

UNIVERSITÉ DE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE

**UNITE DE FORMATION ET DE RECHERCHE
SCIENCES ET TECHNIQUES DES ACTIVITÉS PHYSIQUES ET SPORTIVES**

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du grade de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE

Ecole Doctorale Sciences, Technologies, Santé
Spécialité : Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives

Par

Aneliya V. MANOLOVA

PROTOCOLE D'OPTIMISATION POUR LA CONCEPTION D'UN CADRE DE BICYCLETTE DE TYPE BMX A PARTIR DE L'ETUDE BIOMECANIQUE DE L'INTERFACE HOMME – MACHINE

Soutenu le 18 Décembre 2009

Devant le jury composé de :

Co-directeur de thèse :	W. BERTUCCI	Maître de conférences, HDR, Université de Reims, France
Directeur de thèse :	P. MILLET	Professeur d'université, Université de Reims, France
Rapporteur :	N. ZLATOV	Professeur associé, HDR Université de Cardiff, Royaume-Uni
Rapporteur :	J. MEDELLI	Médecin, CHU d'Amiens, Amiens, France
Membre du jury :	A. LODINI	Professeur d'université, Université de Reims, France
Membre du jury :	K. KOSTADINOV	Professeur associé, HDR, Université de Sofia, Bulgarie
Membre du jury invité :	P. LESTRIEZ	Maître de conférences, Université de Reims, France

UNIVERSITÉ DE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE
UNITE DE FORMATION ET DE RECHERCHE
SCIENCES ET TECHNIQUES DES ACTIVITÉS PHYSIQUES ET SPORTIVES

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du grade de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE

Ecole Doctorale Sciences, Technologies, Santé
Spécialité : Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives

Par
Aneliya V. MANOLOVA

**PROTOCOLE D'OPTIMISATION POUR LA CONCEPTION D'UN
CADRE DE BICYCLETTE DE TYPE BMX A PARTIR DE L'ETUDE
BIOMECHANIQUE DE L'INTERFACE HOMME – MACHINE**

Soutenue le 18 décembre 2009

Devant le jury composé de :

Co-directeur de thèse :	W. BERTUCCI	Maître de conférences, HDR, Université de Reims, France
Directeur de thèse :	P. MILLET	Professeur d'université, Université de Reims, France
Rapporteur :	N. ZLATOV	Professeur associé, HDR Université de Cardiff, Royaume-Uni
Rapporteur :	J. MEDELLI	Médecin, CHU d'Amiens, Amiens, France
Membre du jury :	A. LODINI	Professeur d'université, Université de Reims, France
Membre du jury :	K. KOSTADINOV	Professeur associé, HDR, Université de Sofia, Bulgarie
Membre du jury invité :	P. LESTRIEZ	Maître de conférences, Université de Reims, France

A ma mère, à mon père,

A tous ceux qui me sont

chers,...

REMERCIEMENTS

C'est avec mon enthousiasme le plus vif et le plus sincère que je voudrais rendre mérite à tous ceux qui (plus ou moins récemment), à leur manière m'ont aidé à mener à bien cette thèse.

Tout d'abord je désire exprimer ma profonde gratitude à **Monsieur William Bertucci, Maître de Conférences des Universités**, à **Monsieur le Professeur des Universités Alain Lodini** et à **Monsieur le Professeur des Universités Pierre Millet** qui m'ont accueillie au sein du Laboratoire d'Analyses des Contraintes Mécaniques (LACM-DTI) et qui ont acceptés de me diriger patiemment tout au long de ces années d'études. Leur œil critique m'a été précieux pour structurer et améliorer la qualité du travail.

Je suis très reconnaissante à **Monsieur Jean Medelli, Docteur en médecine** et à **Monsieur Nikolay Zlatov, Professeur associé de l'Université de Cardiff** d'avoir acceptés de juger mon travail. Et je remercie profondément **Monsieur Kostadin Kostadinov, Professeur associé de l'Université de Sofia** et **Monsieur Philippe Lestriez, Maître de Conférence des Universités** d'avoir accepté d'être membres du jury.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à **Monsieur Samuel Crequy, Ingénieur d'études** pour son aide constante dans la mise en place des différentes expérimentations, qui n'auraient pu être menées à bien sans lui.

Je remercie énormément **Monsieur Philippe Lestriez** pour sa disponibilité et son rôle précieux dans l'étude numérique de la déformation du cadre de bicyclette.

Toute ma gratitude à **Monsieur Patrick Bodart** et à **Monsieur Xavier Chimentin, Maître de Conférences des Universités** pour leur participation à ce travail, et l'aide qu'ils m'ont apportée.

Un grand merci à **Simon Rogier** pour avoir accepté de m'apporter son aide et à tous **les pilotes de BMX du club de Clairoix**, qu'ils soient tous assurés de ma gratitude.

Merci à toutes les personnes ayant relu, corrigé et commenté mon manuscrit et ayant ainsi participé à son amélioration.

Je voudrais tout particulièrement remercier Pierre sans qui rien de tout cela n'aurait été possible ainsi que sa famille qui a toujours été là pour moi.

Je clos ces remerciements en dédiant cette thèse de doctorat à ma famille qui ont su me soutenir dans les moments difficiles que j'ai pu traverser, et me faire profiter de leur bonne humeur.

« La vie, c'est comme une bicyclette, il faut avancer pour ne pas perdre l'équilibre. »

Albert Einstein

Le cadre assure la fonction de squelette de la bicyclette. Son rôle structurel est le transfert de l'énergie mécanique produite par le cycliste à la roue arrière. Moins le cadre dissipera d'énergie plus il sera efficient. Dans la pratique tout-terrain de cyclisme (BMX, VTT), le cadre est soumis à de fortes sollicitations du pilote et du terrain et des chocs qu'il engendre. En BMX, la conception empirique et les importantes sollicitations du cadre peuvent entraîner des endommagements pouvant aller jusqu'à la rupture de certains tubes. L'objectif de cette thèse est de proposer un protocole expérimental visant à optimiser la conception d'un cadre, grâce à l'étude biomécanique de l'interaction homme – machine. L'activité de BMX est choisie comme illustration de ce protocole. Pour cela, l'étude se déroule en 2 phases : 1) L'étude du cycliste, les forces qu'il applique sur le cadre et de l'inclinaison latérale qu'il provoque lors du pédalage debout sur les pédales ; 2) L'étude expérimentale de la déformation du cadre. A l'aide de jauges d'extensométrie, un modèle numérique d'analyse aux éléments finis est validé en condition statique. Puis un système de barre a été conçu pour simuler les forces appliquées sur les pédales par le cycliste, pour étudier la déformation du cadre ; Et enfin, en condition dynamique, la déformation du cadre est étudiée avec un pilote lors de différents tests (pédalage à diverses intensités, application d'une force isométrique maximale et un saut vertical) à l'aide de deux pédales instrumentées, d'un pédalier instrumenté et de jauges d'extensométrie. Les résultats de cette étude montrent que pour le cadre testé le tube de selle est celui qui subit le plus de déformation, et que la déformation du cadre est fortement liée à la composante verticale de la force appliquée sur la pédale. Ce protocole permet de comprendre l'interaction entre le pilote et la bicyclette. Et il est utile dans l'optimisation de la conception des cadres.

Mots Clés – Cyclisme · BMX · Cadre · Déformation · Forces appliquées sur la pédale

ABSTRACT

The structural role of the bicycle frame is to transfer the mechanical energy produced by the cyclist at the rear wheel. The less the bicycle frame dissipates energy the more it is. In off-road cycling (BMX, mountain bike), high loads are applied on the frame, from the pilot and from the field and the ground reaction. In BMX, the empirical design and the important part of stress can lead to the rupture of some tubes. The aim of this thesis is to propose an experimental protocol designed to optimize the design of a frame, by studying the biomechanics of the human – machine interaction. The activity of BMX is chosen as an illustration of this protocol. For this, the study takes place in 2 phases: 1) The study of the cyclist, the forces generated on the bicycle frame and the out of plane bending when he is pedaling standing on the pedals, 2) The experimental study of deformation of the frame. Using strain gages, a numerical model of finite element analysis is validated in static condition. Then a bar system was designed to simulate the forces applied to the pedals by the cyclist in order to study the deformation of the frame. And finally, in dynamic condition, the deformation of the frame is studied during a pilot doing different tests (cycling at various intensities, application of a maximum isometric strength and vertical jump), using two instrumented 3D pedals, an instrumented crank and strain gages. The results of this study show that the higher strain is localized in the seat tube and the strain of the bicycle frame is highly correlated to the vertical component of the pedal force. This protocol can allow understanding the interaction between the rider and the bicycle. And it could be a powerful tool in optimizing the design of bicycle frames.

Key Words – Cycling · BMX · Bicycle frame · Strain · Pedal forces

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	v
RÉSUMÉ.....	viii
ABSTRACT.....	ix
TABLE DES MATIÈRES.....	x
I. INTRODUCTION.....	15
II. CARACTERISTIQUES D’UN CADRE DE BMX.....	19
1. Géométrie du cadre.....	19
2. Les matériaux utilisés.....	20
2.1. Caractéristiques des matériaux.....	21
2.2. L’assemblage des tubes.....	21
3. Spécificités du cadre de BMX.....	22
4. Rôle du cadre dans la performance.....	23
4.1. Conception et rendement mécanique du cadre.....	25
4.2. Transfert de la puissance mécanique (perte, déformation, etc.).....	25
III. CARACTERISTIQUES DU PEDALAGE D’UN CYCLISTE.....	29
1. Caractéristiques biomécaniques du pédalage.....	29
2. Le cycle de pédalage.....	29
3. Caractéristique de la position de pédalage en BMX.....	32
4. Forces appliquées sur le cadre.....	35
4.1. Forces induites par le pilote.....	36

4.1.1. Au niveau des pédales.....	36
4.1.1.1. Détermination des forces efficaces	37
4.1.1.2. Index d'efficacité du pédalage (IEP).....	40
4.1.1.3. Quantification des forces appliquées sur les pédales	43
4.1.2. Au niveau du guidon.....	45
4.1.3. Au niveau de la selle	47
4.2. Forces induites par le pilotage et par le terrain	47
IV. ETUDE BIOMECHANIQUE DE L'INTERFACE HOMME – MACHINE.....	49
1. Etudes expérimentales des caractéristiques physiques des pilotes de BMX et de l'inclinaison du cadre lors du pédalage.....	49
1.1. Mesures des qualités physiques lors de la phase d'accélération en BMX chez des pilotes entraînés.....	49
1.1.1. Méthodes.....	52
1.1.1.1. Les sujets.....	52
1.1.1.2. Matériel et mesures	52
1.1.1.3. Les tests d'évaluation.....	55
1.1.1.3.1. Tests en laboratoire	55
1.1.1.3.2. Tests en conditions réelles	56
1.1.1.4. Statistiques	57
1.1.2. Résultats.....	57
1.1.3. Discussions	61
1.1.4. Conclusion	64

1.2. Détermination de l'angle d'inclinaison latérale maximale du cadre de BMX en condition de départ de compétition chez des pilotes entraînés	65
1.2.1. Méthodes.....	67
1.2.1.1. Les sujets.....	67
1.2.1.2. Matériel et mesures	67
1.2.1.2.1. Mesure de l'inclinaison latérale du BMX	68
1.2.1.2.2. Détermination de l'angle d'inclinaison latérale maximale du cadre de BMX (λ).....	69
1.2.1.3. Protocole	70
1.2.2. Résultats.....	71
1.2.3. Discussion	72
1.2.4. Conclusion	73
2. Etude expérimentale d'un cadre de BMX en fonction des caractéristiques de l'interface Homme – Machine.....	75
2.1. Protocole de validation d'une simulation numérique d'un cadre de BMX.....	77
2.1.1. Méthodes.....	77
2.1.1.1. Matériels et mesures.....	77
2.1.1.1.1. Le cadre de BMX.....	77
2.1.1.1.2. Position des jauges d'extensométrie	78
2.1.1.2. Modèle numérique	81
2.1.1.3. Protocole	82
2.1.1.3.1. Protocole expérimental.....	82

2.1.1.3.2. Protocole numérique	85
2.1.2. Résultats	86
2.1.3. Discussion	92
2.1.4. Conclusion	94
2.2. Etude expérimentale de la déformation du cadre en quantifiant la force appliquée sur la pédale par le pilote	95
2.2.1. Méthodes	95
2.2.1.1. Matériels et mesures	95
2.2.1.1.1. Le système de barres	95
2.2.1.1.2. Couple moteur et force maximaux appliqués par un pilote de BMX ...	96
2.2.1.2. Protocole	97
2.2.2. Résultats	98
2.2.3. Discussion	101
2.3. Mesures des déformations subies par le cadre de BMX en condition dynamique	102
2.3.1. Méthode	102
2.3.1.1. Matériels et mesures	102
2.3.1.2. Protocole	104
2.3.2. Résultats	105
2.3.3. Discussion	115
2.3.4. Conclusion	117
V. CONCLUSION.....	119
VI. PERSPECTIVES	122

BIBLIOGRAPHIE.....	123
ANNEXE A.....	132

I. INTRODUCTION

En cyclisme, l'optimisation de la performance repose sur plusieurs aspects : biomécanique, physiologique, psychologique, technico-tactique et technologique [Grappe 2005]. Si les quatre premiers aspects dépendent de l'entraînement du cycliste, le dernier aspect est entièrement dépendant du matériel utilisé.

La bicyclette est un élément essentiel dans la réalisation d'une performance en cyclisme. Depuis la « *Draisienne* » du Baron allemand Karl Von Drais en 1817, la bicyclette a continuellement évolué en forme et en innovations, pour atteindre sa forme actuelle en 1885 avec l'invention de John Kemp Starley d'un cadre dit « *en diamant* », où les deux roues sont de tailles identiques, et où le système de pédalage est placé à mi-chemin entre la roue avant et la roue arrière, avec un système de transmission par chaîne.

Le cadre assure une fonction structurelle de la bicyclette. Son rôle est de permettre la liaison des différentes parties mécaniques constituant la bicyclette (roues, guidon, pédalier, selle, etc.) et de supporter l'utilisateur et l'utilisation qu'il va en faire tout au long de sa durée de vie. Le cadre joue également un rôle mécanique essentiel en transférant l'énergie mécanique produite par le cycliste de la pédale à la roue arrière.

Actuellement, la forme la plus répandue d'un cadre est celle dite « *en diamant* ». Dans cette configuration, le cadre est constitué d'un assemblage de plusieurs tubes de formes, tailles, et épaisseurs différentes. Ces tubes sont assemblés entre eux selon différentes méthodes, et les angles entre les tubes peuvent varier.

La conception du cadre et le choix du matériau s'appuient généralement sur des méthodes empiriques. Néanmoins, le cadre doit répondre à plusieurs critères : 1) Les

normes de sécurité européennes, le cadre doit, par exemple, assurer une certaine sécurité à l'utilisateur en condition normale de pédalage ; 2) Le coût de développement industriel doit permettre un rapport optimal entre performance / sécurité et coût de production selon l'objectif de qualité du cadre ; et 3) L'esthétisme du cadre, c'est parfois ce dernier critère qui prend le pas sur la qualité.

En compétition, la sollicitation d'une bicyclette est beaucoup plus importante et intensive qu'en pratique loisir. Les cyclistes compétiteurs développent des forces plus importantes sur la bicyclette. Et dans le cas des pratiques tout-terrain (VTT, Bicycle Motocross), le cadre est soumis aux sollicitations du pilote, mais également à celles du terrain et aux chocs qu'il engendre. En Bicycle Motocross ou BMX, la conception empirique des cadres et les sollicitations plus importantes provoquées par les activités de compétition peuvent entraîner des endommagements pouvant aller jusqu'à la rupture de certains tubes. Il semble alors important de définir les contraintes que subit le cadre en condition réelle afin de répondre aux problèmes de conception.

L'objectif de cette thèse est de proposer un protocole d'expérimentation scientifique visant à accompagner et à optimiser la conception d'un cadre, grâce à l'étude biomécanique de l'interface homme – machine. L'activité de BMX, devenue discipline olympique en 2003 à Pékin, servira à illustrer ce protocole d'expérimentation.

L'étude se déroulera selon 3 axes majeurs. Dans une première partie, nous nous intéresserons aux caractéristiques physiques des pilotes de BMX et à l'inclinaison latérale du cadre. La puissance musculaire produite par la pilote lors du pédalage permettra d'estimer les forces appliquées sur le cadre lors du départ de type compétition. L'analyse vidéo de la technique de pédalage sera utile à l'estimation de l'angle d'inclinaison latérale

du cadre lors du départ de type compétition. Cette partie aura pour but d'étudier les paramètres entraînant des contraintes sur le cadre.

La seconde partie sera axée sur l'étude en déformation du cadre de BMX en trois temps. Dans un premier temps, une étude expérimentale en condition statique avec utilisation de jauges d'extensométrie sera réalisée pour valider un modèle numérique en utilisant la méthode de calculs aux éléments finis. Dans un deuxième temps, les forces appliquées par le pilote sur le cadre dans les conditions de départ de compétition seront quantifiées et appliquées expérimentalement à l'aide d'un système expérimental. Et enfin, dans un troisième temps, les déformations du cadre en conditions réelles de pédalage seront étudiées, et les données obtenues seront comparées aux résultats mesurés dans les expérimentations menées en conditions statique et dynamique.

Une dernière partie discutera les résultats, les intérêts et les perspectives de cette méthodologie dans le but de concevoir un cadre de bicyclette adapté aux exigences de sa discipline.

Liste des abréviations utilisées dans ce chapitre

ρ	:	Masse volumique	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
E	:	Module de Young	MPa
σ	:	Contrainte	MPa
ε	:	Déformation	$\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$
l	:	Longueur de manivelle	mm

II. CARACTERISTIQUES D'UN CADRE DE BMX

En cyclisme, le cadre assure la fonction de squelette de la bicyclette. Son rôle structurel est de transférer l'énergie mécanique produite par le cycliste de la pédale à la roue arrière, avec le moins de perte d'énergie possible. Ces pertes de puissances mécaniques peuvent être dues à la déformation élastique du cadre [Davis et Hull 1981], et à un mauvais équilibre de la structure et aux matériaux qui la composent.

Afin de concevoir un cadre répondant au mieux à la sollicitation de l'activité, il est nécessaire de connaître avec plus de précisions les forces qui s'appliquent sur le cadre : leurs emplacements, leurs directions, leurs amplitudes ainsi que leurs fréquences ; et de comprendre leurs influences sur le cadre.

Cette quantification des forces appliquées sur le cadre permettra d'étudier les contraintes auxquelles est soumis le cadre durant le pédalage, lors de compétitions ou d'entraînement. A la lumière de ces nouvelles connaissances, il serait alors possible d'optimiser la conception des cadres, comme par exemple, en renforçant ou en allégeant certaines zones, en utilisant de nouveaux matériaux, etc.

1. Géométrie du cadre

Toutes les bicyclettes modernes, sans système d'amortissement arrière possèdent une forme de cadre dite en « *diamant* ». Cette appellation provient de la forme en losange du cadre (Figure II-1). Un cadre classique est constitué de 6 parties, constituées de 8 tubes, les haubans et les bases étant de part et d'autre de la roue arrière.

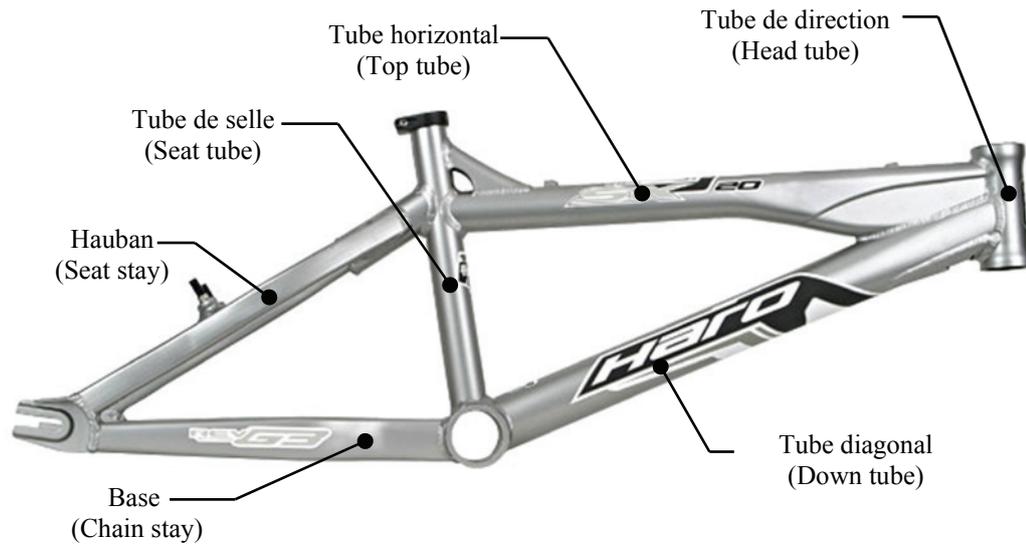


Figure II-1 Dénomination des tubes constituant le cadre de BMX.

Cependant, il existe d'autres géométries de cadre possibles, comme les cadres de type « *poutre* » qu'il est possible d'observer sur certains Vélos Tout-Terrain (VTT).

Sur la base de cette géométrie « standard », il n'existe pas de spécifications précises concernant les angulations des tubes, leur placement les uns par rapport aux autres, leur longueur, leur épaisseur, et leur forme. Ce choix est laissé libre aux concepteurs. Or la géométrie de la structure influence la déformation du cadre et donc son rôle dans la performance. A notre connaissance, la géométrie optimale d'un cadre n'a encore jamais fait l'objet d'une étude scientifique.

2. Les matériaux utilisés

Les premiers cadres ont été réalisés majoritairement en bois et assemblés à l'aide de renforts en acier. L'acier a ensuite été très largement utilisé dans la conception des cadres. Néanmoins, au début des années 1970, les cadres ont bénéficié du succès grandissant des bicyclettes qui permettaient un moyen de transport rapide et peu coûteux en énergie, et des progrès réalisés sur des nouveaux matériaux moins denses comme l'aluminium et ses

alliages [Davis et Hull 1981 ; Ashby et al. 2001]. Les cadres actuels peuvent être en acier, en alliage léger (Aluminium, Magnésium, Titane) ou en matériaux composites.

2.1. Caractéristiques des matériaux

Chaque matériau possède des caractéristiques mécaniques propres qui permettent de le classer selon différents aspects et en fonction des exigences de conception d'une structure. Certains paramètres sont déterminants dans le choix d'un matériau :

- La masse volumique (ρ , $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) caractérise la masse d'un matériau par unité de volume.
- Le module de Young (E , MPa) est la constante élastique qui, pour un matériau homogène isotrope, lie la contrainte (σ , MPa) à la déformation (ε , $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$). Il représente la rigidité du matériau.
- La limite d'élasticité est la contrainte à partir de laquelle un matériau ductile commence à se déformer de manière irréversible.
- La fatigue est un processus (succession de mécanismes) qui sous l'action de contraintes ou déformations variables dans le temps modifie les propriétés locales d'un matériau et peut entraîner la formation de fissures et éventuellement la rupture de la structure.

Il n'existe pas un matériau parfait, mais les progrès technologiques permettent d'obtenir des alliages ou des matériaux composites dont les propriétés mécaniques peuvent correspondre aux exigences de la discipline et ainsi, optimiser la performance.

2.2. L'assemblage des tubes

Dans le cas d'un cadre classique en « *diamant* », différentes techniques peuvent être envisagées pour assembler les tubes entre eux : assemblage à chaud (soudage ou brasage), utilisation d'adhésifs (*e.g.*, colles) et assemblage mécanique (*e.g.*, vis, clips). La méthode

de soudage est la plus courante pour les cadres métalliques. C'est aussi un point sensible dans la conception du cadre qui peut être source de rupture. Et dans le cas de tubes en composites, l'assemblage des tubes à l'aide d'adhésifs nécessitent des manchons aux jonctions des tubes qui alourdissent la structure, cela peut diminuer l'intérêt de tubes en composites [Ashby et al. 2001].

