

Signature

Date :

13 déc. 2013

Nom Jean-Marc Drouet

Coordonnées Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique

* Un exemplaire pour l'étudiante, l'étudiant, un exemplaire pour chaque personne signataire et un exemplaire pour le Service des bibliothèques (à remettre avec le mémoire ou la thèse au moment du dépôt final).