Certains cadres sont dits « *monobloc* », c'est-à-dire qu'ils sont constitués d'une seule pièce. Le matériau utilisé dans ce cas est un composite car techniquement la pièce est plus facile à réaliser [Pantelelis 2005].

3. Spécificités du cadre de BMX

La bicyclette de BMX possède un cadre relativement plus petit que dans toutes les autres disciplines de cyclisme. Il existe deux classes dans les compétitions de BMX : Standard et Cruiser. La différence entre ces deux classes réside dans la taille des roues : *i)* dans la classe « Standard », le diamètre total de la roue ne doit pas excéder 0,57 m une fois les pneumatiques gonflés ; *ii)* dans la classe « Cruiser », le diamètre total de la roue, une fois les pneumatiques gonflés, doit être au moins égal à 0,57 m.

La taille du cadre de BMX se mesure en fonction de la longueur du tube horizontal. Pour un pilote âgé de plus de 17 ans, la longueur du tube horizontal peut varier de 0,50 à 0,58 m en fonction de la taille du pilote et selon la marque. Il n'existe donc pas de consensus sur la taille des cadres, et sur leur conception.

La course de BMX se déroule sur une piste spécifique au BMX, d'une longueur totale variant de 300 à 400 m parsemée d'obstacles (bosse simple, double bosse, triple bosse, bosse pro, bosse décalée, table, plateau, piscine) et de virages plus ou moins relevés. Une piste de BMX comprend une rampe de départ, une ligne droite, au moins trois virages et plusieurs obstacles (Figure II-2).



Figure II-2 Piste de BMX des Jeux Olympiques de Beijing 2008

La petite taille du cadre confère au BMX une plus grande maniabilité, néanmoins, les puissances développées par les pilotes et les chocs engendrés par la piste pourraient induire de fortes contraintes sur ce cadre.

Le BMX est devenue discipline olympique en 2003, et il a été introduit aux Jeux Olympique de 2008 à Pékin, Chine [UCI, 2008]. C'est lors de cette compétition que deux françaises se sont imposées sur les deux premières places du podium, Anne-Caroline Chausson pour l'or et Laëtitia Le Corguillé pour l'argent. Les données issues de cette étude ont d'ailleurs été utilisées pour l'optimisation de leur préparation en vue de ces J.O. Il apparait important d'étudier le rôle que joue le cadre dans la performance et les forces qu'il subit.

L'étude de ces paramètres pourrait permettre d'optimiser les résultats obtenus en compétition et de reproduire ces performances lors de futures compétitions internationales.

4. Rôle du cadre dans la performance

La masse des cadres de BMX en alliage d'aluminium peut varier entre 1,5 et 2 kg. En considérant la bicyclette comme un assemblage de plusieurs composants, la masse du

cadre contribue à hauteur de 19% environ de la masse totale du BMX. La masse de la bicyclette est un facteur important de la performance en cyclisme. Elle influence la capacité à accélérer rapidement, et elle facilite la performance quand le terrain possède un dénivelé positif [Hull et Bolourchi 1988].

Le cadre assure également le squelette mécanique de la bicyclette, c'est lui qui maintient le positionnement de tous les composants qui constituent la bicyclette. Il permet la transmission à la roue arrière de l'énergie mécanique produite par le pilote lors de la phase motrice principale sur la pédale.

Néanmoins, la transmission d'énergie n'est pas intégrale, une partie plus ou moins grande se dissipe dans la déformation du cadre, et dans certains éléments mécaniques (*e.g.*, perte de 3-5 % de la puissance totale liée à la transmission par chaîne [Millet et Candau 2002]). La capacité d'un cadre à transmettre plus ou moins d'énergie est appelée « efficacité du cadre » [Davis et Hull 1981_a].

Un cadre dont l'efficacité est grande doit pouvoir délivrer à la roue arrière presque toute l'énergie mécanique produite au niveau de la pédale par le cycliste lors de la phase motrice principale avec très peu d'énergie dissipée dans la distorsion du cadre [Davis et Hull 1981_a].

Un cadre doit allier deux propriétés essentielles : une grande rigidité qui lui conférera une grande efficacité dans le transfert de l'énergie mécanique en minimisant la déformation du cadre et une masse totale faible [Arola et al. 1999]. En utilisant une simulation aux éléments finis, Davis et Hull (1981_a) rapportent qu'un cadre en aluminium permettrait un gain de masse de 20% comparé au même cadre en acier, et une amélioration de l'efficacité de 3%. L'efficacité d'un cadre semble être grandement dépendante du matériau du cadre et de la géométrie de sa structure.

4.1. Conception et rendement mécanique du cadre

La conception de cadre dans des disciplines « Tout-terrain » pose un problème complexe exigeant un compromis entre une masse légère et une efficacité dans la transmission de la puissance mécanique, et une structure sûre, adaptée aux contraintes.

La masse du cadre et sa rigidité dépendent essentiellement du matériau qui le constitue. La sûreté d'un cadre représente la protection contre la rupture sous des conditions normales de chargement. La rupture peut survenir soit de manière brutale à partir d'une unique ou d'une série limitée de charges extrêmes, soit à partir de la fatigue provenant de l'accumulation de charges qui développent des contraintes pouvant entraîner la formation de fissures et qui peut aboutir à la rupture [Lorenzo et Hull 1999].

4.2. Transfert de la puissance mécanique (perte, déformation, etc.)

Davis et Hull (1981_a) ont utilisé une méthode hybride d'analyse des contraintes pour la prédiction de fatigue d'un cadre de vélo. En effet, les premiers cadres en aluminium ne possédaient pas une grande résistance en fatigue. Néanmoins, les cadres en aluminium permettent un gain de 20% de réduction de la masse et environ 3% d'efficacité supplémentaire comparé à un cadre identique en acier.

L'efficacité d'un cadre indique la capacité d'un cadre à absorber le moins d'énergie possible durant le pédalage. Donc lors de la transmission de l'effort du cycliste, un cadre très efficace dissipe très peu d'énergie.

Le cadre est analysé de deux façons différentes. Les auteurs ont d'abord analysé le cadre avec la méthode des éléments finis, en appliquant une force verticale (445 N) sur une pédale avec la manivelle horizontale ($l = 171$ mm). Puis ils ont étudié en situation réelle le

cadre en aluminium avec un vernis spécial (Brittle coating, Stresscoat) qui permet de visualiser les déformations subies par le cadre. Dans les deux protocoles, les plus grandes contraintes apparaissent au niveau de l'axe du pédalier.

Hull et Davis (1981) ont fait parti des premiers à étudier l'interaction cycliste-bicyclette. Ils ont mis au point un système de mesure permettant de mesurer au niveau de la pédale au cours du pédalage, les forces et les moments de force dans les 3 axes, ainsi que les angles de la manivelle et l'angle d'inclinaison de la pédale.

D'après ces auteurs, une connaissance détaillée de l'interaction pied-pédale est d'un grand intérêt pour de multiples raisons : *i)* La contrainte pied-pédale est nécessaire dans l'étude des blessures du genou (en particulier chez les cyclistes) ; *ii)* La contrainte pied-pédale est nécessaire dans l'étude de la fatigue musculaire de la jambe ; *iii)* La connexion pied-pédale est très importante car c'est elle qui dicte quels groupes musculaires sont disponibles pour faire avancer la bicyclette ; *iv)* La mesure de la charge sur les pédales permet d'obtenir la puissance fournie par le cycliste, et l'efficacité du pédalage ; *v)* Les contraintes appliquées sur la pédale par le pied sont utiles pour la conception de cadres de bicyclettes et d'équipements.

A l'aide de cette instrumentation (Hull et Davis, 1981), Davis et Hull (1981_b) ont étudié plusieurs types de connexion pied-pédale : *i)* Chaussures semelles souples ; *ii)* Chaussures semelles souples fixées par une sangle à l'avant du pied ; *iii)* Sangle et une chaussure légère avec une semelle renforcée en acier, afin de déterminer leur effet : 1) sur la fatigue du cycliste, 2) sur la puissance de pédalage et 3) sur l'efficacité du pédalage. L'utilisation de chaussure totalement fixée augmente l'efficacité de pédalage. Cela permet également de mettre en jeu un plus grand nombre de muscles.

Pour développer des cadres efficaces permettant de transmettre la puissance musculaire au mieux pour faire avancer la bicyclette, il est nécessaire d'analyser les

contraintes que le cadre subit. Le cadre est la composante principale de la bicyclette. Son poids est un facteur important de la performance : il influence la capacité à accélérer rapidement ; et il influence la performance en montée, car le cadre contribue à la plus grosse partie de la masse d'un vélo. Parmi les contraintes subies par le cadre, [Hull et Bollourchi \(1988\)](#) différencient les contraintes induites par le pilote, et celles induites par le terrain. Les contraintes induites par le pilote sont des charges induites par le poids et l'action musculaire du pilote, alors que les contraintes induites par le terrain sont induites par les irrégularités de la surface sur laquelle la bicyclette est en déplacement.

Ces auteurs ont étudié les contributions de ces contraintes induites par le pilote sur le cadre de bicyclette par analyse aux éléments finis. Quand le cycliste est assis, les contraintes sont appliquées en 3 endroits distincts : les pédales, la selle, et le guidon. Ils utilisent les valeurs que [Bolourchi et Hull \(1985\)](#) ont mesurées en ces 3 endroits (250N pour la force verticale sur la pédale, 260N pour la force verticale de la selle, et 120N pour le guidon), et ils les appliquent individuellement et simultanément pour déterminer les zones structurelles du cadre de basses et fortes tensions. Ils ont relevé des tensions maximales au niveau du tube de selle, au niveau de la selle et au niveau de l'axe du pédalier. Des tensions sont également relevées au niveau du pont entre les 2 bases arrière.

L'étude des comportements mécaniques du cadre au plus proche des conditions réelles ne peut se faire sans une analyse de l'interface pilote – BMX. Il est en effet primordial d'étudier l'influence du pilote sur le cadre de BMX.

Liste des abréviations utilisées dans ce chapitre

F_{Rmax}	: Force résultante maximale	N
F_R	: Force résultante	N
F_Z	: Force sur l'axe Z	N
F_X	: Force sur l'axe X	N
F_Y	: Force sur l'axe X	N
F_{Totale}	: Force totale	N
θ_M	: Angle entre la manivelle et l'horizontale	°
θ_P	: Angle entre la pédale et l'horizontale	°
α	: Angle d'application de la force résultante	°
F_{rad}	: Force radiale	N
F_E	: Force efficace	N
F_I	: Force inefficace	N
δ	: Angle entre la manivelle et la force résultante	°
IEP	: Index d'Efficacité de Pédalage	
IEI	: Index d'Efficacité Instantané	
Cad	: Cadence	tr·min ⁻¹

III. CARACTERISTIQUES DU PEDALAGE D'UN CYCLISTE

1. Caractéristiques biomécaniques du pédalage

Pour avancer et lutter contre les forces opposées à l'avancement, le pilote doit appliquer une force sur les pédales lors du mouvement de pédalage. La technique de pédalage est définie comme l'orientation de la pédale et la force appliquée sur la pédale en fonction du temps [Kautz et al. 1991].

Puisque le mouvement de pédalage est cyclique et contraint par la manivelle qui impose une rotation circulaire. L'orientation de la pédale en fonction du temps est un facteur important dans la détermination de la cinématique du pédalage. Quant à la force appliquée en fonction du temps, elle permet de renseigner sur la dynamique lors du pédalage [Kautz et al. 1991].

Pour orienter la pédale et appliquer la force, une synergie harmonieuse résultant d'actions de groupes musculaires antagonistes permet de mobiliser les articulations de la hanche, du genou et de la cheville, de manière à réaliser une rotation complète de la manivelle autour de l'axe du pédalier [Moussay et al. 2003].

2. Le cycle de pédalage

Pour comprendre le mouvement de pédalage, il est nécessaire de décomposer ce mouvement en différentes phases. Dans un premier temps, il est possible de décomposer le mouvement en 2 grandes phases de pédalage (Figure III-1) : 1) la première phase est la

descente de la pédale de 0 à 180°¹, cette phase est dite motrice. [Kautz et al. \(1991\)](#) ont montré que plus de 96% de la puissance totale est générée entre 0 et 180° lors d'un exercice à intensité sous-maximale (60 – 90% de la consommation maximale d'oxygène), et 2) la seconde phase correspond à la remontée de la pédale de 180 à 360°, cette phase est dite de récupération.

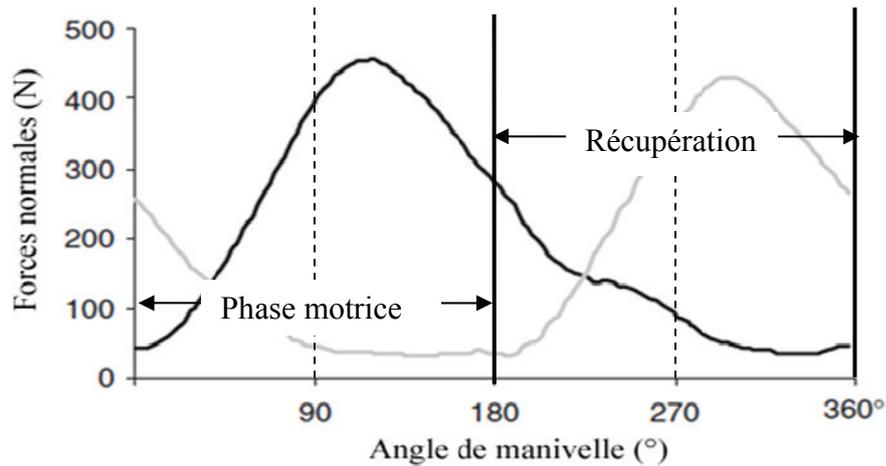


Figure III-1 Forces normales caractéristiques appliquées sur une pédale droite (ligne en noire) et sur une pédale gauche (ligne grise), lors d'une révolution de manivelle à une puissance de 300 Watts et à une fréquence de 90 rotations par minute, avec les deux grandes phases de pédalage : 1) Phase motrice (0 – 180°) et 2) Récupération (180 – 360°) [D'après [Mornieux et al. 2006](#)].

Le cycle de pédalage est néanmoins plus complexe, et avec l'utilisation de pédales à courroies ou de pédales automatiques, il est possible de décomposer le mouvement en 4 phases distinctes [[Henke et al. 1998](#) ; [Belluye et Cid 2001](#)] (Figure III-2) :

1. Le point mort haut (315 – 45°) : c'est la phase de transition entre la flexion et l'extension du membre inférieur. Elle correspond à une zone d'inactivité musculaire due à l'inhibition des muscles dans ce secteur angulaire [[Belluye et Cid 2001](#)].

¹L'origine du repère angulaire du cycle de pédalage (0°) correspond à la manivelle en position verticale avec la pédale en position haute.

2. La phase motrice principale ou de puissance ($45 - 135^\circ$) : elle correspond à l'extension du membre inférieur. C'est lors de cette phase que l'efficacité de pédalage est la plus importante.
3. Le point mort bas ($135 - 225^\circ$) : c'est la phase de transition entre l'extension et la flexion du membre inférieur. L'intensité de la force diminue, et la direction du vecteur force tendrait à la rendre inefficace [Belluye et Cid 2001].
4. La phase de récupération ou de tirage ($225 - 315^\circ$) : elle correspond à la flexion du membre inférieur. Lors de cette phase, trois cas peuvent apparaître :
 - a. Le membre inférieur n'exerce aucune action sur la pédale. Celui-ci repose sur la pédale et crée un couple résistant.
 - b. Le membre inférieur exerce une force de traction compensant soit une partie, soit la totalité du poids du membre inférieur à remonter.
 - c. Le membre inférieur exerce une force de traction supérieure au poids du membre inférieur à remonter.

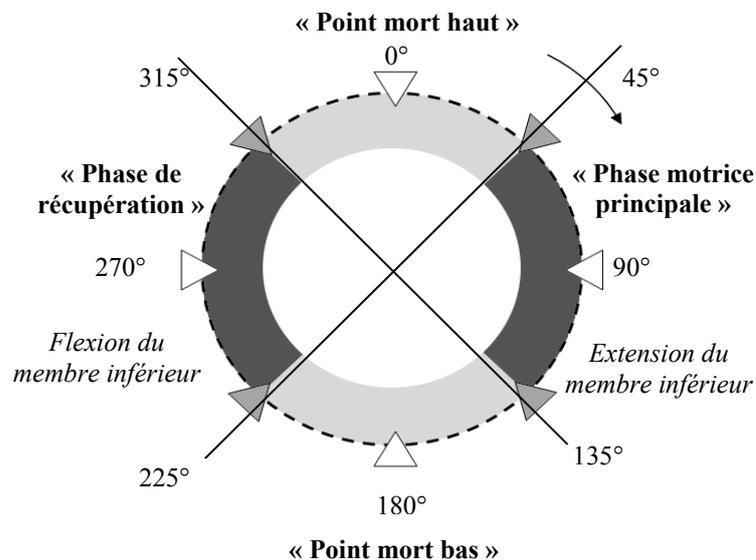


Figure III-2 Les différentes phases du cycle de pédalage : 1) la phase motrice principale ($45 - 135^\circ$), 2) le point mort bas ($135 - 225^\circ$), 3) la phase de récupération ($225 - 315^\circ$), et 4) le point mort haut ($315 - 45^\circ$) [D'après Henke 1998].

3. Caractéristique de la position de pédalage en BMX

Plusieurs auteurs ont étudié les différences de pédalage au niveau cinétique et cinématique entre la position assise et la position debout [Caldwell et al. 1998. 1999 ; Li et Caldwell 1998]. Les changements de positionnement provoqués par la position debout mènent à des patterns d'application de la force sur la pédale différents [Li et Caldwell 1998] (Figure III-3).

En effet, Caldwell et al. (1998) ont mis en évidence que lors du pédalage en position debout sur un terrain incliné de 8%, le pic de force (F_{RMax}) appliquée sur la pédale apparaît plus tardivement comparé à la position assise sur le même terrain incliné (155° vs. 101°, respectivement) (Tableau III-1), avec une composante horizontale plus réduite et une composante verticale augmentée.

Le changement de position agit également sur l'angulation de la pédale. En position debout, celle-ci est plus orientée vers l'avant lors du cycle de la manivelle comparée à la position assise sur terrain incliné (Tableau III-1), et l'angle de manivelle auquel ce pic d'inclinaison de la pédale apparaît est le plus bas pour la position debout [Caldwell et al. 1998].

Sur terrain incliné, pour une même puissance développée, F_{RMax} est significativement plus grande en position debout comparée à la position assise (965 N vs. 480 N, respectivement), soit le double. Et cette force maximale apparaît plus tardivement lors du cycle de manivelle en position debout comparée à la position assise sur un terrain incliné de 8% [Caldwell et al. 1998].

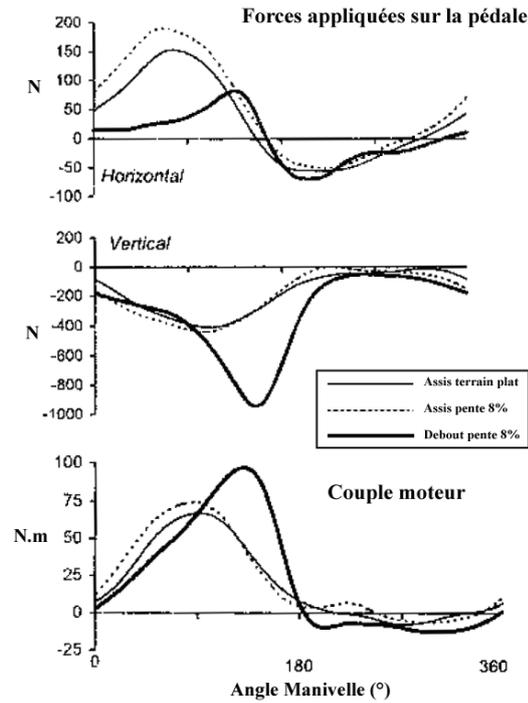


Figure III-3 Illustration des forces horizontale et verticale appliquées à la pédale, et du couple moteur dans 3 conditions de pédalage (Assis sur terrain plat, Assis et Debout sur terrain incliné de 8%) en fonction de l'angle de la manivelle [D'après Caldwell et al. 1998].

Ces auteurs ont également montré que le couple moteur maximal apparaît dans la position debout, et qu'il apparaît plus tardivement dans la phase motrice principale comparé aux autres conditions (Tableau III-1). Cette constatation a été rapportée également par Caldwell et al. (1999).

Tableau III-1 Données cinématiques et cinétiques du pédalage dans les 3 conditions étudiées [D'après Caldwell et al. 1998].

	Assis Terrain plat	Assis Pente 8%	Debout Pente 8%
	Moyenne (\pm Ecart-Type)		
F_R max (N)	438 (\pm 68)	480 (\pm 73)	965 (\pm 190)
Angle de manivelle (°)	107 (\pm 13)	101 (\pm 9)	155 (\pm 9)
Couple max (N·m)	68 (\pm 12)	77 (\pm 11)	101 (\pm 13)
Angle de manivelle (°)	94 (\pm 7)	86 (\pm 7)	131 (\pm 9)
Angle pédale max (°)	112 (\pm 8)	122 (\pm 9)	98 (\pm 6)
Angle de manivelle (°)	98 (\pm 9)	91 (\pm 9)	102 (\pm 9)

Le changement de posture de la position assise à la position debout a de profonds effets sur la façon dont est appliquée F_R sur la pédale (Figure III-4).

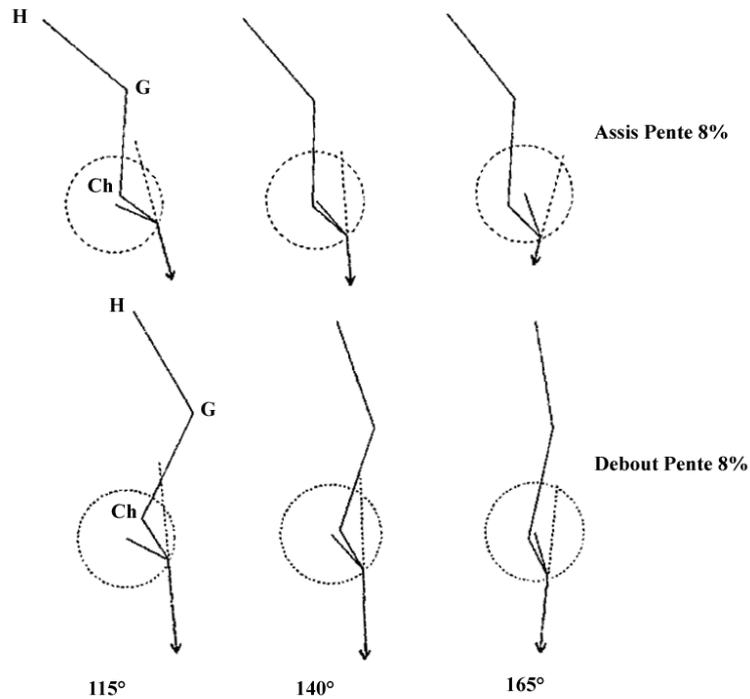


Figure III-4 Illustration de la relation entre la force résultante (F_R) et l'orientation des segments du membre inférieur dans 2 positions (Assis et debout sur une pente inclinée de 8%) durant la phase motrice principale du cycle de la manivelle (115°, 140°, et 165°). H, G et Ch représentent les articulations de la hanche, du genou et de la cheville, respectivement [D'après Caldwell et al. 1999].

En effet, en position debout, l'articulation de la hanche, l'articulation du genou et le centre de gravité du corps sont déplacés vers l'avant et vers le haut en comparaison à la position assise (Figure III-5) [Caldwell et al. 1998, 1999 ; Li et Caldwell 1998].

D'après Caldwell et al. (1998), la position debout et la suppression du point de contact avec la selle permettent au cycliste : *i*) d'explorer des changements dans la coordination segmentaire ce qui permet de générer un couple plus efficace ; *ii*) de créer le lien mécanique entre le guidon et les forces appliquées sur les pédales à travers le segment du tronc ; *iii*) de permettre au poids de tout le corps de participer à la génération du couple moteur comme force non-musculaire (*i.e.*, liée à la gravité et à l'inertie).

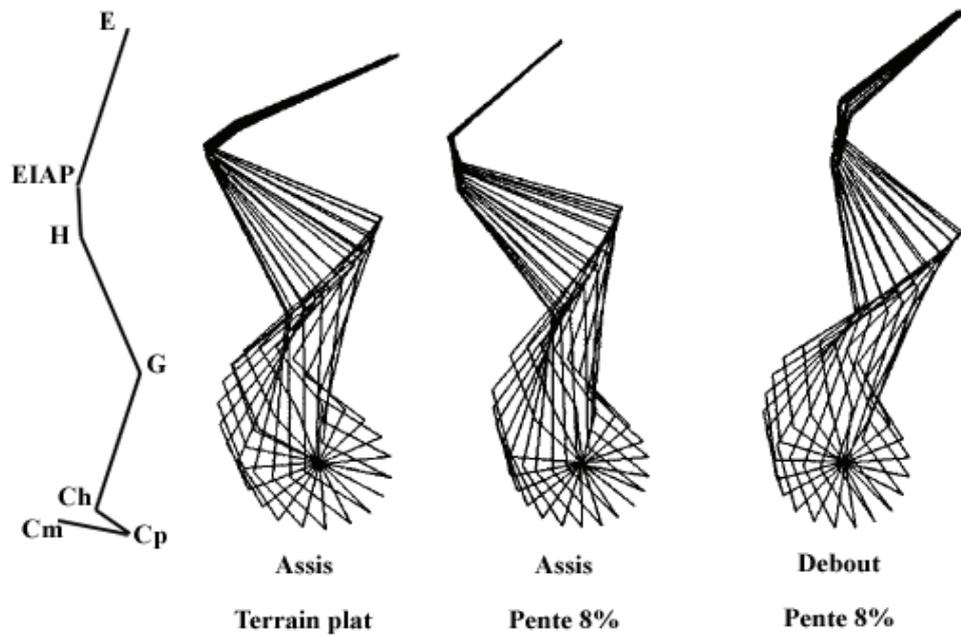


Figure III-5 Représentation en kinogramme d'un cycle de pédalage pour un cycliste dans 3 conditions différentes. Les segments sont reliés par des marqueurs à l'épaule (E), à l'épine iliaque antéro-postérieure (EIAP), à la hanche (H), au genou (G), à la cheville (Ch), au centre de l'articulation pédale – manivelle (Cp) et au centre de rotation de la manivelle (Cm) [D'après Li et Caldwell 1998].

Le changement de position modifie la contribution relative des sources musculaire et non-musculaire (*i.e.*, forces gravitationnelle et inertielle) sur la force de la pédale mesurée [Caldwell et al. 1998]. Il augmente la contribution des sources non-musculaires, et d'après Caldwell et al. (1998), ce sont ces changements qui augmentent le couple de manivelle maximum qui apparaît plus tardivement lors de la phase motrice principale de la manivelle en position debout. La contribution de la force d'inertie aux forces appliquées sur la pédale est indiquée par le mouvement vertical de la hanche [Caldwell et al. 1998, 1999].

4. Forces appliquées sur le cadre

La conception d'un cadre de bicyclette efficace et la compréhension de son comportement lors du pédalage nécessitent le recours à des analyses de contraintes sur la structure et le matériau qui la compose. Pour mener à bien ces analyses, il est nécessaire de

connaître les forces externes appliquées sur la bicyclette lors du pédalage. Ces forces peuvent se décomposer en 3 types : les forces induites par le pilote, les forces induites par le pilotage et les forces induites par le terrain [Hull et Bolourchi 1988 ; Stone et Hull 1993 ; Stone et Hull 1995 ; De Lorenzo et Hull 1999_{a,b} ; McKenna et al 2002].

4.1. Forces induites par le pilote

Les forces induites par le pilote sont les forces appliquées aux points de contact Pilote / Bicyclette [Stone et Hull 1993]. Ce sont les forces induites par le poids du pilote et par son action musculaire lors du pédalage [Hull et Bolourchi 1988 ; Stone et Hull 1995 ; De Lorenzo et Hull 1999_a].

En position assise, les points de contact Pilote / Bicyclette sont au nombre de trois : les pédales, le guidon et la selle. Tandis qu'en position debout sur les pédales (position dite « de danseuse »), aucune force n'est développée sur la selle.

4.1.1. Au niveau des pédales

Lors du pédalage, le cycliste applique une force sur la pédale (F_R) (Figure III-6) qui est destinée à lutter contre les forces opposées à l'avancement et à faire avancer l'ensemble bicyclette – cycliste. F_R peut être décomposée en deux forces : la première est dite efficace car elle agit directement sur la manivelle pour faire tourner celle-ci. La seconde est dite inefficace, car son orientation ne permet pas de générer un mouvement utile au pédalage.

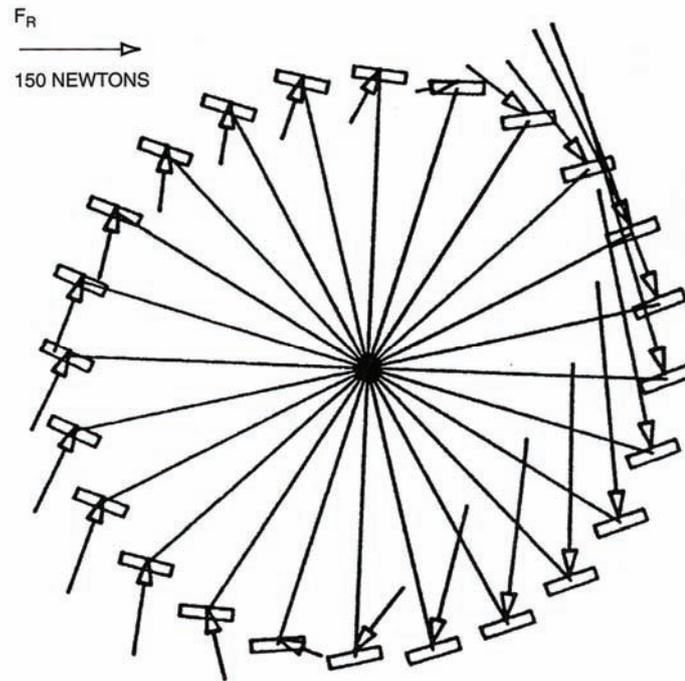


Figure III-6 Illustration de la force résultante lors d'une révolution complète de manivelle chez un cycliste [D'après Grappe 2005].

4.1.1.1. Détermination des forces efficaces

A partir des forces tridimensionnelles appliquées sur les pédales (*i.e.*, la force normale (F_Z , N), la force antéro-postérieure (F_X , N), et la force médio-latérale (F_Y , N)), il est possible de mesurer la force totale appliquée sur chaque pédale (F_{Totale} , N). Il est nécessaire de coupler ces mesures de force avec les mesures de l'angle formé entre la manivelle et la verticale (θ_M , degrés) et de l'angle formé entre la pédale et l'horizontale (θ_P , degrés) (Figure III-7).

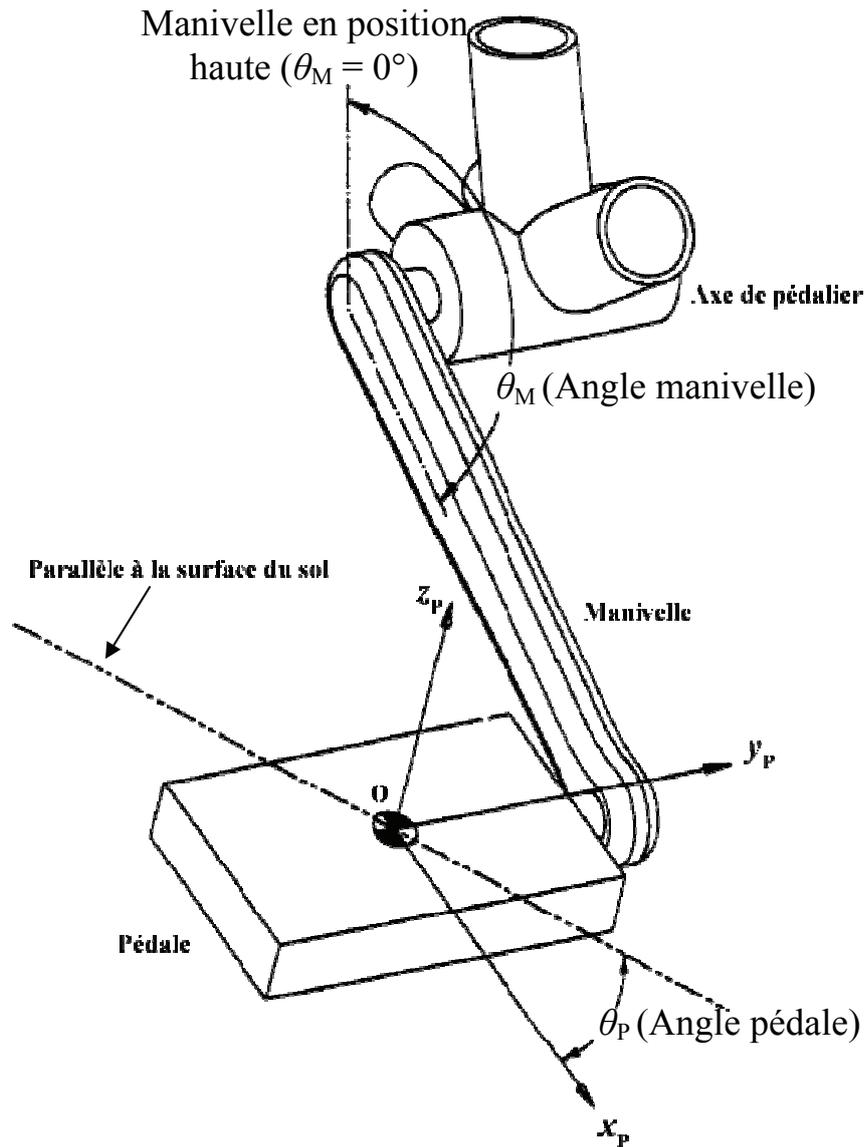


Figure III-7 Repère orthonormé (O, X_P, Y_P, Z_P) utilisé pour décomposer la force appliquée sur la pédale. L'origine du repère est située au centre de la surface supérieure de la pédale. Le plan formé par X_P et Z_P est parallèle au plan du cadre de la bicyclette. Les angles θ_M et θ_P correspondent respectivement à l'orientation de la manivelle par rapport à la verticale et à celle de la pédale par rapport à l'horizontale [D'après Stone et Hull 1995].

A partir de F_Z et F_X , et de la projection de ces deux forces, il est possible de déterminer la force résultante (F_R, N) appliquée sur chaque pédale dans le plan de la manivelle. La force résultante représente la force appliquée par le cycliste sur la pédale. A

l'aide des lois trigonométriques, l'angle formé par F_R et le plan de la pédale (α , degrés) peut être calculé à partir de F_R et de F_X (Figure III-8) :

$$\cos \alpha = \frac{|F_X|}{|F_R|} \quad (1)$$

A partir de F_R , il est possible de déterminer ses deux composantes : la force efficace (F_E), tangente au déplacement de la manivelle, et la force radiale (F_{rad}) située le long de la manivelle (Figure III-8).

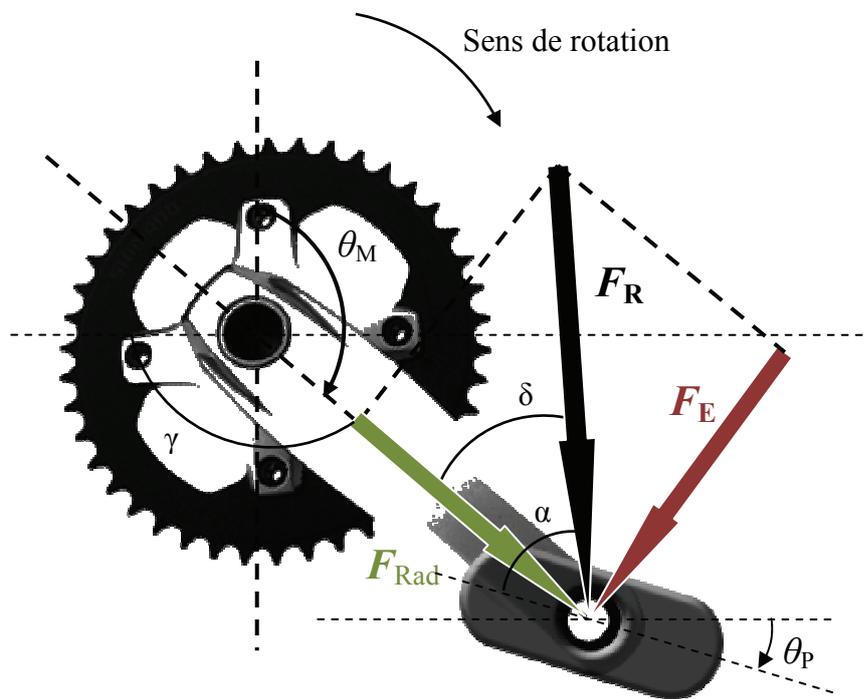


Figure III-8 Force résultante (F_R , en noir), force efficace ou tangentielle (F_E , en rouge) et force radiale (F_{Rad} , en vert) appliquées sur la pédale. Sur la figure, θ_M est l'angle de la manivelle avec la verticale, θ_P est l'angle de la pédale avec l'horizontale, α est l'angle d'application de F_R et δ est l'angle formé par F_R et la manivelle.

Pour déterminer F_E et F_{Rad} , il est nécessaire de connaître δ l'angle formé entre F_R et la manivelle :

$$\delta = \alpha - (180 - \gamma - \theta_P) \quad (2)$$

Ainsi

$$\sin \delta = \frac{|F_E|}{|F_R|} \quad (3)$$

et

$$\cos \delta = \frac{|F_{Rad}|}{|F_R|} \quad (4)$$

donc

$$|F_E| = |F_R| \cdot \sin \delta \quad (5)$$

et

$$|F_{Rad}| = |F_R| \cdot \cos \delta \quad (6)$$

La force médio-latérale (F_Y) obtenue directement par mesure des forces tridimensionnelles sur la pédale peut être additionnée à F_{Rad} pour obtenir les forces ne participant pas à l'action motrice du pédalage, dite forces inefficaces (F_I) [Zameziati et al. 2006].

4.1.1.2. Index d'efficacité du pédalage (IEP)

Des forces appliquées sur la pédale, la force appliquée perpendiculairement à la manivelle (Force tangentielle ou efficace (F_E)) est la force la plus efficace pour la propulsion de la bicyclette. La capacité à orienter cette force de manière optimale sur la pédale est une habileté très importante qui introduit la notion d'efficacité du pédalage [Grappe 2005 ; Zameziati et al. 2006].

Un index d'efficacité du pédalage (IEP) a été défini comme le ratio entre F_E et F_R . Cela implique qu'une meilleure orientation de la force appliquée sur la pédale améliore l'efficacité du pédalage. La Figure III-9 illustre la différence entre F_E et F_R , et l'inefficacité du pédalage qui en découle.

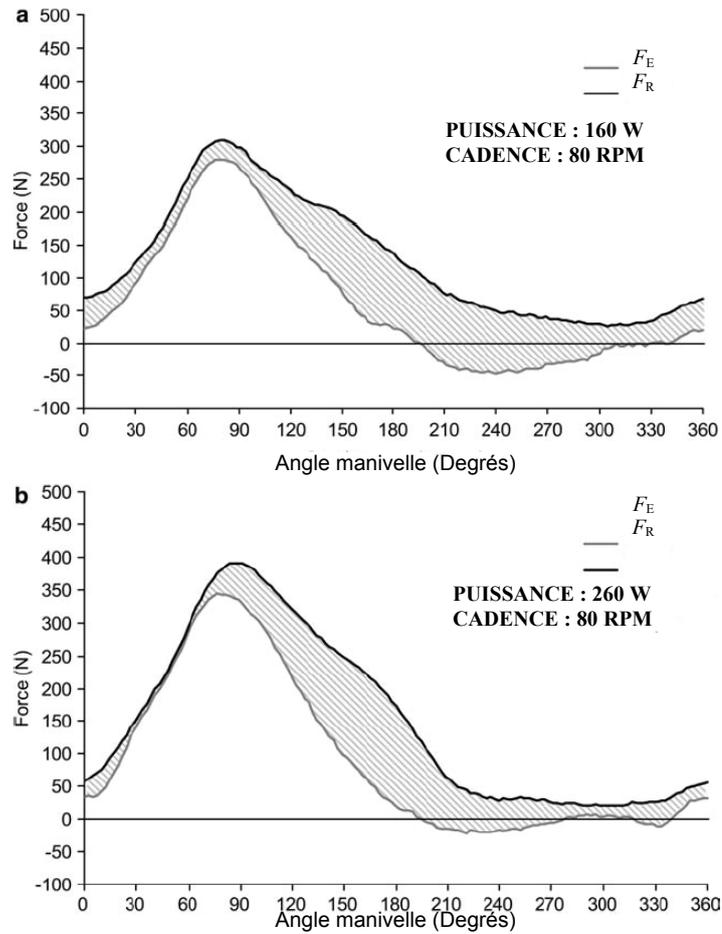


Figure III-9 Forces résultante (F_R) et tangentielle (F_E) moyennes appliquées sur une pédale à 160 W (a) et 260 W (b). La zone grise hachurée entre les deux courbes correspond à la force inefficace ($F_I = F_{Rad} + F_Y$) [D'après Zameziati et al. 2006].

D'après Coyle et al. (1991), deux index d'efficacité sont calculés pour analyser la technique de pédalage des cyclistes, le premier index (IEP_{360}) est calculé comme l'aire sous la courbe de F_E en fonction de θ_M divisée par l'aire sous la courbe de F_R en fonction de θ_M , sur une révolution complète :

$$IEP_{360} = \frac{\int_0^{2\pi} F_E(\theta_M) \cdot d\theta_M}{\int_0^{2\pi} F_R(\theta_M) \cdot d\theta_M} \quad (7)$$

Le second index de pédalage (IEP_{180}) permet d'étudier uniquement l'efficacité du pédalage lors de la phase de descente de la pédale (θ_M entre 0 et 180°) :

$$IEP_{180} = \frac{\int_0^{\pi} F_E(\theta_M) \cdot d\theta_M}{\int_0^{\pi} F_R(\theta_M) \cdot d\theta_M} \quad (8)$$

L'IEP aurait une valeur de 1 si F_R était appliquée perpendiculairement à la manivelle dans le sens de rotation pendant une révolution complète.

L'IEP ne reflète pas le niveau de pratique des cyclistes, même si la consommation d'oxygène pour une même puissance produite diffère entre des cyclistes compétiteurs et des cyclistes occasionnels [Coyle et al. 1992]. En effet, Patterson et Moreno (1990) et Sanderson (1991) ont montré que l'IEP de ces deux catégories de cyclistes était similaire. Ce serait dû à la combinaison de deux facteurs : *i*) le nombre limité de degrés de liberté de la bicyclette et *ii*) une puissance produite relativement faible pour les cyclistes compétiteurs [Sanderson 1991].

Patterson et Moreno (1990) et Sanderson (1991) ont montré que l'IEP diminue avec l'augmentation de la cadence de pédalage. L'IEP diminue de 0,46 à 0,16 à 100 W et de 0,53 à 0,26 à 200 W quand la cadence augmente de 40 à 120 rpm et de 50 à 120 rpm, respectivement [Patterson et Moreno 1990]. Sanderson (1991) montre une diminution de 31 et 27 % de l'IEP à 100 et 200 W, respectivement. Ces résultats sont confirmés par Neptune et Herzog (1999) qui ont rapporté que l'augmentation de la cadence de pédalage augmente le travail négatif musculaire, et diminue l'efficacité musculaire.

Ces résultats suggèrent que la capacité de diriger de façon optimale la force appliquée sur la pédale diminue avec l'augmentation de la cadence de pédalage. Et pour une même cadence, l'IEP est toujours plus faible pour la puissance produite la plus faible. Il apparaît plus difficile de diriger la force appliquée sur la pédale à de faibles puissances [Patterson et Moreno 1990].

Néanmoins, il existe une limite au calcul de l'IEP. L'impact du couple moteur négatif durant la phase de remontée de la pédale sur le calcul de l'IEP est trop important

comparé à la force appliquée durant cette phase [Sanderson 1991]. En effet, plus de 96 % du travail total est réalisé entre 0 et 180° [Kautz et al. 1991].

Pourtant, lors de la détermination de l'IEP, un couple moteur important ou très faible a un impact équivalent en termes d'efficacité mais pas en termes de force appliquée ni de réponses métaboliques [Sanderson 1991].

C'est pourquoi, Sanderson (1991) a calculé un index d'efficacité instantané (IEI). L'IEI représente le ratio de F_E sur F_R à chaque point du cycle de pédalage.

Il est important d'utiliser l'IEP ou l'IEI en prenant en compte l'amplitude de la force appliquée sur la pédale. Il serait trompeur d'accorder une trop grande signification à un IEP ou IEI faible ou fort lorsque les forces appliquées sont très faibles [Sanderson 1991].

4.1.1.3. Quantification des forces appliquées sur les pédales

Quantifier les forces appliquées sur les pédales est complexe car il y a différentes variables à prendre en compte : *i*) la posture sur le vélo (assis – debout) ; *ii*) la cadence de pédalage ; *iii*) la puissance moyenne développée ; *iv*) et la technique de pédalage. Or pour des vitesses et des cadences de pédalage équivalentes, des cyclistes plus grands et plus lourds devraient générer une plus grande puissance, avec une augmentation de la force appliquée au niveau des pédales [Stone et Hull 1995].

Ces auteurs ont mesuré les forces au niveau de la pédale, de la selle et du guidon dans 3 situations différentes sur tapis roulant inclinable : 1) en position assise pour une vitesse de 10,3 m·s⁻¹, une cadence de 97 tours par minute (*Cad*, tr·min⁻¹), et une inclinaison de la pente de 4% ; 2) en position assise pour une vitesse de 7,2 m·s⁻¹, une cadence de 84 tr·min⁻¹, et une inclinaison de la pente de 6% ; 3) en position debout pour une vitesse de 6,3 m·s⁻¹, une cadence de 83 tr·min⁻¹, et une inclinaison de la pente de 8%.

Ils ont montré qu'il existe une relation directe entre le poids du cycliste et la valeur moyenne minimale de la force normale appliquée sur la pédale, et la puissance maximale moyenne produite. Or [Bolourchi et Hull \(1985\)](#) ont déterminé par analyse aux éléments finis que la force normale à la pédale était responsable majoritairement des contraintes au niveau de l'axe du pédalier.

En utilisant les équations de régression linéaire établies dans cette étude [[Stone et Hull 1995](#)], il est possible d'estimer l'amplitude maximale de la force normale à la pédale d'un cycliste particulier en fonction de son poids et d'une des 3 conditions étudiées, avec une géométrie de cadre « traditionnelle » (*i.e.*, une géométrie dite en « diamant »).

[Stone et Hull \(1993\)](#) ont comparé le pédalage en position « Assis » et en position « Debout ». Ils ont constaté qu'en position « Assis », la plus grande force apparaît à des angles de manivelles inférieurs à 120 degrés ([Figure III-2](#)), entre 80 et 110 degrés, à un pédalage de 60 à 90 rpm, tandis qu'en pédalant debout, la force maximale apparaît à 140 degrés. Cela peut dériver de 3 facteurs : 1) quand le cycliste est debout sur les pédales, son bassin serait plus en avant, ce qui provoquerait un appui sur les pédales différent ; 2) l'inclinaison du terrain ; et 3) l'action des bras créeraient un mouvement latéral du vélo qui affecterait l'angle auquel la force maximale serait appliquée sur les pédales.

Ces auteurs ont observé, qu'en position debout, la valeur de l'amplitude moyenne minimale de la force normale produite sur la pédale était supérieure de 20% au poids du cycliste, alors qu'en position assise, l'amplitude maximale est généralement égale au poids du corps (570 N pour un poids corporel du sujet de 660 N) pour une puissance produite de 770 W [[Soden et Adeyefa 1979](#)]. D'après [Stone et Hull \(1993\)](#), cette amplitude supérieure au poids du corps en position debout est le résultat d'une action des bras. [Soden et Adeyefa \(1979\)](#) estiment la force appliquée sur la pédale avant lors d'un départ à plus de deux fois le poids du cycliste.

4.1.2. Au niveau du guidon

Les forces induites au niveau du guidon dépendent de la masse du cycliste et de sa position de pédalage (Assis – Debout). D'après [Hull et Bolourchi \(1988\)](#), en position assise, il y a peu ou pas de travail des bras. Dans cette position, la force appliquée sur le guidon par les mains est la résultante du poids du haut du corps (Tronc – Tête – Bras) du cycliste.

En position debout, [Stone et Hull \(1993\)](#) constatent que les forces verticales et horizontales appliquées sur le guidon sont fortement corrélées. En effet, ces deux forces sont les composantes vectorielles de la force transmise par les bras sur le guidon.

[Soden et Adeyefa \(1979\)](#) ont étudié 3 conditions différentes de pédalage à partir d'enregistrements vidéo pour un cycliste dont le poids est égal à 660 N : 1) pédalage assis constant en position aérodynamique (les mains positionnées en position basse du guidon, le buste penché vers l'avant), à une vitesse d'environ $10,27 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ et développant une puissance de 255 W ; 2) un départ en position debout avec une accélération de $2,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$; et 3) pédalage en position debout sur un terrain incliné à 10%, à une vitesse de $7,22 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ et développant une puissance égale à 665 W.

La direction des forces verticales appliquées sur le guidon oscille entre haut et bas durant la phase motrice principale de la jambe correspondante et la phase de remontée ou de tirage, respectivement [[Soden et Adeyefa 1979](#)].

Pour les 3 conditions, les auteurs déterminent les forces appliquées par le calcul en supposant l'équilibre vertical de toutes les forces appliquées sur la bicyclette, les résultats sont présentés dans le [Tableau III-2](#) :

Tableau III-2 Etude des forces verticales appliquées sur le guidon dans 3 conditions différentes de pédalage à partir d'enregistrements vidéos pour un cycliste dont le poids est égal à 660 N [Soden et Adeyefa 1979].

	Inclinaison du cadre par rapport à la verticale	Force de tirage (N)	Force de poussée (N)
Pédalage assis en position aérodynamique	0°	71	101
Départ en position debout	0°	714	293
	8°	841	420
Pédalage en position debout sur un terrain incliné à 10 %	0°	235	181
	8°	239	185

Il semble qu'incliner le cadre n'offre pas beaucoup plus d'avantages en terme de force appliquée. Stone et Hull (1993) ont observé lors du pédalage debout sur tapis roulant incliné, que les cyclistes tirent vers le haut et l'arrière le guidon durant la phase 30° - 160° (angle manivelle) et ensuite, ils poussent vers le bas et l'avant durant la phase 160° - 30°. Bien que la force exercée sur le guidon résulte dans l'inclinaison latérale du cadre et dans une participation au développement de la force normale sur la pédale, cela n'influence pas la puissance mécanique produite par les membres inférieurs ($\approx 1,5\%$).

D'après Doré et al. (2006) et Baker et al. (2001), en position assise, la force appliquée sur le guidon par les mains permettrait de maintenir le centre de masse du corps entier à un niveau vertical constant et de diriger l'extension de la jambe, et donc sa force exercée sur la pédale vers le bas. Or, Hull et al. (1990) ont étudié le mouvement angulaire de la hanche lors du pédalage en position debout. Ils ont constaté que l'inclinaison latérale du cadre permettait de maintenir constante la distance pédale – hanche.

4.1.3. Au niveau de la selle

La force induite par le pilote au niveau de la selle apparaît uniquement en position assise. Elle dépend du poids du corps du cycliste. D'après [Soden et Adeyefa \(1979\)](#), la force appliquée sur la selle correspond à environ 50% du poids du corps.

4.2. Forces induites par le pilotage et par le terrain

Les forces induites par le pilotage apparaissent comme la résultante des actions de contrôle du cycliste, comme le freinage ou le pilotage [[McKenna et al. 2002](#)].

Les forces induites par le terrain résultent des réactions inertielles du poids du cycliste et de la bicyclette causées par les irrégularités du terrain [[De Lorenzo et Hull 1999_{a, b}](#)]. Ces forces sont considérées comme les plus importantes dans le comportement en fatigue des bicyclettes dites « Tout-terrain », comme les V.T.T. (vélo tout-terrain) et les BMX, car la surface du terrain est très irrégulière et accidentée.

Actuellement, les cadres sont conçus sans tenir compte des caractéristiques d'utilisation des cyclistes. La connaissance des forces appliquées par les pilotes sur la bicyclette est très utile pour la conception et l'analyse des cadres. La mesure de ces forces permet la mise en place de simulations et d'analyses pour étudier le comportement d'un cadre. Cela permet de concevoir un cadre adapté aux besoins de l'activité.

C'est pourquoi dans la partie suivante, nous étudierons l'interaction homme – machine : le comportement du cadre de BMX en fonction de l'action du pilote.

Liste des abréviations utilisées dans ce chapitre

H_{SJ}	: Hauteur en Squat Jump	M
P_{SJ}	: Puissance en Squat Jump	W
t_v	: Temps d'envol	S
g	: Accélération gravitationnelle	9,81 m·s ⁻²
m	: Masse corporelle	Kg
Cad_{max}	: Cadence maximale	tr·min ⁻¹
P_S	: Puissance en sprint charge-vitesse	W
P	: Puissance mécanique	W
C	: Couple moteur	N·m
ω	: Vitesse angulaire	rad·s ⁻¹
$P_{SJ/m}$: Puissance en Squat Jump relative à la masse corporelle	W·kg ⁻¹
$P_{S/m}$: Puissance de Sprint relative à la masse corporelle	W·kg ⁻¹

IV. ETUDE BIOMECHANIQUE DE L'INTERFACE HOMME – MACHINE

1. Etudes expérimentales des caractéristiques physiques des pilotes de BMX et de l'inclinaison du cadre lors du pédalage

1.1. Mesures des qualités physiques lors de la phase d'accélération en BMX chez des pilotes entraînés

[Bertucci W, Hourde C, Manolova A, Vettoretti F (2007) Sci Sports 22 : 179 – 181]

En compétition, une course de BMX (ou *Race*) oppose jusqu'à huit pilotes simultanément. Ils sont positionnés sur une même ligne de départ derrière une grille qui s'abaisse de manière automatique au signal sonore de départ. Cette grille est perpendiculaire au plan sur lequel reposent les roues du BMX. Elle permet aux pilotes de rester sur leur vélo, les deux pieds sur les pédales.

Les pistes de BMX sont longues de 300 à 400 m pour une durée de course située entre 30 et 40s. Les vitesses atteintes par les pilotes sont donc relativement importantes, malgré les obstacles qui parsèment la piste ([Figure II-2](#)).

La configuration de la piste de BMX est soumise au règlement de l'UCI [[cf. Bibliographie](#)]. En effet, le départ doit s'effectuer sur une portion inclinée de 12 mètres minimum de longueur et dont l'élévation minimum doit être 1,5 m supérieure à la ligne droite initiale qui la suit. Cette ligne droite doit avoir une longueur minimale de 40 m. Et le bas de la pente du premier obstacle ne doit pas être placé à moins de 35 m de la grille

de départ, ni à moins de 20 m de l'entrée du premier virage. Néanmoins sur les pistes conçues pour des pilotes expérimentés, cette distance peut être plus courte.

Grâce à cette ligne droite, les pilotes peuvent atteindre une vitesse importante dont ils s'efforceront de minimiser la perte lors du franchissement de tous les obstacles, le pilote ne pédalant presque plus une fois le premier obstacle franchi. Le classement dès la fin de la première ligne droite apparaît primordial, car il détermine presque à coup sûr (à moins d'une chute, par exemple) l'ordre à l'arrivée. Les pilotes doivent donc atteindre la plus grande vitesse avant le premier obstacle à partir d'une position arrêtée, pour cela ils disposent d'une distance d'environ 35m.

Comme pour le cyclisme sur piste, il n'existe pas de système de dérailleur [Dorel et al. 2005], ce qui signifie que le développement du BMX est unique et déterminé avant la course. Il doit être judicieusement choisi pour permettre de produire une puissance musculaire optimale qui permettra au pilote d'atteindre la plus grande vitesse le plus rapidement possible. C'est aussi une des raisons pour laquelle les pilotes adoptent une position debout sur le vélo. Il a en effet été démontré que la position de pédalage dite de « danseuse » permet une augmentation de la puissance mécanique développée en comparaison à la position assise [Reiser et al. 2002].

Il existe plusieurs raisons à cette augmentation de puissance produite en position debout comparée à la position assise : 1) Un transfert de l'énergie musculaire du haut du corps vers le bas du corps se produit grâce à un mouvement linéaire au niveau de l'articulation de la hanche. Reiser et al. (2002) souligne que les forces appliquées sur le guidon sont coordonnées avec les extrémités des membres inférieurs et participent au développement d'une puissance positive. Néanmoins cette participation reste faible ($\approx 1,5$ % de la puissance totale produite) [Stone and Hull 1993]. Mais il a été suggéré [Doré et al. 2006 ; Baker et al. 2001], lors de tests de Wingate sur cyclo-ergomètre en position assise,

que la contribution des mains tenant le guidon permettait de maintenir le centre de masse du corps entier à un niveau vertical constant et ainsi de diriger l'extension de la jambe, et donc sa force exercée sur la pédale vers le bas.

Ce principe de stabilisation du centre de masse pourrait être également applicable à la position debout, même si un balancement latéral apparaît lors du pédalage dans cette position. Il permet de minimiser les forces contreproductives lors de la phase non propulsive de la pédale [Stone et Hull 1993]. ; 2) Un plus grand pourcentage de la masse corporelle totale du cycliste est supporté par les pédales en position debout qu'en position assise, car il n'y a pas d'appui au niveau de la selle. Grâce à l'attraction gravitationnelle, et puisque la poussée sur la pédale s'effectue verticalement vers le bas, il y a une amélioration de la force motrice sur les pédales.

Il apparaît donc clairement qu'en plus d'une bonne maîtrise technique du départ, une grande production de puissance musculaire des membres inférieurs est un facteur important dans la phase d'accélération qui prend place sur la ligne droite en début de course.

Le but de cette étude est donc de caractériser les déterminants biomécaniques de la performance lors de la phase d'accélération en course de BMX à l'aide de différents tests de laboratoires (Tests de détente verticale et de Charge – Vitesse) qui permettent une bonne évaluation de la puissance musculaires des membres inférieurs [Ravier et al. 2004 ; Morin et al. 2002].

Les résultats de ces tests sont analysés pour étudier si les propriétés biomécaniques mesurées lors du saut et du test de Charge – Vitesse sont corrélées à la performance lors de la phase d'accélération en BMX, et quelles sont ces variables biomécaniques mesurées lors des tests qui sont liées à la phase d'accélération.

1.1.1. Méthodes

1.1.1.1. Les sujets

Quarante pilotes de BMX (âge : 17 ± 3 ans ; taille : $1,72 \pm 0,13$ m ; masse corporelle : $65,7 \pm 13,4$ kg ; masse grasse corporelle : $15,35 \pm 4,8$ %) de niveau régional à national se sont portés volontaires pour cette étude. Chaque sujet a lu et signé un document d'information et de consentement avant d'effectuer l'expérience sur une piste de BMX, Clairoix, France.

1.1.1.2. Matériel et mesures

Concernant les sauts verticaux, la hauteur de saut maximale (H_{SJ} , m) ainsi que la puissance maximale produite (P_{SJ} , W) ont été calculées à partir du temps d'envol (t_v , s) mesuré à l'aide du système Optojump (Microgate SLR, Italie) (Figure IV-1). L'Optojump est un système de mesure optique constitué de lattes émettrices et réceptrices placées de part et d'autre du sujet. Ce système permet de mesurer les temps de contact au sol et les temps d'envol avec une sensibilité de 1/1000 s. La validité de ce système a été démontrée précédemment par [Lehance et al. \(2005\)](#).

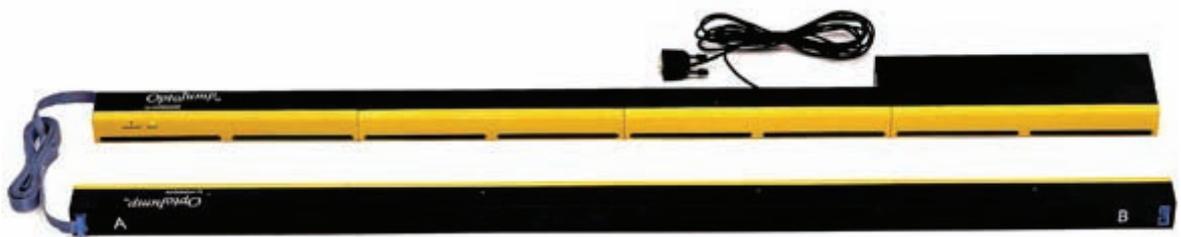


Figure IV-1 Le système Optojump (Microgate SLR, Italie)

En utilisant t_v , il est possible de déterminer H_{SJ} (Eq. 1), qui permet de déterminer ensuite P_{SJ} (Eq. 2) de la manière suivante :

$$H_{SJ} = \frac{g \cdot t_v^2}{8} \quad (9)$$

$$P_{SJ} = \sqrt{\frac{g}{2}} \times m \times g \times \sqrt{H_{SJ}} \quad (10)$$

Où g représente l'accélération gravitationnelle ($9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$) et m , la masse corporelle des sujets (en kg).

Concernant les tests de Charge – Vitesse, un système PowerTap (modèle Professional, CycleOps, Etats-Unis), valide et reproductible [[Gardner et al. 2004](#) ; [Bertucci et al. 2005](#)], a été utilisé pour mesurer la puissance mécanique maximale (P_S , W) et la cadence de pédalage maximale (Cad_{max} , $\text{tr}\cdot\text{min}^{-1}$) lors des tests de force-vitesse à chaque résistance de friction ([Figure IV-2](#)).

Ce système de mesure de la puissance, dont la fréquence d'échantillonnage est de 0,8 Hz est un moyeu arrière munit de 8 jauges de déformation qui permet de mesurer le couple moteur produit ainsi que la vitesse de rotation de la roue arrière. La puissance mécanique (P , en Watts) est alors obtenue par le produit du couple moteur (C , en $\text{N}\cdot\text{m}$) et de la vitesse angulaire (ω , en $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$) de la roue arrière.



Figure IV-2 PowerTap, modèle Professional, CycleOps, Etats-Unis

Pour les tests de laboratoire (Saut et Charge – Vitesse), les valeurs de puissance maximale sont exprimées à la fois en valeur absolue (P_{SJ} et P , W, respectivement) et en valeurs relatives à la masse corporelle des sujets ($P_{SJ/m}$ et $P_{S/m}$, $\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectivement).

Concernant le test de terrain, pour chronométrer les pilotes à des passages précis sur la ligne droite initiale de la piste de BMX, des cellules photoélectriques (Racetime 2, Microgate, Italie) ([Figure IV-3](#)) ont été utilisées.



Figure IV-3 Cellules photoélectriques Racetime 2 (Microgate, Italie)

Chaque cellule est composée d'un émetteur optique et d'un récepteur ; et chaque partie est placée de part et d'autre de la piste, pour former ainsi une porte invisible. Un faisceau laser traverse la piste, et c'est lorsque les sujets passent au travers que le signal de passage est enregistré.

Les cellules photoélectriques sont disposées le long de la piste : C1, au départ ; C2 à 5,2 m après le départ pour mesurer le temps de passage T_1 (s) et C3 à 28,7 m après le départ (avant le premier obstacle) pour permettre la mesure de T_2 (s) (Figure IV-4).

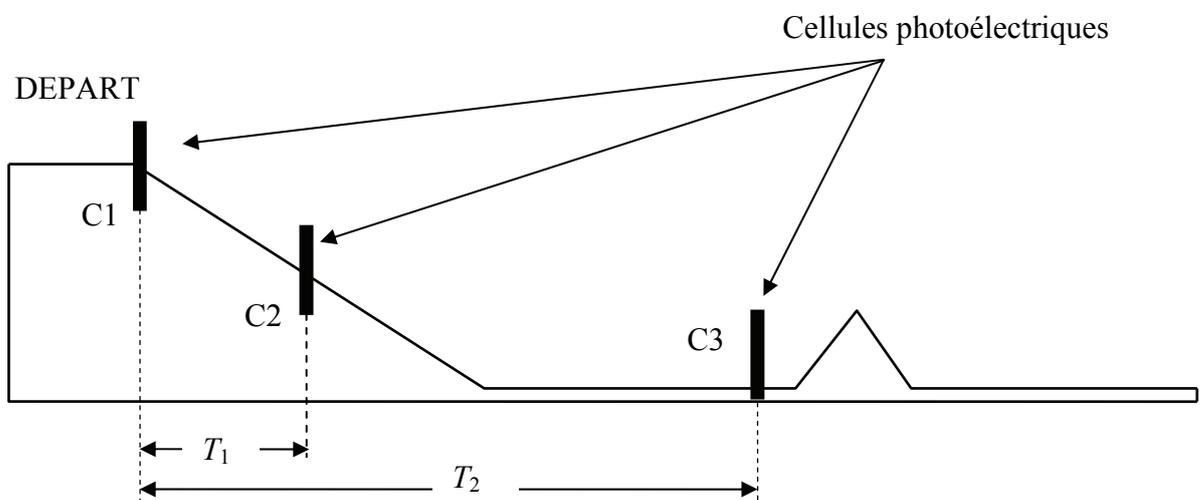


Figure IV-4 Placement des 3 cellules photoélectriques le long de la piste de BMX

1.1.1.3. Les tests d'évaluation

De manière à comprendre quelles sont les caractéristiques physiques et les facteurs qui influencent la performance en BMX, des tests en laboratoire et sur le terrain sont réalisés.

1.1.1.3.1. Tests en laboratoire

Après un échauffement standardisé et spécifique d'une durée approximative de 5 minutes, flexions dynamiques des genoux suivies de quelques sauts pour le test de saut, et un échauffement standardisé pour les tests de Charge – Vitesse en accord avec le protocole de [Morin et al. \(2002\)](#), les pilotes ont réalisé 2 types de test d'évaluation :

1. **Test de détente verticale (« Squat Jump »)** [[Dauty et al. 2002](#) ; [Morin et Belli 2003](#) ; [Bobbert et al. 2007](#) ; [Samozino et al. 2008](#)] : Les sujets ont réalisé 3 sauts, le temps de récupération entre chaque saut était de 1 minute. Le départ s'effectue genou fléchi à 90°, les mains sont placées sur les hanches (position dite « Akimbo »). Les sujets se mettent en position de départ, il marque un temps d'arrêt (environ 2 s) en attendant un signal sonore de départ, la consigne est de sauter le plus haut possible. La meilleure performance des trois essais était retenue.

Le « squat jump » (avec ou sans contre mouvement préparatoire) est un exercice largement utilisé pour évaluer la production de puissance musculaire des membres inférieurs [[Cormie et al. 2008](#) ; [Wilson et al. 1993](#) ; [Dugan et al. 2004](#) ; [Harris et al. 2008](#) ; [Hori et al. 2007](#) ; [Ravier et al. 2004](#)]. Selon [Cormie et al. \(2007\)](#), lors de cet exercice, le pic de production maximum de puissance est atteint avec une charge additionnelle nulle.

2. **Test de Charge – Vitesse** : Trois sprints ont été réalisés contre une résistance de 0,4, 0,6 et 0,8 N·kg⁻¹, respectivement [[Vandewalle et al. 1987](#) ; [Morin et al. 2002](#) ; [Ravier et al. 2003](#) ; [2004](#) ; [Bertucci et al. 2005](#)]. Ces charges de friction ont été choisies car il a été

montré [Morin et al. 2002] qu'elles permettaient aux sujets de développer des valeurs optimales de force et de vitesse, ainsi que de développer des puissances maximales sur cyclo-ergomètre.

Les tests se sont déroulés en position assise, au signal sonore de départ, l'instruction donnée était de pédaler le plus vite possible pendant 7s. Les départs étaient effectués à l'arrêt avec l'angle de la manivelle du pied de départ (choisi par les sujets au préalable et qu'ils conservent tout au long des 3 sprints) formant un angle compris entre 0° et 45° par rapport à la vertical vers l'avant. L'ordre des sprints est randomisé, et cinq minutes de récupération active ont été effectuées entre chaque sprint.

Ces tests de Charge – Vitesse sur cyclo-ergomètre permettent de déterminer de manière directe les propriétés mécaniques musculaires (Force de contraction, vitesse de contraction, force théorique maximale, vitesse théorique maximale) des membres inférieurs lors d'efforts de très courte durée [Morin et al. 2002]. La puissance est le produit de la force et de la vitesse, et cette puissance produite durant le raccourcissement musculaire dépend de ces 2 facteurs. Donc pour mesurer la puissance maximale précisément, il est nécessaire d'étudier la relation entre la force et la vitesse de pédalage [Vandewalle et al. 1987]. Vandewalle et al. (1987) ont obtenu les plus grandes valeurs de vitesse maximale théorique, de force maximale théorique et de puissance maximale dans la relation Charge – Vitesse chez des athlètes qui pratiquaient des activités de vitesse et de puissance.

1.1.1.3.2. Tests en conditions réelles

La ligne droite initiale d'une piste de BMX a été instrumentée à l'aide de cellules photoélectriques. Après un échauffement de type compétition et quelques passages sur la ligne droite test, les sujets avaient 3 sprints à réaliser. Il s'agissait d'effectuer un sprint

avec départ arrêté (identique au départ en compétition) chronométré. Au départ le pilote est maintenu en équilibre par un expérimentateur placé derrière lui. Après un compte à rebours, le pilote s'élance (le temps de réaction n'a pas été pris en compte) le plus rapidement possible. Le pilote doit parcourir une distance d'environ 33 m le plus rapidement possible, aucun obstacle ne gêne son parcours. La meilleure performance entre les 3 essais à chaque passage devant une cellule photoélectrique est prise en compte.

1.1.1.4. Statistiques

Réalisation d'une matrice de corrélations entre les différentes variables biomécaniques et les performances chronométriques sur le terrain.

1.1.2. Résultats

Le [Tableau IV-1](#) présente les valeurs moyennes (\pm Ecart-Type) des variables biomécaniques mesurées lors des différents tests de laboratoire (Tests de détente et de Charge – Vitesse) et de terrain (Sprints sur la ligne droite initiale), ainsi que leur coefficient de corrélation avec les temps de passage mesurés lors des tests de sprints sur la ligne droite en C2 (T_1 , s) et en C3 (T_2 , s). Concernant le test de saut vertical, les puissances absolue et relative sont calculées à partir de la hauteur de saut maximale à l'aide de l'[équation 2](#) et en divisant la puissance maximale par la masse corporelle totale des sujets, respectivement.

Tableau IV-1 Valeurs moyennes (\pm Ecart - Type) des variables biomécaniques mesurées et calculées lors des tests de laboratoire et matrice de corrélation liant ces paramètres biomécaniques et les performances de temps réalisées lors du sprint sur la ligne droite initiale d'une piste de BMX

		Moyenne (\pm Ecart-Type)	T_1 (s): 1,08 \pm 0,07	T_2 (s): 3,63 \pm 0,17
Squat Jump	H_{SJ} (m)	0,34 (\pm 0,05)	-0,49	-0,54
	P_{SJ} (W)	835 (\pm 204)	-0,75*	-0,80*
	$P_{SJ/m}$ (W·kg ⁻¹)	12,6 (\pm 0,9)	-0,50	-0,55
Charge	- P_S (W)	985 (\pm 303)	-0,76*	-0,81*
Vitesse Assis	$P_{S/m}$ (W·kg ⁻¹)	14,8 (\pm 2,4)	-0,59	-0,64
0,4 N·kg ⁻¹	Cad_{max} (tr·min ⁻¹)	148,6 (\pm 18,7)	-0,24	-0,35
Charge	- P_S (W)	990 (\pm 296)	-0,78*	-0,83*
Vitesse Assis	$P_{S/m}$ (W·kg ⁻¹)	14,9 (\pm 2,3)	-0,61	-0,65
0,6 N·kg ⁻¹	Cad_{max} (tr·min ⁻¹)	133,9 (\pm 17,2)	-0,21	-0,33
Charge	- P_S (W)	955 (\pm 292)	-0,77*	-0,83*
Vitesse Assis	$P_{S/m}$ (W·kg ⁻¹)	14,4 (\pm 2,3)	-0,60	-0,66
0,8 N·kg ⁻¹	Cad_{max} (tr·min ⁻¹)	115,4 (\pm 15)	-0,21	-0,30

Seuil de significativité : * $p < 0,01$; T_1 (s) : Temps après 5,2 m lors de la phase d'accélération ; T_2 (s) : Temps après 28,7 m lors de la phase d'accélération ; H_{SJ} (m) : Hauteur maximale atteinte lors du test de détente verticale ; P_{SJ} (W) : Puissance maximale produite lors du test de détente verticale ; m (kg) : masse corporelle totale des sujets ; P_S (W) : Puissance mécanique maximale produite lors des tests de Charge – Vitesse réalisés contre des résistances de 0,4, 0,6 et 0,8 N·kg⁻¹ ; Cad_{max} (tr·min⁻¹) : Cadence de pédalage maximale mesurée lors des tests de Charge – Vitesse réalisés contre des résistances de 0,4, 0,6 et 0,8 N·kg⁻¹.

Les résultats des tests de Charge - Vitesse indiquent que $P_S 0,6 \text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}$ possède une valeur moyenne plus importante comparée à $P_S 0,4 \text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}$ et à $P_S 0,8 \text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}$. Les valeurs moyennes de P_S mesurées sont $990 (\pm 296) \text{ W}$ vs. $985 (\pm 303) \text{ W}$ vs. $955 (\pm 292) \text{ W}$, respectivement. De même, la puissance relative à la masse corporelle, $P_{S/m} 0,6 \text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}$ est plus grande que $P_{S/m} 0,4 \text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}$ et $P_{S/m} 0,8 \text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}$. Les valeurs moyennes de $P_{S/m}$ mesurées sont $14,9 (\pm 2,3) \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$ vs. $14,8 (\pm 2,4) \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$ vs. $14,4 (\pm 2,3) \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectivement.

Concernant les cadences maximales de pédalage, $Cad_{\max} 0,4 \text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}$ est plus grande que $Cad_{\max} 0,6 \text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}$ et $Cad_{\max} 0,8 \text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}$. Les valeurs moyennes de Cad_{\max} mesurées sont $148,6 (\pm 18,7) \text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$ vs. $133,9 (\pm 17,2) \text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$ vs. $115,4 (\pm 15) \text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$, respectivement.

Les puissances mécaniques produites mesurées lors des tests de saut vertical (P_{SJ}) et de Charge – Vitesse (P_S) sont corrélées avec les performances en T_1 ($r : 0,75 - 0,78$), et fortement corrélées avec les performances en T_2 ($r : 0,81 - 0,83$).

Les relations significatives ($p < 0,01$) qui existent entre la puissance mécanique produite lors des tests de Charge – Vitesse réalisés contre des résistances de $0,4$, $0,6$ et $0,8 \text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}$ et la performance en T_2 lors de la phase d'accélération sur la ligne droite initiale sont présentées en [Figure IV-5](#), [Figure IV-6](#) et [Figure IV-7](#), respectivement.

Les cadences maximales de pédalage (Cad_{\max}) ne sont pas corrélées avec les performances en T_1 et en T_2 .

Les puissances mécaniques relatives à la masse corporelle produites lors des tests de saut vertical ($P_{SJ/m}$) et de Charge – Vitesse ($P_{S/m}$) sont plus faiblement corrélées aux performances en T_1 ($r : 0,50 - 0,61$) et aux performances en T_2 ($r : 0,55 - 0,66$).

Les puissances mécaniques produites lors du saut vertical (Squat Jump) sont fortement corrélées ($r = 0,94$, $r = 0,94$ et $r = 0,93$) avec les puissances produites lors des tests de Charge – Vitesse contre des résistances de $0,4$, $0,6$ et $0,8 \text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectivement.

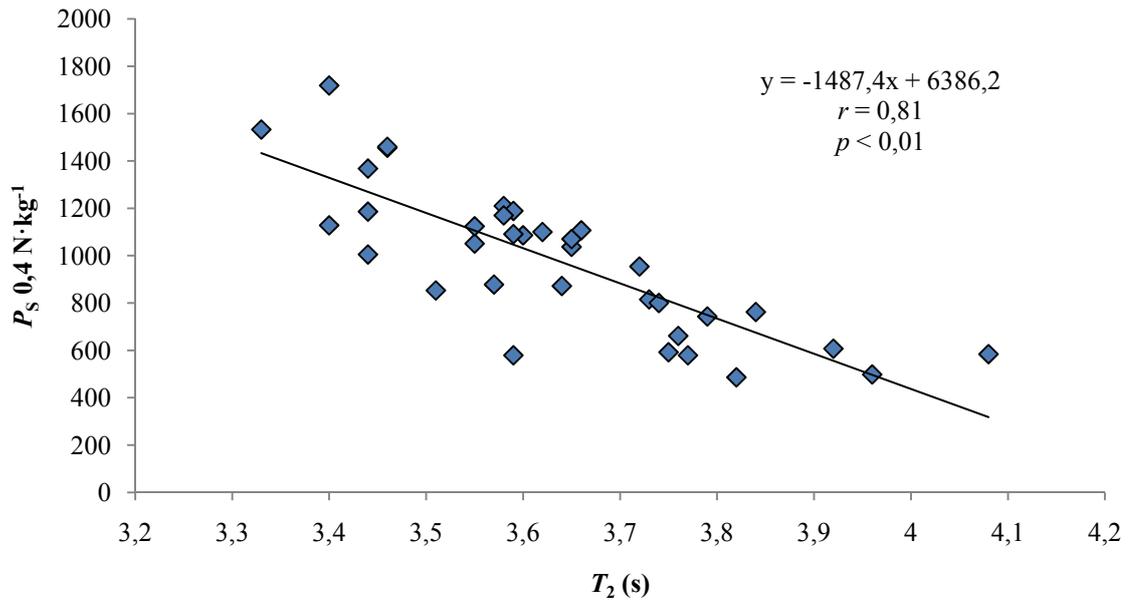


Figure IV-5 Corrélation entre les valeurs de puissance mécanique mesurées lors du test de Charge – Vitesse contre une résistance de $0,4 \text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($P_s 0,4 \text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}$) et la performance en T_2 , temps après 28,7 m lors de la phase d'accélération.

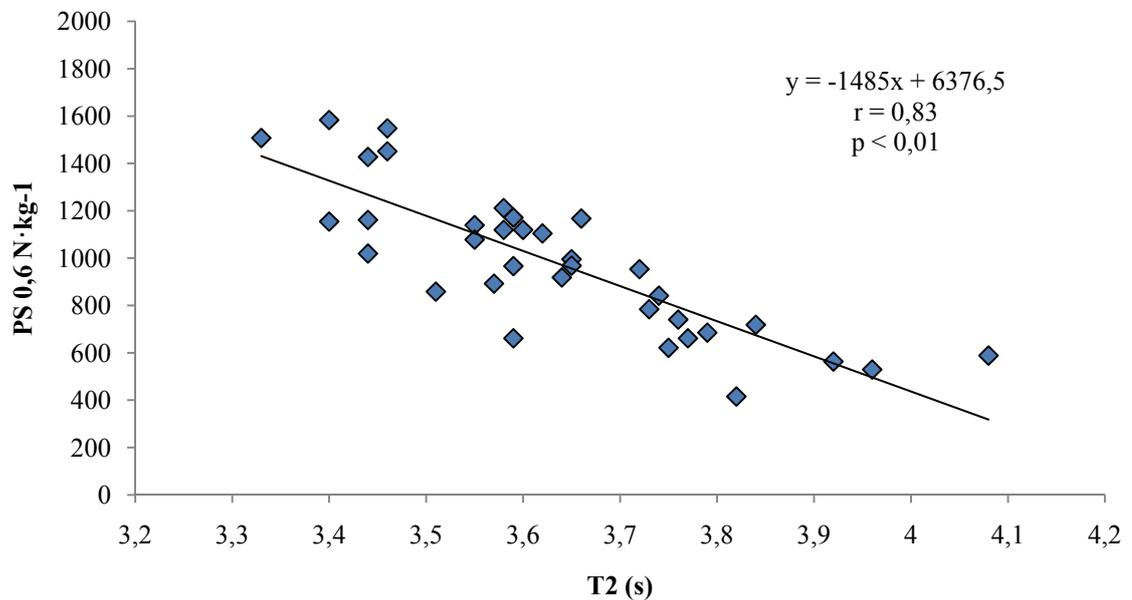


Figure IV-6 Corrélation entre les valeurs de puissance mécanique mesurées lors du test de Charge – Vitesse contre une résistance de $0,6 \text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($P_s 0,6 \text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}$) et la performance en T_2 , temps après 28,7 m lors de la phase d'accélération.

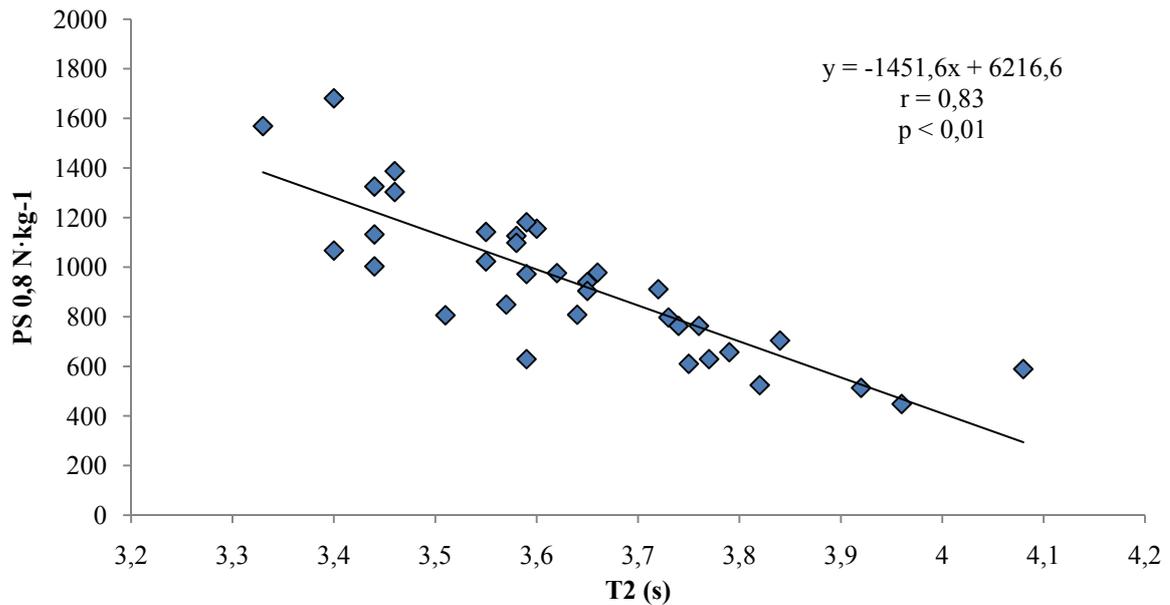


Figure IV-7 Corrélation entre les valeurs de puissance mécanique mesurées lors du test de Charge – Vitesse contre une résistance de $0,8 \text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($P_S 0,8 \text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}$) et la performance en T_2 , temps après 28,7 m lors de la phase d'accélération.

1.1.3. Discussions

Concernant les corrélations, les résultats indiquent qu'il existe une relation significative très forte ($r = 0,93 - 0,94$) entre P_{SJ} et $P_S 0,4, 0,6$ et $0,8 \text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}$ et qu'il existe une relation significative entre les résultats les tests de détente et de Charge – Vitesse (P_{SJ} , $P_{SJ/m}$, P_S , $P_{S/m}$) et les temps de passage en C2 (T_1 , s) et C3 (T_2 , s) mesurés lors des tests de sprints sur la ligne droite initiale de la piste de BMX. Seules les Cad_{max} lors des trois tests de Charge – Vitesse ne sont pas liées significativement avec les temps T_1 et T_2 (Tableau IV-1). Il faut noter également que les résistances de pédalage ($0,4 \text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}$, $0,6 \text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}$ et $0,8 \text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}$) n'influencent pas les relations entre P_S et $P_{S/m}$ et les performances aux temps de passage T_1 et T_2 , elles restent élevées quelque soit la charge.

Cela indique que les puissances mécaniques mesurées lors des tests de détente et de Charge – Vitesse sont fortement liées à la capacité d'accélération des pilotes de BMX sur

la ligne droite initiale, particulièrement avec le temps de passage T_2 . La capacité à produire une grande puissance musculaire est donc un facteur important de la performance lors du sprint sur la ligne droite initiale en BMX. Les tests choisis (« Squat Jump » et Test de Charge – Vitesse) sont fortement corrélés ($r = -0,75$ – $-0,80$ et $r = -0,76$ – $-0,83$, respectivement) et pertinents pour l'évaluation des paramètres biomécaniques en rapport avec la phase d'accélération en BMX.

Les corrélations faibles entre la puissance relative produite contre différentes résistances ($P_{S/m} 0,4 \text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}$, $P_{S/m} 0,6 \text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}$ et $P_{S/m} 0,8 \text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}$) et les temps de passage T_1 et T_2 peuvent être liées aux conditions du départ de compétition en BMX. En effet, le départ s'effectue sur une pente inclinée descendante, et grâce à l'attraction gravitationnelle, la masse corporelle des pilotes est un atout à ce moment de la course, elle pourrait aider le pilote à vaincre l'inertie de départ grâce au poids de l'ensemble Pilote – BMX. Une grande masse corporelle du pilote pourrait être un avantage à ce moment de la course. Cette raison pourrait expliquer que la puissance maximale relative produite soit moins corrélée avec T_1 et T_2 que la puissance maximale absolue.

Concernant les tests de détente verticale, H_{SJ} et donc P_{SJ} et $P_{SJ/m}$ ont des valeurs moyennes inférieures [$0,34 (\pm 0,05) \text{ m}$, $834 (\pm 204) \text{ W}$ et $12,6 (\pm 1) \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectivement] à celles constatées dans d'autres disciplines, dans la littérature : [Dauty et al. \(2002\)](#) mesurent sur 20 joueurs de football professionnel une hauteur de saut maximale moyenne en Squat Jump égale à $0,43 \text{ m}$, et donc une puissance maximale moyenne d'environ 1042 W soit une puissance relative de $14,3 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$. [Morin et Belli \(2003\)](#) mesurent chez 10 sprinters une H_{SJ} de $0,45 \text{ m}$, et donc une P_{SJ} d'environ 1055 W soit une $P_{SJ/m}$ égale à $14,6 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$. [Bobbert et al. \(2007\)](#) ont mesuré les hauteurs de saut en Squat Jump de 8 gymnastes expérimentés dans cinq différentes positions de départ (selon l'angulation de l'articulation du genou). Ils ont mesuré H_{SJ} entre $0,39$ et $0,45 \text{ m}$, et malgré

que la masse corporelle ne soit pas donnée, il est possible de connaître $P_{SJ/m}$, soit 13,5 à 14,6 $W \cdot kg^{-1}$.

Cette différence de 1 à 2 $W \cdot kg^{-1}$ peut s'expliquer par plusieurs facteurs : *i)* Les années d'expérience des sujets dont la moyenne d'âge est de 17 ± 3 ans vs. 21 ± 3 et $23,5 \pm 3,7$ ans pour [Morin et Belli \(2003\)](#) et [Dauty et al. \(2002\)](#), respectivement ; *ii)* La composition corporelle, les pilotes de BMX ont un pourcentage moyen de masse grasse mesuré assez élevé ($15,35 \pm 4,8$ %) pour une masse corporelle assez faible ($65,7 \pm 13,4$ kg), et puisque le calcul de $P_{SJ/m}$ englobe la masse grasse et la masse sèche, il est possible d'améliorer $P_{SJ/m}$ en diminuant le pourcentage de masse grasse ; *iii)* Leur niveau de compétition, les joueurs de football sont professionnels, ils sont donc payés pour s'entraîner et jouer au football, ce qui n'est pas le cas pour les pilotes de BMX de cette étude ; *iv)* La spécificité de l'activité physique et sportive et de l'entraînement, les pilotes de BMX sont des cyclistes, et leur entraînement n'est pas basé sur les sauts, au contraire des entraînements de football et de gymnastique qui incluent les sauts (récupération du ballon en hauteur, prise d'appui pour figure acrobatique au sol, etc.).

Concernant les résultats de P_S , la puissance mécanique produite à $P_S 0,6 N \cdot kg^{-1}$ est supérieure à $P_S 0,4 N \cdot kg^{-1}$, elle-même supérieure à $P_S 0,8 N \cdot kg^{-1}$. Concernant les résultats de cadence maximale de pédalage, elle est atteinte avec la plus faible résistance, et en augmentant la résistance de pédalage, la cadence de pédalage maximale diminue. Cela est dû aux caractéristiques de la relation de force – vitesse du muscle (la puissance mécanique étant le produit de la force et de la vitesse), l'augmentation de la vitesse de raccourcissement entraîne une diminution de la production de force [[Hill 1938](#)], et réciproquement. La résistance $0,6 N \cdot kg^{-1}$ apparaît être la meilleure des 3 résistances pour produire la puissance maximale car elle permet un rapport optimal force – vitesse. $P_S 0,4 N \cdot kg^{-1}$ est supérieure à $P_S 0,8 N \cdot kg^{-1}$ à cause d'une trop faible cadence à $0,8 N \cdot kg^{-1}$.

Puisqu'il existe une forte relation entre la puissance mécanique produite lors du saut vertical et celle produite lors des tests de Charge – Vitesse, et qu'il existe une forte corrélation entre les performances aux tests de Charge – Vitesse et les performances chronométriques sur la ligne droite initiale d'une piste de BMX, il semble important d'améliorer la performance en détente verticale lors du Squat Jump et aux tests de Charge - Vitesse.

1.1.4. Conclusion

Les résultats de cette étude montrent que les propriétés biomécaniques mesurées lors des tests de détente verticale et des tests de Charge – Vitesse sont corrélées à la performance lors de la phase d'accélération en BMX. La variable biomécanique principale mesurée lors de ces tests est la puissance musculaire produite. Il est possible de conclure que la puissance musculaire est un facteur déterminant de la performance lors de la phase d'accélération en BMX et qu'elle peut être évaluée à partir des tests de « Squat Jump » et de Charge – Vitesse.

L'entraînement des pilotes de BMX pourrait inclure ces tests dans le suivi d'entraînement des pilotes. L'amélioration des qualités physiques de puissance musculaire pourrait faire l'objet d'une préparation physique spécifique (*e.g.*, renforcement musculaire, travail spécifique de la puissance des membres inférieurs).

Dans de futures études, il serait intéressant d'évaluer la force développée directement sur la pédale lors du départ, et de quantifier cette charge dans un test de Charge – Vitesse et dans un test de détente verticale. Le but serait de maximiser la puissance musculaire produite à cette charge

1.2. Détermination de l'angle d'inclinaison latérale maximale du cadre de BMX en condition de départ de compétition chez des pilotes entraînés

Lors d'une course de BMX, le départ est un facteur déterminant de la performance finale. Il s'effectue à partir d'une position arrêtée, et la production de puissance mécanique est alors un des paramètres les plus importants. Or, pour atteindre une puissance élevée en cyclisme, la position debout sur les pédales(ou dite de « danseuse ») permet de produire une plus grande puissance que la position assise [Reiser et al 2002]. Cette position debout sur les pédales est également adoptée en BMX par les pilotes car le cadre du BMX est assez petit et il est impossible pour les pilotes adultes de pédaler en position assise.

Le pédalage en position debout sur les pédales est accompagné d'une oscillation latérale du cadre de la bicyclette [Soden and Adeyefa 1979 ; Hull et al. 1990]. Hull et al. [1990] ont étudié le mouvement de l'articulation de la hanche et l'inclinaison du cadre, sur des cyclistes sur route, lors du pédalage en position debout sur les pédales. Ces auteurs ont constaté que la fréquence d'inclinaison latérale du cadre était égale à la fréquence de pédalage et que le cadre s'incline sur le côté droit du cycliste lorsque le membre inférieur gauche produit une puissance maximale et inversement pour le membre inférieur droit. Cela est dû au décalage de la pédale par rapport au plan vertical du cadre en position neutre, et le but de l'inclinaison est de diminuer ce décalage et donc de diminuer la distance verticale entre la hanche et la pédale. Les auteurs ont conclu que l'inclinaison représente un travail fait par les membres supérieurs dans le but d'assister les membres inférieurs à la production du pic de puissance dans la position debout.

Stone et Hull [1993] ont trouvé que les phases de transition d'inclinaison d'un côté à l'autre correspondait aux angles de manivelles 30° et 160° . Dans la phase descendante de la pédale droite ($30^\circ - 160^\circ$), le membre supérieur droit tire le guidon vers le haut et

l'arrière, tandis que le membre supérieur gauche pousse le guidon vers le bas et l'avant, et inversement. Or d'après ces auteurs, l'inclinaison latérale maximale du cadre apparaît à un angle de manivelle d'environ 140°, ce qui coïncide avec le pic de force verticale enregistré sur la pédale, et est assez proche de la phase de transition (160°) d'inclinaison latérale du cadre. [Caldwell et al. \[1998\]](#) ont d'ailleurs observé un pic de force à un angle de manivelle de 155°. [Stone et Hull \[1993\]](#) ont donc conclu que les forces développées par les membres supérieurs sur le guidon produisaient une puissance similaire aux forces développées par les membres inférieurs sur les pédales.

Néanmoins la puissance développée par les forces verticales appliquées sur le guidon est environ 1.5 % de la puissance développée par les membres inférieurs sur les pédales. Donc les membres supérieurs contrôlent l'inclinaison latérale du cadre, mais ce contrôle ne résulte pas en un développement accru de la puissance développée sur les pédales. [Caldwell et al. \[1998\]](#) constatent également qu'en position debout sur les pédales, la masse du cycliste est répartie sur les pédales et le guidon, cette position permet une plus grande liberté de mouvement de la hanche, et cela permet aux bras de réaliser un travail sur le guidon, néanmoins ces auteurs n'ont pas quantifié les forces appliquées sur le guidon.

Une constatation identique est faite lors de tests assis sur cyclo-ergomètre quant à la contribution musculaire des membres supérieurs via le guidon pour parvenir à surpasser les grandes résistances utilisées lors du pédalage [[Baker et al. 2001](#) ; [Baker et al. 2002](#) ; [Doré et al. 2006](#)]. Ces auteurs suggèrent qu'en position assise, le fait de maintenir le guidon, et d'exercer sur celui-ci une traction, permettrait au centre de masse du corps entier de rester à un niveau vertical constant, ce qui permettrait de diriger la poussée du membre inférieur sur la pédale vers le bas. [Caldwell et al. \[1999\]](#) ont montré que lors du pédalage en position debout sur les pédales comparé au pédalage en position assise, l'articulation de la hanche

et le centre de masse se déplaçaient vers le haut et vers l'avant, ce qui permet d'orienter plus verticalement le vecteur de la force appliquée sur les pédales.

En position debout, les forces exercées sur le guidon et l'oscillation latérale du cadre permettent de maintenir le centre de masse au même niveau vertical et de maintenir la distance hanche – pédale égale, respectivement, pour appliquer la force sur les pédales avec plus d'efficacité.

Les pilotes de BMX doivent appliquer une grande force sur les pédales le plus rapidement possible lors des départs, et le pic de force vertical coïncide avec l'angle d'inclinaison latérale maximal du cadre [Stone et Hull 1993]. Le but de cette étude est donc de mesurer, grâce à la vidéo, l'angle d'inclinaison latérale maximale du cadre de BMX (λ) en condition réelle de départ de compétition sur une piste de BMX.

Puisque l'angle λ est celui où le cadre est soumis aux plus fortes contraintes, la valeur d' λ sera utilisée dans une étude ultérieure pour simuler aux éléments finis des contraintes statiques numériques sur le modèle 3D d'un cadre de BMX.

1.2.1. Méthodes

1.2.1.1. Les sujets

Quatorze pilotes de BMX (âge : 18 ± 3 ans ; taille : 1.75 ± 0.05 m ; masse corporelle : 68 ± 10 kg) de niveau régional à national se sont portés volontaires pour cette étude. Chaque sujet a lu et signé un document d'information et de consentement avant d'effectuer l'expérience sur une piste de BMX, Clairoix, France.

1.2.1.2. Matériel et mesures

Les sujets utilisent leur propre BMX de compétition ou d'entraînement et leur propre équipement (ce qui comprend : casque, chaussures, gants et tenues vestimentaires). Des

marqueurs blancs sont placés sur les BMX au niveau de la barre transversale du guidon ou, si c'est impossible, de chaque côté des poignées sur le guidon (Figure IV-8). Ces marqueurs permettent de distinguer plus aisément la barre transversale sur les images vidéo pour mesurer l'angle d'inclinaison λ .

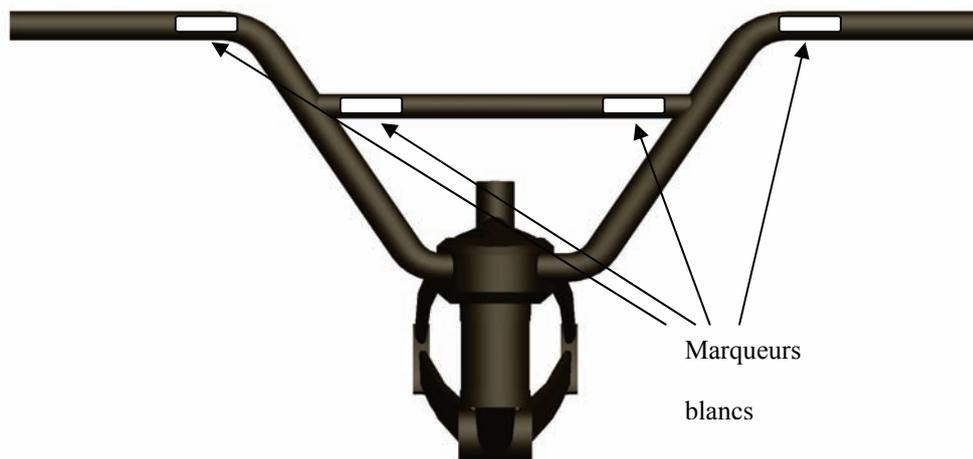


Figure IV-8 Positionnement des marqueurs réfléchissants sur le guidon du BMX

1.2.1.2.1. Mesure de l'inclinaison latérale du BMX

Des images vidéos sont enregistrées grâce à un caméscope numérique mini DV 3CCD (NV-GS230EF-S, PANASONIC, France) dont la résolution est 2.3 mégapixels. La fréquence d'enregistrement est de 25 images/seconde. Ces images vidéo sont ensuite exportées sur PC.

A l'aide d'un logiciel de traitement de l'image vidéo (Windows Movie Maker, Microsoft, France), la trame où le cadre du BMX présente l'angle d'inclinaison latérale maximale par rapport à la verticale (λ) (à droite ou à gauche) est sélectionnée (Figure IV-9), isolée puis enregistrée au format « JPEG ». Les images au format JPEG sont ensuite ouvertes dans le logiciel Pro/ENGINEER® Wildfire 2.0™ (Pro/E).



Figure IV-9 Exemple de trame obtenue à partir d'une image vidéo au moment de l'inclinaison latérale maximale du cadre de BMX (λ).

1.2.1.2.2. Détermination de l'angle d'inclinaison latérale maximale du cadre de BMX (λ)

Les images au format d'extension « JPEG » sont ouvertes dans le logiciel Pro/E et placées sur un des trois plans qui composent la zone de travail tridimensionnelle ([Figure IV-10A](#)). A l'aide de l'outil d'Esquisse, une droite passant par les marqueurs blancs positionnés sur la barre transversale du guidon de BMX est tracée (droite B) ; la droite perpendiculaire à cette dernière est ensuite tracée (droite P). L'angle formé entre la verticale et la droite P est l'angle λ , et il est mesuré par Pro/E ([Figure IV-10B](#)).

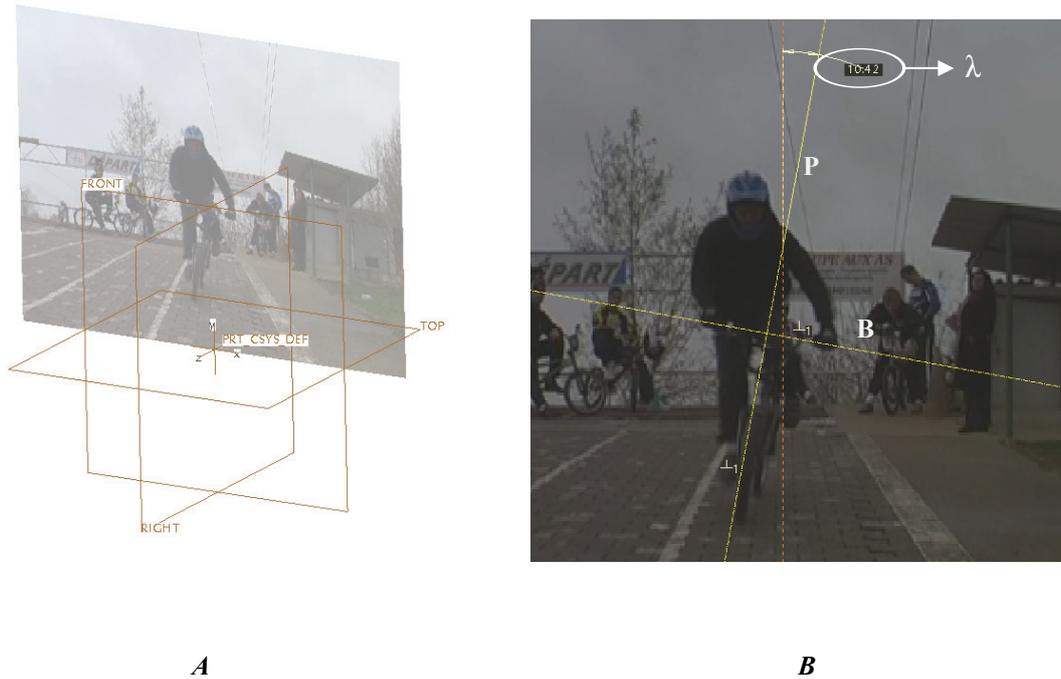


Figure IV-10 Méthode de détermination de l'angle d'inclinaison latérale maximale du cadre de BMX (λ) par rapport à la verticale à l'aide du logiciel Pro/ENGINEER® Wildfire 2.0™ (Pro/E).

1.2.1.3. Protocole

Sur une piste de BMX (Figure IV-11), les pilotes effectuent un départ arrêté identique à celui effectué en compétition. Les BMX sont appuyés contre la grille métallique de départ contrôlée automatiquement qui s'abaisse au signal sonore de départ. Les pilotes ont les deux pieds sur les pédales avant le départ. Ils ont pour consigne d'effectuer un départ à intensité maximale.

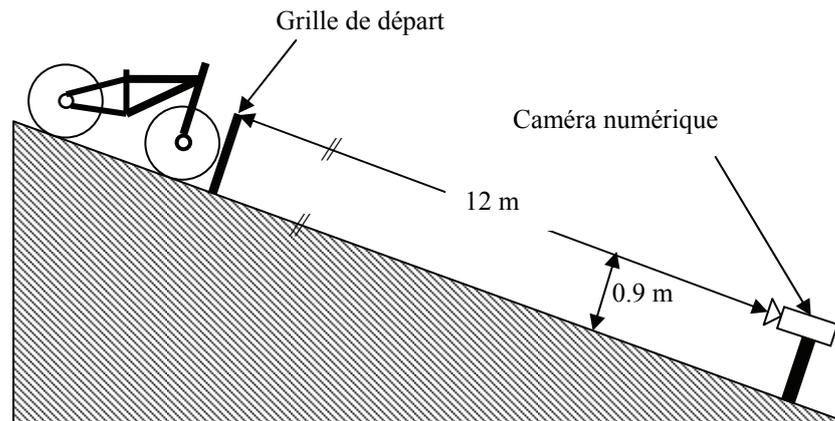


Figure IV-11 Dispositif d'enregistrement vidéo sur la pente de départ de la piste de BMX, Clairoux, France.

Les pilotes doivent pédaler en ligne droite, en direction de la caméra vidéo numérique située à 12 m de la ligne de départ. Cette caméra est placée sur un trépied à 0,9 m au-dessus du sol, l'axe de visée de la caméra est parallèle au sol et la caméra est face aux pilotes. Les pilotes changent de trajectoire lorsqu'ils sont à environ 2 m de la caméra pour la contourner. Une marque au sol indique cette limite. Les sujets effectuent 2 passages dans les mêmes conditions.

1.2.2. Résultats

Les sujets (n=14) ont effectué chacun 2 passages. Sur les 28 essais filmés et enregistrés, seuls 22 ont été analysés, les 6 essais rejetés ne respectaient pas les consignes du protocole. Donc, 22 valeurs d'angle d'inclinaison latérale maximale du cadre de BMX (λ) ont été obtenues. A partir de ces données, la valeur maximale moyenne, l'écart-type, les valeurs maximale et minimale de λ ont été déterminées.

La valeur maximale moyenne (\pm Ecart-Type) de l'angle λ est 11,6 (\pm 5,6) degrés. Les angles minimal et maximal d'inclinaison latérale maximale sont 3,5 et 24,8 degrés, respectivement.

1.2.3. Discussion

L'ordre de grandeur des valeurs mesurées dans cette étude correspond aux valeurs trouvées dans la littérature. La valeur maximale moyenne de l'angle d'inclinaison latérale du cadre de BMX (λ) est 11,6 (\pm 5,6) degrés, elle est supérieure aux valeurs de la littérature : [Soden et Adeyefa \[1979\]](#) ont mesuré un angle d'inclinaison latérale maximale du cadre de \pm 10°, et le même angle a été mesuré pour une valeur maximale de \pm 6° par [Hull et al. \[1990\]](#). Dans les deux études citées, les sujets étudiés utilisaient des cadres différents (type « route ») de celui utilisé dans cette étude.

La différence entre ces deux études réside : 1) dans les conditions et dans la position des cyclistes sur le vélo : Dans l'étude de [Soden et Adeyefa \[1979\]](#), le niveau sur lequel la bicyclette se déplace est incliné de + 10°, et les mains des cyclistes sont placées en bas du guidon au niveau des poignées de frein, ce qui engendre une position sur le vélo plus courbée, et qui entraîne une plus grande inclinaison. Dans l'étude de [Hull et al. \[1990\]](#), le niveau sur lequel la bicyclette se déplace est incliné de + 6°, et les mains des cyclistes sont placées en haut du guidon au-dessus des poignées de frein, ce qui implique une position beaucoup plus droite sur le vélo ; 2) dans le protocole de mesure : [Soden et Adeyefa \[1979\]](#) ont mesuré les angles d'inclinaison à partir de vidéos, or de telles mesures peuvent être limitées par le manque de clarté et la petite taille des images, alors que [Hull et al. \[1990\]](#) ont utilisé un goniomètre électromécanique placé sur le cadre.

La différence de valeurs de l'angle d'inclinaison latérale maximale du cadre entre les résultats de cette étude et les données de la littérature [11,6 (\pm 5,6) ° vs. 6 – 10°, respectivement] peut s'expliquer par différents points. Cette différence réside dans la taille des cadres, le cadre de type « route » est beaucoup plus grand que le cadre de BMX. La taille des cadres de type « route » se mesure en fonction de la longueur du tube de selle (0,48 m – 0,62 m), plus le cycliste sera grand, plus la taille de son entrejambe sera grande

et plus il nécessitera un cadre avec un tube de selle d'une grande longueur. Quant aux cadres de BMX, leur taille se caractérise par la longueur du tube horizontal, qui peut varier de 0,50 m à 0,55 m, la longueur du tube de selle ne dépassant pas 0,30 m.

La plus petite taille du cadre de BMX permettrait une liberté d'inclinaison latérale plus importante, car le tube horizontal se situe au niveau de l'articulation du genou, à l'inverse du tube horizontal d'un cadre de type « route » qui se situe au-dessus de l'articulation du genou, et la hauteur de ce tube dans un cadre de BMX favoriserait l'inclinaison latérale.

La largeur plus grande du guidon de BMX et le placement différent des mains sur celui-ci permettrait également aux membres supérieurs d'appliquer un moment de force supérieur sur le guidon lors de l'inclinaison latérale du cadre, et provoquerait une inclinaison plus forte. Il est possible de supposer, qu'à puissance égale, le cadre de BMX pourrait subir de plus fortes contraintes que les cadres de type « route ».

1.2.4. Conclusion

L'angle d'inclinaison latérale maximale moyen du cadre de BMX est important et plus grand que ceux observés dans la littérature sur des cadres de bicyclettes de type « route ». Cette différence est due essentiellement à la taille du cadre de BMX et à son guidon. L'inclinaison latérale du cadre est utile pour appliquer la force sur les pédales de la manière la plus verticale possible. Sachant que l'inclinaison maximale correspond au pic de force appliquée sur la pédale, il apparaît très important de prendre en compte cet angle d'inclinaison dans des études sur les contraintes subies par le cadre lors du pédalage.

C'est pourquoi la valeur de l'angle λ sera utilisée pour simuler des contraintes numériques sur le modèle 3D d'un cadre de BMX. Cette étude préliminaire déterminera les zones de fortes contraintes auxquelles le cadre est soumis et elle permettra de placer

correctement des jauges de contraintes afin d'étudier les déformations du cadre en conditions réelles de pédalage lors d'un départ de type compétition.

2. Etude expérimentale d'un cadre de BMX en fonction des caractéristiques de l'interface Homme – Machine

Depuis l'invention de la bicyclette moderne au 19^{ème} siècle, la structure tubulaire classique dite en « diamant » du cadre de bicyclette n'a connu que très peu d'évolutions tant au niveau de sa conception qu'au niveau des matériaux la constituant [Lessard et al. 1995]. Pourtant, grâce aux avancées technologiques dans le domaine des matériaux, un nouveau regard s'est porté sur les bicyclettes et leur cadre [Davis et Hull 1980 ; Arola et al. 1999].

Bien que la conception et l'évolution des cadres aient généralement résidé dans l'intuition, le savoir-faire et les essais-erreurs des industriels, il est apparu clairement que l'utilisation de nouveaux matériaux nécessitait une approche différente pour exploiter au mieux leurs propriétés mécaniques [Peterson et Londry 1986]. Les méthodes traditionnelles pour déterminer les meilleures possibilités de conception (empiriques) sont souvent chères, lentes et sources d'erreur. Pour optimiser la conception et minimiser les coûts, l'analyse aux éléments finis est une méthode numérique qui peut permettre une plus grande liberté de test à moindre coût.

Le cadre est l'élément principal de la bicyclette. Il permet de transmettre l'énergie mécanique transmise à la pédale par le cycliste jusqu'à la roue arrière. L'énergie est dépensée pour la propulsion et à travers la déformation élastique [Arola et al. 1999]. Deux paramètres semblent à prendre en compte : la masse du cadre et sa rigidité. Une masse trop importante est handicapante lors des accélérations, et un cadre peu rigide engendrerait une perte d'énergie due à la déformation élastique du cadre [Davis et Hull 1980 ; Lessard et al. 1995 ; Arola et al. 1999].

Plusieurs études se sont intéressées à la conception de cadres en utilisant la méthode aux éléments finis dans le but d'optimiser ses deux paramètres [Davis et Hull 1980 ; Peterson et Londry 1986 ; Castejon et al. 1994 ; Lessard et al. 1995 ; Pantelelis 2005]. La méthode aux

éléments finis permet de simplifier un problème complexe en une multitude de petits problèmes plus simples à résoudre à l'aide de calculs réalisés par ordinateur. Le principe est d'appliquer des forces virtuelles sur un modèle virtuel et numérique du cadre, et d'étudier le comportement mécanique de cette sollicitation. De ce fait, cette méthode nécessite une connaissance des forces appliquées sur le cadre en condition réelle.

Le protocole d'étude des déformations subies par un cadre de BMX se réalise en 3 étapes :

1) Une comparaison des déformations subies par un cadre de BMX en condition statique entre une méthode de mesure expérimentale sur banc d'essai et une méthode numérique d'analyse aux éléments finis.

2) Une étude sur banc d'essai en condition statique des déformations subies par le cadre à l'aide d'un système expérimental de barres et de la quantification des forces appliquées par le pilote sur la pédale.

3) Une étude en condition dynamique des déformations subies par le cadre lors du pédalage.

2.1. Protocole de validation d'une simulation numérique d'un cadre de BMX

Le but de cette étude est de comparer deux méthodes d'études de la déformation élastique d'un cadre de type BMX, une méthode expérimentale à l'aide de jauges d'extensométrie et une méthode de calculs aux éléments finis (simulation numérique), et de comparer les résultats obtenus.

L'objectif est de déterminer si l'évolution des résultats observés à l'aide de la méthode d'analyse aux éléments finis est similaire à celle enregistrée grâce à la méthode expérimentale. En validant l'utilisation du modèle numérique, il serait possible de reproduire fidèlement le comportement réel en déformation du cadre avec un coût et un temps de mise en œuvre réduit. Cette méthode permettrait également une simulation de différents matériaux, de différentes formes de tubes et de différentes géométries de structure de cadre sans la nécessité de réaliser un prototype.

2.1.1. Méthodes

2.1.1.1. Matériels et mesures

2.1.1.1.1. Le cadre de BMX

Un cadre commercial de type BMX ([Figure IV-12](#)) utilisé lors des expérimentations suivantes est constitué d'un alliage d'aluminium 7005 ([Tableau IV-2](#)), composé principalement d'aluminium et de zinc, sa masse est 1,94 kg. La densité de l'aluminium 7005 est $2,8 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, son module d'Young est de 72 000 MPa et son coefficient de Poisson est de 0,33.



Figure IV-12 Cadre de type BMX en alliage aluminium 7005.

Tableau IV-2 Composants constituant de l'alliage d'aluminium 7005 classés par importance décroissante et exprimés en pourcentage.

Composants de l'alliage	Pourcentage (%)
Aluminium, Al	91,0 – 94,7
Zinc, Zn	4,0 – 5,0
Magnésium, Mg	1,0 – 1,80
Autres	~

2.1.1.1.2. Position des jauges d'extensométrie

Lors d'une recherche préliminaire en utilisant la méthode d'analyse aux éléments finis, un modèle numérique représentant un cadre de BMX a été soumis à une force appliquée au niveau de la pédale pour visualiser les zones de plus fortes contraintes.

A partir des résultats obtenus, le cadre de BMX a été équipé de 8 jauges d'extensométrie uniaxiales qui sont placées comme indiqué sur la [Figure IV-14](#). Ces jauges sont disposées de la manière suivante selon le protocole de [Watt et al. \(2002\)](#).

Trois paires de jauges sont placées sur le tube diagonal, le tube de selle et à l'extérieur de la base droite à moins de 0,07 m de l'axe du pédalier, et 1 paire est placée à l'extrémité interne de la base droite. Les jauges sont collées à une distance minimale de 0,03 m des

soudures des tubes pour éviter les concentrations de déformations dues aux intersections tubulaires et à un changement de champ de déformation sous la jauge [Watt et al., 2002 ; Watt 2004].

Les jauges utilisées sont des jauges linéaires d'extensométrie uniaxiales (CEA-13-125UN-350, Vishay Measurements, France) (Figure IV-13) avec une longueur de jauge de 3,18 mm et une résistance nominale de $350 \pm 0,3 \text{ } \Omega$. Le facteur de jauge à 24°C et la sensibilité transverse est de $2,125 \pm 0,5 \text{ } \%$ et $0,5 \pm 0,2 \text{ } \%$, respectivement.

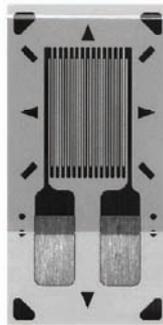


Figure IV-13 Jauge linéaire d'extensométrie uniaxiale CEA-13-125UN-350, Vishay Measurements, France.

Chaque paire de jauges comprend une jauge placée parallèlement à l'axe du tube, et une jauge orientée de 45° par rapport à l'axe du tube. La jauge parallèle est utilisée pour enregistrer les déformations en traction/compression, tandis que la jauge orientée de 45° enregistre les déformations en torsion [Watt et al., 2002 ; Watt 2004].

Sur un arbre cylindrique soumis à une torsion pure, les directions principales font un angle de 45° avec la direction des génératrices. Ainsi une poutre de section carrée peut servir à détecter un couple avec des jauges à 45°, cependant que des jauges longitudinales et transversales servent à détecter les composantes de flexion ou de traction-compression [Avril et Vishay Micromesures 1984].

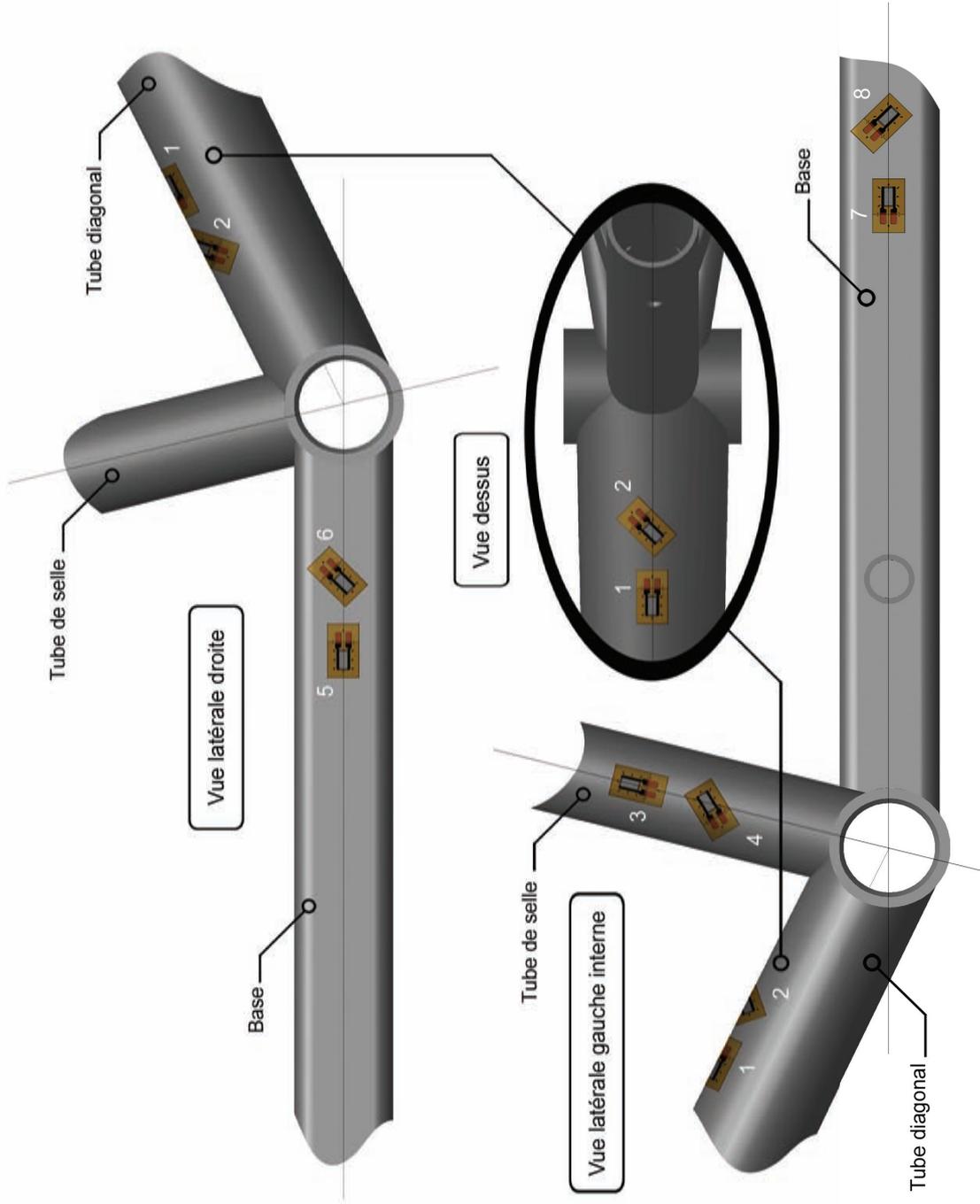


Figure IV-14 Cadre de BMX équipé de 4 paires de jauges d'extensométrie uniaxiales numérotées de 1 à 8 (CEA-13-125UN-350, Vishay Measurements, France). Les jauges sont disposées par paire, une jauge est collée parallèlement à l'axe du tube (impaire), et la seconde est collée selon un angle de 45° par rapport à l'axe du tube (paire).

Lors des mesures en chargement statique, un pont d'extensométrie (P-3500, Vishay Measurements, France) et un boîtier de commutation (SB-10, Vishay Measurements, France) sont utilisés pour l'acquisition des données (Figure IV-15). Les jauges sont reliées au pont d'extensométrie et au boîtier de commutation par des câbles blindés (3 fils, 0,14 mm²) d'une longueur approximative de 3 m.

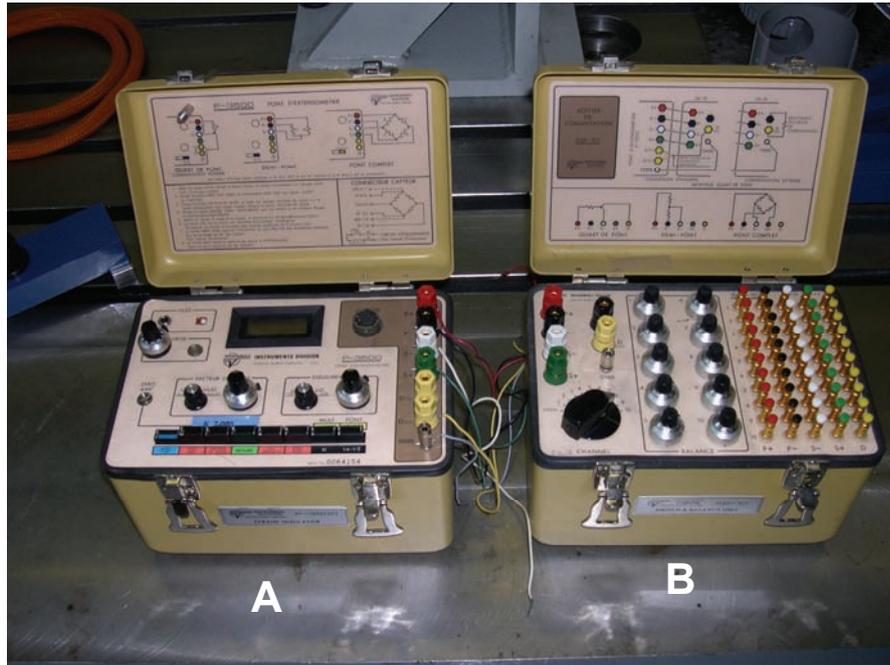


Figure IV-15 Pont d'extensométrie (P-3500, Vishay Measurements, France) [A] et Boîtier de commutation (SB-10, Vishay Measurements, France) [B] utilisés pour l'acquisition des données de déformation du cadre de BMX lors des tests en condition statique.

2.1.1.2. Modèle numérique

Afin de réaliser une analyse aux éléments finis, un modèle numérique du cadre est conçu. Toutes les cotes des éléments constituant le cadre (Longueurs et diamètres des tubes) sont mesurées à l'aide d'un pied à coulisse ($\pm 0,01$ mm de sensibilité). Néanmoins, l'épaisseur de la plupart des tubes n'a pu être mesurée du fait de leur inaccessibilité, et aucune donnée provenant du constructeur n'a été fournie. Les soudures n'ont pas été prises en compte. A partir de ces mesures, un modèle numérique tridimensionnel (3D) proche de la réalité est créé

à l'aide d'un logiciel de Conception Assistée par Ordinateur (C.A.O.) (Pro/ENGINEER® Wildfire™ 2.0, PTC, Etats-Unis) (Figure IV-16).



Figure IV-16 Modèle numérique tridimensionnel (3D) d'un cadre de BMX créé à l'aide d'un logiciel de Conception Assistée par Ordinateur (C.A.O.) (Pro/ENGINEER® Wildfire™ 2.0, PTC, Etats-Unis).

2.1.1.3. Protocole

2.1.1.3.1. Protocole expérimental

Dans le but de vérifier la linéarité de la réponse des jauges d'extensométrie et de valider la déformation du modèle 3D en utilisant la méthode des éléments finis, les mesures de la déformation du cadre sont effectuées en condition statique, avec un contrôle de la charge appliquée. Le cadre équipé des jauges d'extensométrie est fixé sur un banc d'essai, avec la possibilité de supprimer ou d'ajouter à l'avant et à l'arrière du cadre les différentes conditions aux limites.

Sur le banc d'essai, ces conditions sont réalisées en serrant ou desserrant des fixations au niveau du tube de guidon et des emplacements de fixation de la roue arrière (Figure IV-18 B et C). La condition « libre » signifie que la fixation est desserrée, et que le cadre repose tout de même sur un support rigide. Et la condition « bloqué » signifie que les fixations sont serrées au maximum.

Dans la simulation numérique, la condition libre indique que le déplacement vertical vers le bas au niveau du tube de guidon et des emplacements de fixation de la roue arrière

est interdit. La condition « bloqué » indique un encastrement (c'est-à-dire 0 degré de liberté) au niveau du tube de guidon et des emplacements de fixation de la roue arrière.

Bien qu'en BMX aucune force ne soit appliquée verticalement sur le tube de selle, pour valider le modèle numérique avec une plus grande simplicité expérimentale, des masses de 0 à 180 kg sont appliquées sur ce tube avec un incrément de 10 kg (Figure IV-17) dans 3 conditions différentes : 1) « Avant libre – Arrière bloqué », 2) « Avant – Arrière bloqués » et 3) « Avant – Arrière libres ». Ces mesures sont répétées deux fois pour chaque condition.



Figure IV-17 Application d'une charge en condition statique sur le tube de selle d'un cadre de BMX.

Avant toute mesure, une masse de 40 kg est placée constamment sur le cadre entre chaque expérimentation pour permettre aux jauges de mieux réagir aux chargements en leur permettant un placement optimal sur la structure testée. Pour chaque incrémentation, le cadre est totalement déchargé puis rechargé avec le nouvel incrément, le temps de chargement n'est pas pris en compte. Les mesures sont répétées deux fois dans chaque condition. Le tube de selle forme un angle avec l'horizontale d'une valeur approximative de 76 degrés.

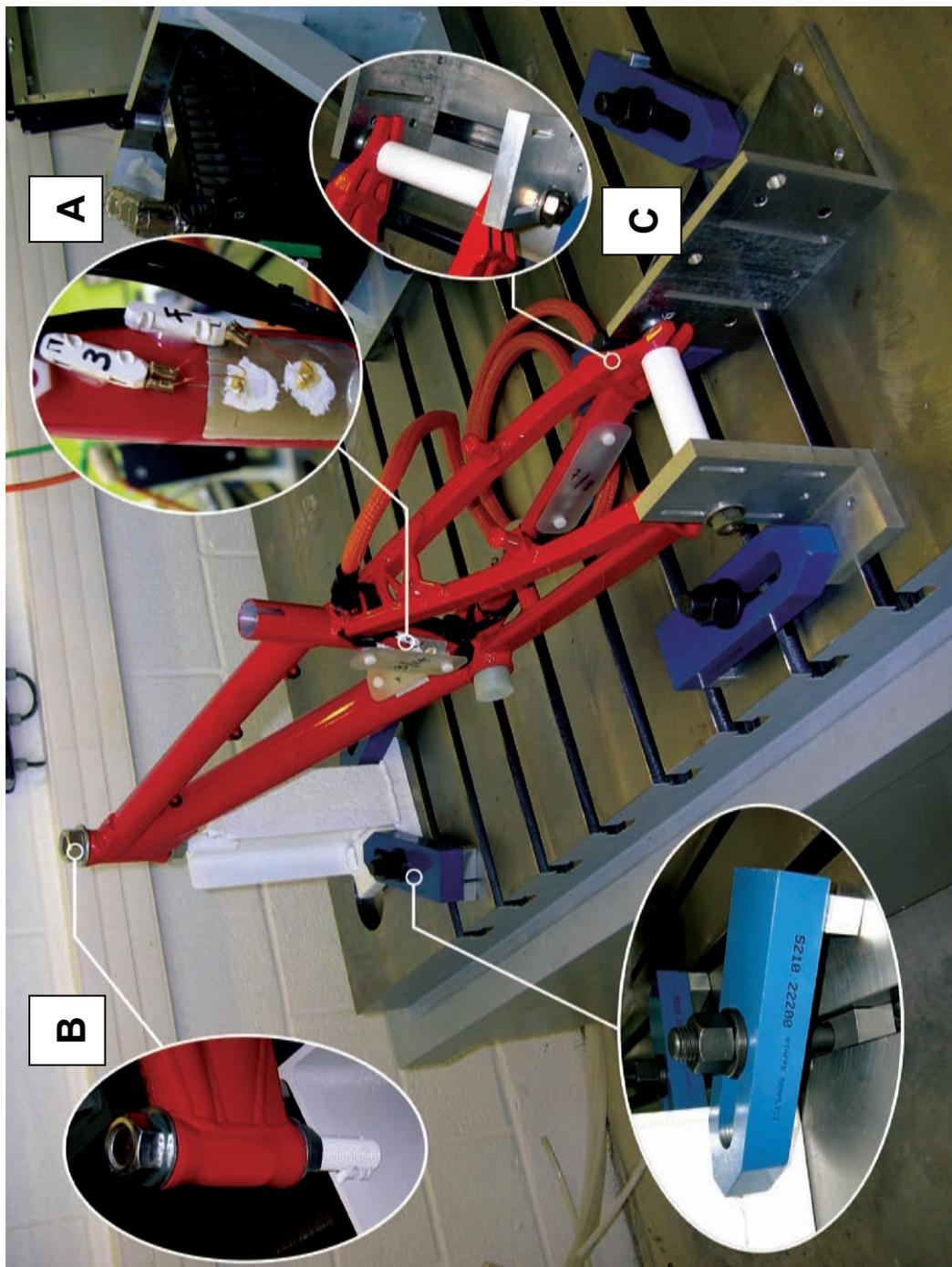


Figure IV-18 Vue d'ensemble d'un cadre de BMX équipé de jauges d'extensométrie (A) et monté sur un banc d'essai avec possibilité d'immobiliser l'avant (B) et l'arrière du cadre (C).

2.1.1.3.2. Protocole numérique

Le modèle numérique 3D du cadre de BMX est importé dans un logiciel d'analyse aux éléments finis (ABAQUS™, Simulia, Dassault Systèmes, France). Pour reproduire le protocole expérimental, un maillage est créé (Figure IV-19). Il est constitué de 184091 nœuds et de 646209 éléments 3D tétraédriques à 4 nœuds (C3D4-Abaqus).

Le matériau utilisé dans cette modélisation est un alliage d'aluminium dont les caractéristiques principales (module de Young (E) de 72 000 MPa et coefficient de Poisson (ν) de 0,33) sont similaires au matériau constituant le cadre de BMX (Aluminium 7005).



Figure IV-19 Maillage aux éléments finis du modèle numérique 3D d'un cadre de BMX (ABAQUS™, Simulia, Dassault Systèmes, France).

Le protocole utilisé est identique au protocole expérimental. Une force de 0 à 1765,8 N avec une incrémentation de 98,1 N est appliquée sur le cadre de manière statique au niveau du tube de selle dans 3 conditions différentes : 1) « Avant libre – Arrière bloqué », 2) « Avant – Arrière bloqués » et 3) « Avant – Arrière libres ». Ces mesures sont répétées deux fois pour chaque condition.

Au préalable, l'emplacement des jauges d'extensométrie sur les tubes du cadre est mesuré à l'aide d'un pied à coulisse ($\pm 0,01$ mm de sensibilité), il est ainsi possible d'étudier les déformations subies par le modèle numérique 3D dans les zones où sont collées les jauges d'extensométrie.

2.1.2. Résultats

Les résultats visuels de la méthode par analyse aux éléments finis sont présentés en Figure IV-20 et en Figure IV-21. Ces illustrations représentent, respectivement, les déplacements verticaux et les contraintes subies par le cadre lors de l'application statique de la force sur le tube de selle du cadre de type BMX.

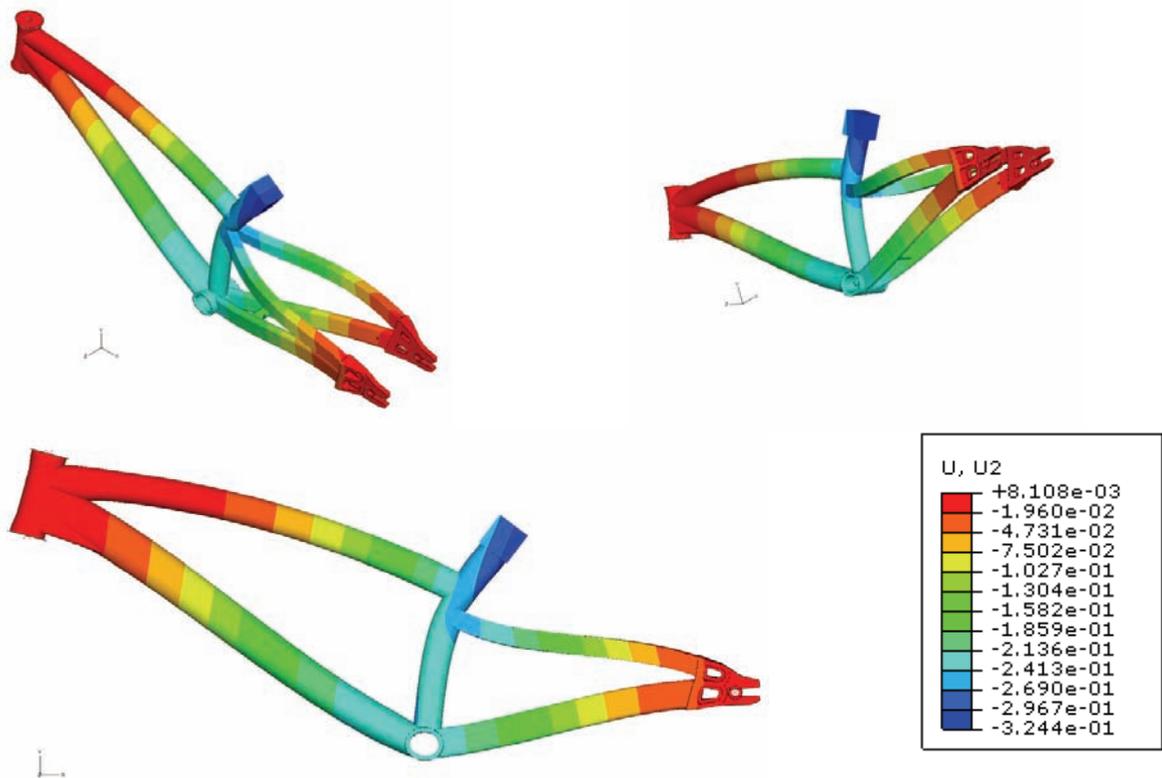


Figure IV-20 Représentations numériques des déplacements verticaux (mm) subies par le cadre lors de l'application d'une force statique sur le tube de selle. Facteur d'échelle : 287.

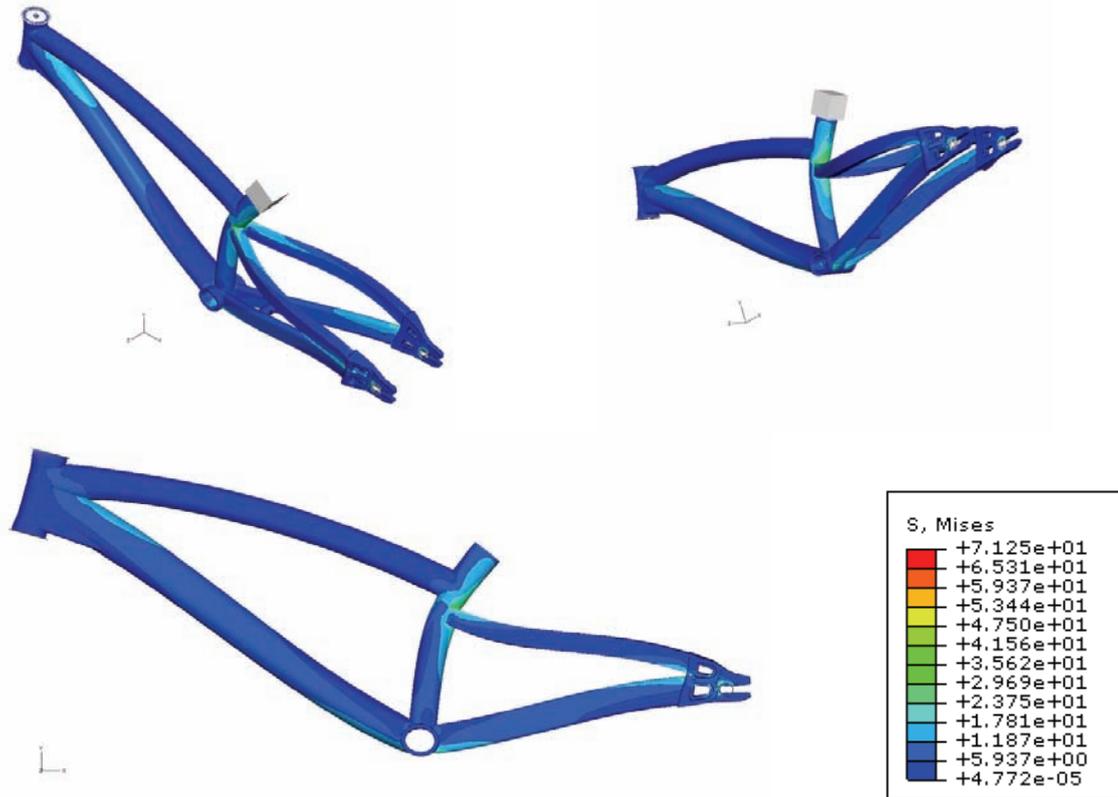


Figure IV-21 Représentations numériques des contraintes (Contraintes de Von Mises) (MPa) subies par le cadre lors de l'application d'une force statique sur le tube de selle. Facteur d'échelle : 287.

Les contraintes maximales observées selon le critère de plasticité de Von Mises dans le cadre de BMX (7,125 MPa) sont inférieures à la limite d'élasticité de l'alliage d'aluminium qui est égale à 460 MPa. La limite d'élasticité représente la contrainte minimale à laquelle un matériau se déforme de manière irréversible. Le critère de plasticité de Von Mises maximal observé étant nettement inférieur à la limite d'élasticité du matériau, le cadre ne subit pas de déformation plastique.

Linéarité de la réponse des jauges d'extensométrie et déformations

Les déformations subies par le cadre de BMX et résultant de l'application statique d'une charge sur le tube de selle ont été enregistrées par chacune des 8 jauges d'extensométrie collées sur le cadre. La démonstration de la réponse linéaire de ces jauges est illustrée pour chaque condition testée pour les jauges parallèles à l'axe du tube et pour

les jauges placées à 45° par rapport à l'axe du tube : 1) « Avant libre – Arrière bloqué » (Figure IV-22), 2) « Avant – Arrière bloqués » (Figure IV-23) et 3) « Avant – Arrière libres » (Figure IV-24). Les déformations en traction et en compression sont représentées par des valeurs positive et négative, respectivement.

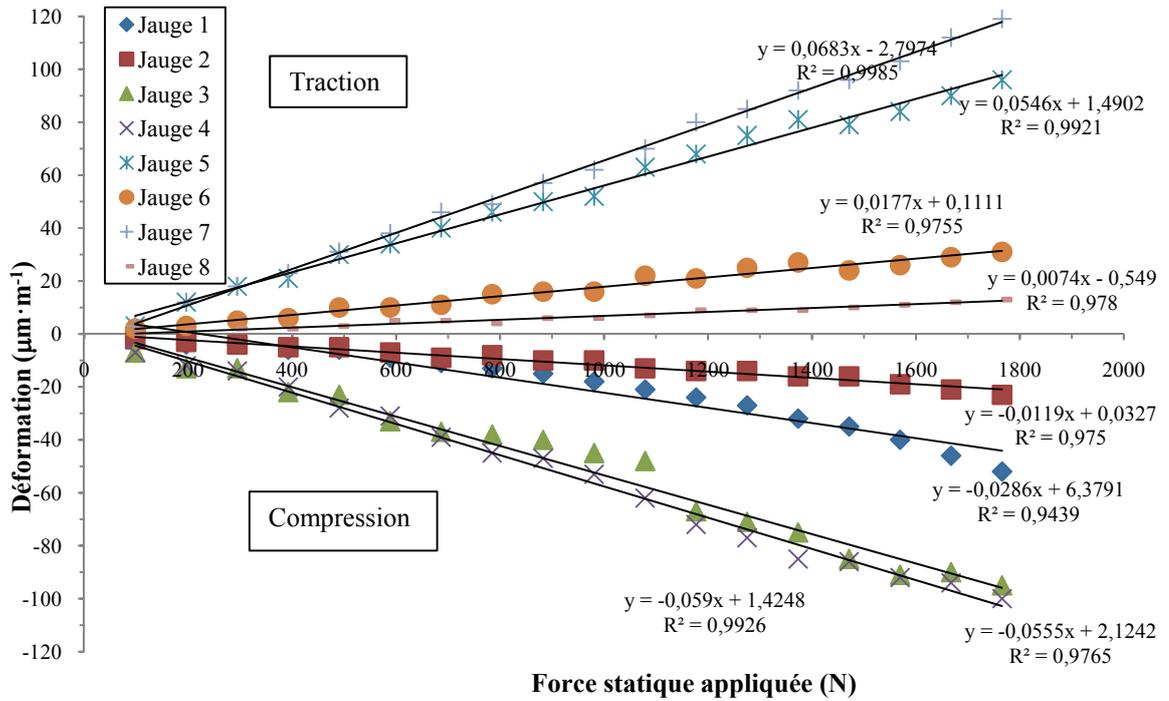


Figure IV-22 Déformations enregistrées par des jauges d'extensométrie résultant d'un chargement statique sur le tube de selle d'un cadre de BMX en condition « Avant libre – Arrière bloqué ». Les déformations en traction et en compression sont représentées par des valeurs positive et négative, respectivement.

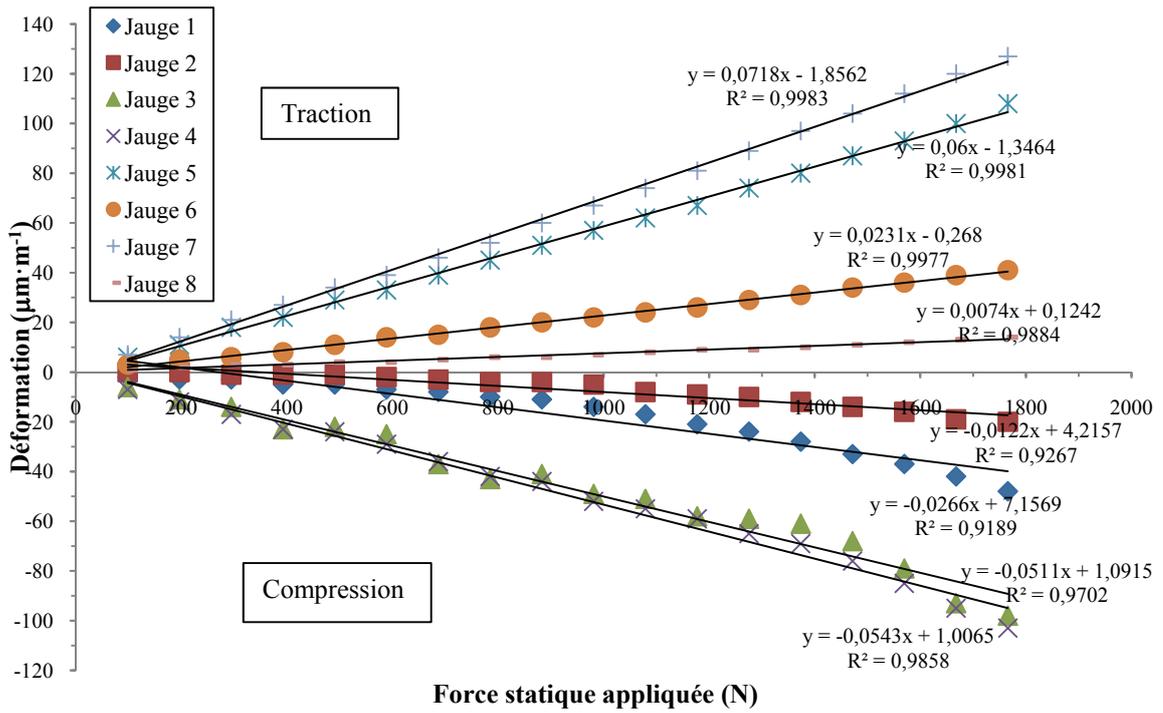


Figure IV-23 Déformations enregistrées par des jauges d'extensométrie résultant d'un chargement statique sur le tube de selle d'un cadre de BMX en condition « Avant – Arrière bloqués ». Les déformations en traction et en compression sont représentées par des valeurs positive et négative, respectivement.

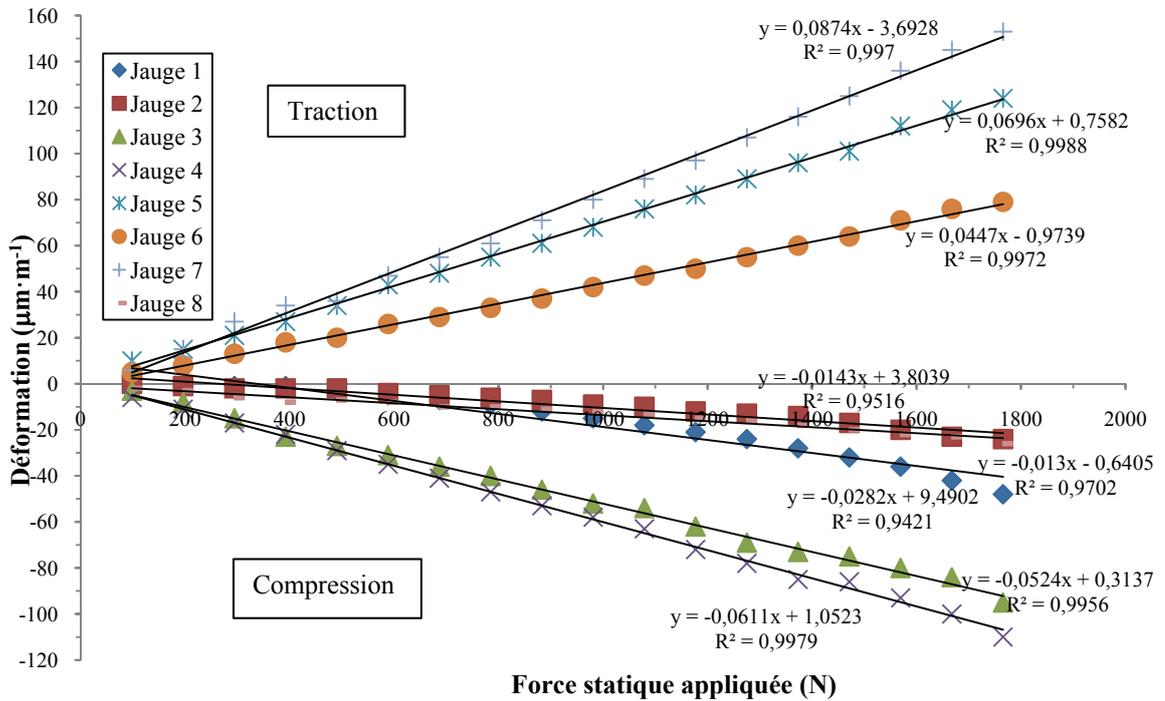


Figure IV-24 Déformations enregistrées par des jauges d'extensométrie résultant d'un chargement statique sur le tube de selle d'un cadre de BMX en condition « Avant – Arrière libres ». Les déformations en traction et en compression sont représentées par des valeurs positive et négative, respectivement.

Les jauges d'extensométrie notées 1 à 4 subissent dans les 3 conditions une déformation en compression, tandis que les jauges 5 à 8 subissent une déformation en traction dans les 3 conditions, à l'exception de la jauge 8 qui subit une déformation en compression dans la condition « Avant – Arrière Libres » ([Figure IV-24](#)).

Les déformations sont similaires dans les 3 conditions testées pour la majorité des jauges. En effet, les jauges situées sur la base arrière droite (5, 6 et 7) enregistrent une déformation en traction plus fortes lorsque l'avant et l'arrière du cadre sont libres, c'est-à-dire lorsque le cadre repose simplement sur un support à l'avant et à l'arrière.

Pour la jauge 5, la moyenne des différences de déformation en traction est de +24% et de +21% entre la condition « Avant libre – Arrière bloqué » et la condition « Avant – Arrière libres » et entre la condition « Avant – Arrière bloqués » et la condition « Avant – Arrière libres », respectivement.

Pour la jauge 6, la moyenne des différences de déformation en traction est de +148% et de +91% entre la condition « Avant libre – Arrière bloqué » et la condition « Avant – Arrière libres » et entre la condition « Avant – Arrière bloqués » et la condition « Avant – Arrière libres », respectivement.

Pour la jauge 7, la moyenne des différences de déformation en traction est de +28% et de +20% entre la condition « Avant libre – Arrière bloqué » et la condition « Avant – Arrière libres » et entre la condition « Avant – Arrière bloqués » et la condition « Avant – Arrière libres », respectivement.

Comparaison condition expérimentale et condition numérique

Pour comparer l'évolution des données de déformations expérimentale et numérique correspondantes à chacune des jauges, des tests de corrélation sont réalisés ([Figure IV-25](#), [Figure IV-26](#) et [Figure IV-27](#)). Les tests de corrélation réalisés pour chacune des jauges

dans chacune des conditions testées montrent un coefficient de corrélation moyen supérieur à 0,98.

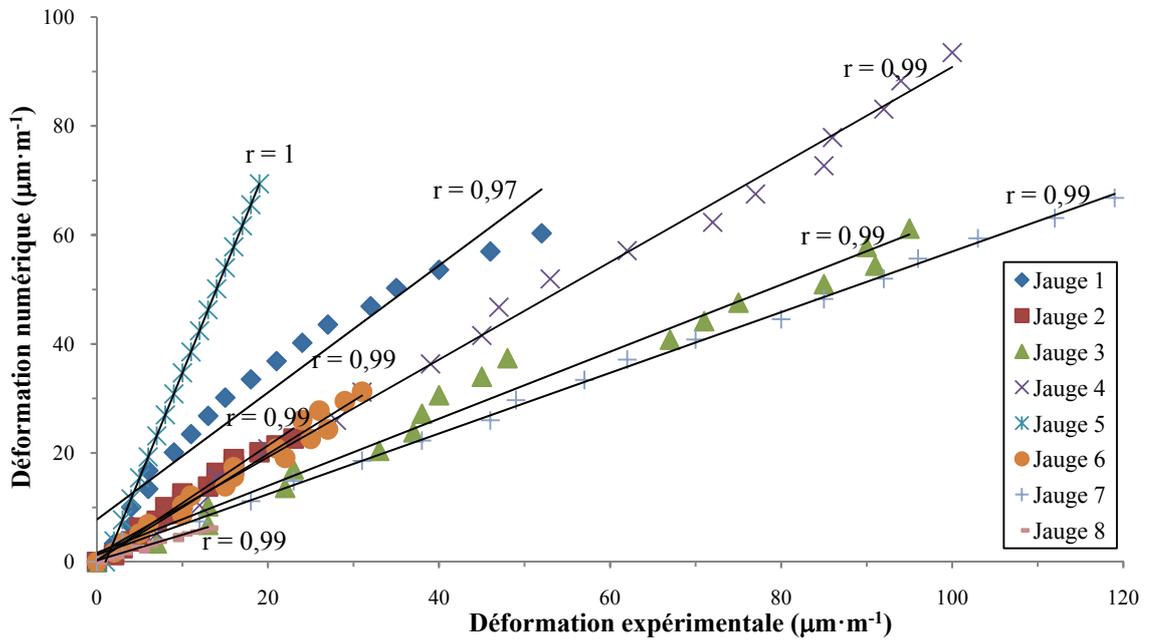


Figure IV-25 Corrélations des mesures de déformations entre la condition expérimentale et la condition numérique en condition « Avant libre – Arrière bloqué ». Les mesures de déformation sont exprimées en valeurs absolues.

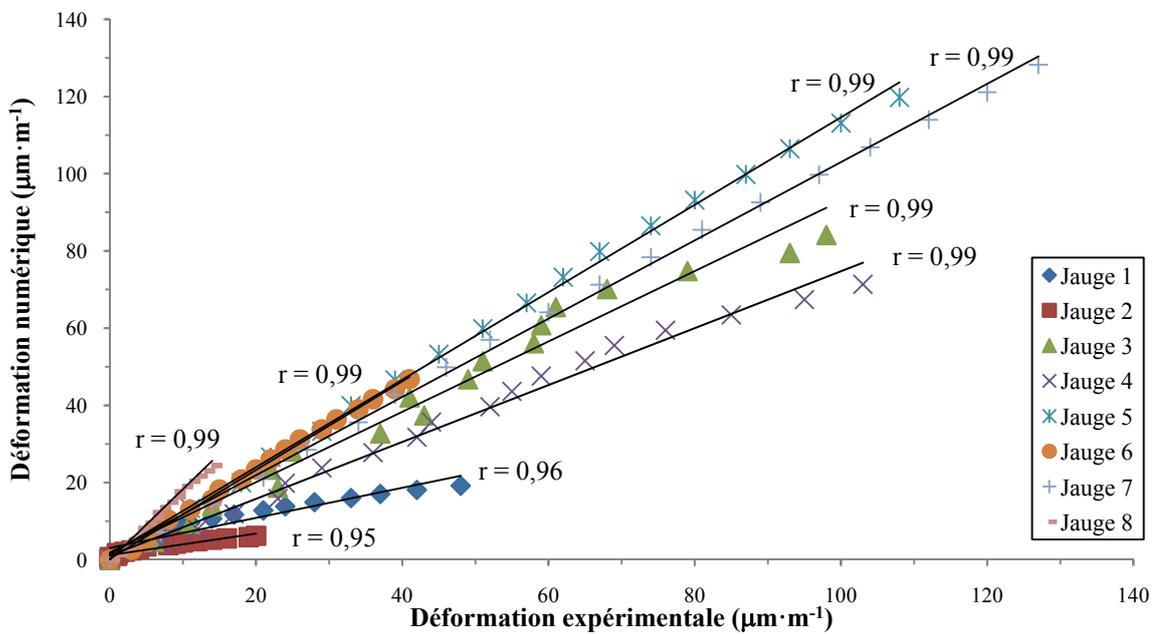


Figure IV-26 Corrélations des mesures de déformations entre la condition expérimentale et la condition numérique en condition « Avant – Arrière bloqués ». Les mesures de déformation sont exprimées en valeurs absolues.

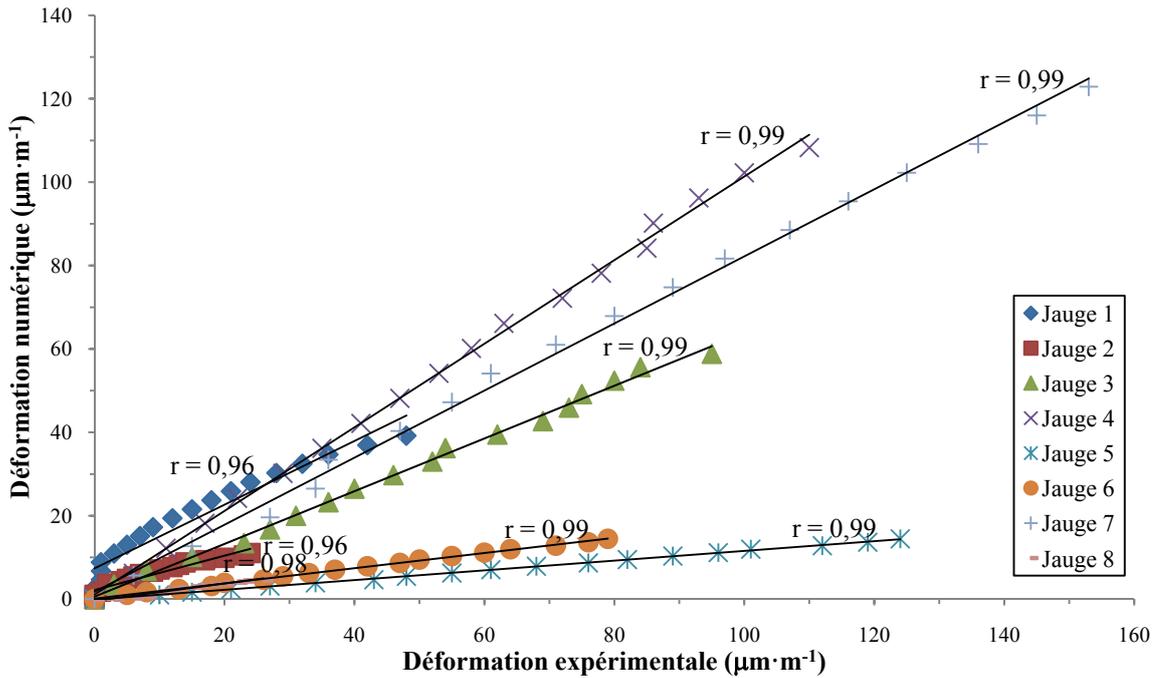


Figure IV-27 Corrélations des mesures de déformations entre la condition expérimentale et la condition numérique en condition « Avant – Arrière libres ». Les mesures de déformation sont exprimées en valeurs absolues.

2.1.3. Discussion

Les jauges d'extensométrie présente une réponse linéaire à la déformation subie lors d'une force statique appliquée sur le tube de selle.

Les déformations enregistrées en condition expérimentale et en condition numérique sont corrélées ($r > 0.98$) dans les conditions testées. L'évolution de la déformation en fonction de la force appliquée est similaire en condition expérimentale et en condition numérique pour les 3 types de fixations du cadre.

Les différences de déformation de certaines jauges selon la méthode utilisée peuvent s'expliquer par le fait qu'en condition numérique, les conditions aux limites soient « parfaites ». Lorsque le cadre est encastré à l'avant et à l'arrière, il n'y aura aucun déplacement de la structure à ces emplacements lors de l'application de la force. Ce qui n'est pas le cas en conditions expérimentales. Cela peut s'expliquer également par le fait

que le modèle numérique ne prend pas en compte les soudures entre les tubes qui existent sur le cadre.

En conditions expérimentale et numérique, les jauges enregistrant les plus grandes déformations sont les jauges 3 et 4 (placées sur le tube de selle) et les jauges 5 et 7 placées sur la base arrière droite. Cela s'explique par la position de l'application de la force, sur le tube de selle.

En condition expérimentale, le comportement des jauges est identique pour les trois types de fixation du cadre placé sur le banc d'essai. Néanmoins pour les jauges 5, 6 et 7, les déformations apparaissent plus importantes lorsque le cadre est en condition « Avant – Arrière libre » en comparaison avec les conditions « Avant libre – Arrière bloqué » et « Avant – Arrière bloqués ». Et pour ces mêmes jauges, les déformations sont plus importantes en condition « Avant – Arrière bloqués » en comparaison avec la condition « Avant libre – Arrière bloqué ».

Ces jauges étant situées sur la base arrière droite, cette différence peut s'expliquer par les différences induites par les conditions d'expérimentation. Dans la condition « Avant – Arrière bloqués », l'avant du cadre est limité dans ses déplacements verticaux et horizontaux. La force appliquée sur le tube de selle verticalement et dirigée vers le bas concentrerait les déformations au niveau du tube de selle, de l'axe du pédalier et des bases arrière. Dans la condition « Avant – Arrière libres », la force appliquée sur le tube de selle provoque les plus grandes déformations dans les jauges 5, 6 et 7 car le cadre n'est pas retenu à l'avant et à l'arrière il repose simplement sur des supports. Cette liberté permettrait au cadre une plus grande déformation.

2.1.4. Conclusion

La méthode d'analyse aux éléments finis permet de simuler les déformations d'une manière similaire à celle observée en condition expérimentale (jauges d'extensométrie).

Les tubes subissant les plus fortes déformations lors de cette expérimentation sont le tube de selle et la base arrière droite. Néanmoins, les contraintes subies par le cadre n'ont pas entraîné une déformation irréversible de la structure.

Les résultats obtenus montrent qu'il est possible d'étudier une structure métallique par simulation numérique. Cette méthode d'analyse aux éléments finis permettrait d'optimiser la conception de cadres en modifiant à volonté leur structure et leur géométrie.

2.2. Etude expérimentale de la déformation du cadre en quantifiant la force appliquée sur la pédale par le pilote

Afin de comprendre l'implication des forces appliquées lors du pédalage dans la déformation du cadre, un système de barre a été conçu pour décomposer ces forces et comprendre leur rôle dans la déformation du cadre. Le but de cette expérimentation est d'étudier, en condition statique, la déformation du cadre de BMX en reproduisant les couples moteurs (C , en $N \cdot m$) appliqués par le pilote sur la pédale et la manivelle lors d'un départ de type compétition.

2.2.1. Méthodes

2.2.1.1. Matériels et mesures

2.2.1.1.1. Le système de barres

Pour simuler les couples moteurs appliqués au niveau du pédalier par le pilote lors du pédalage, un système de barres a été conçu en acier XC 38 ([Figure IV-28](#)), il est constitué de deux barres. Ce système a été conçu pour se visser dans l'axe de pédalier d'un cadre de bicyclette. Son universalité permet d'adapter ce système à tous les cadres.



Figure IV-28 Système composé de deux barres en Acier XC 38. Conçu pour être vissé dans l'axe de pédalier d'une bicyclette et permettant la simulation des couples appliqués par le pilote au niveau de l'axe de pédalier du cadre.

Ce système de barres représente les deux leviers d'application des forces lors du pédalage. La barre qui se visse directement dans l'axe de pédalier et qui est transversale au cadre représente la distance perpendiculaire au cadre entre le point d'application de la force sur la pédale et le centre de l'axe du pédalier (0,14 m). La seconde barre, parallèle au cadre, représente la longueur de la manivelle (0,175 m).

2.2.1.1.2. Couple moteur et force maximaux appliqués par un pilote de BMX

Pour simuler au mieux les déformations subies par le cadre suite à l'application d'une force sur la pédale, les couples moteurs maximaux produits au niveau de l'axe de la roue arrière par 38 pilotes de BMX sont enregistrés à l'aide d'un PowerTap (modèle Professional, CycleOps, Etats-Unis) (Figure IV-2) lors d'un départ de type compétition.

Le couple maximal au niveau du pédalier est calculé en fonction du couple maximal mesuré au niveau de la roue arrière et du rapport entre le pédalier et la roue arrière. Les pilotes ont utilisé un rapport égal à 2,75, c'est-à-dire que pour un tour de pédalier, la roue arrière tourne 2,75 fois. En appelant C_1 et C_2 les couples moteurs respectifs du pédalier et de la roue arrière, et en supposant que la transmission de puissance entre le pédalier et la roue arrière est parfaite, on peut exprimer C_1 comme :

$$C_1 = 2,75 \times C_2 \quad (11)$$

Sur 38 pilotes de BMX, le couple moteur maximal appliqué au niveau du pédalier lors des tests de sprints en position de « danseuse » est de 126 N·m. La force efficace maximale appliquée (perpendiculairement à la manivelle) sur la pédale est le rapport du couple moteur maximal sur la longueur de la manivelle ($l = 0,175\text{m}$). La force efficace maximale appliquée est de 720 N.

2.2.1.2. Protocole

Les mesures de la déformation d'un cadre équipé de jauges d'extensométrie sont effectuées en condition statique, avec un contrôle de la charge appliquée. Le cadre équipé des jauges d'extensométrie est fixé sur un banc d'essai et le système de barres est vissé dans l'axe de pédalier (Figure IV-29).



Figure IV-29 Dispositif expérimental comprenant un cadre de BMX fixé sur un banc d'essai et un système de barres vissé dans l'axe de pédalier.

Puisque la force maximale efficace appliquée par un pilote est égale à environ 720 N, la déformation du cadre sera mesurée en fonction d'une force entre 0 et 850 N. La force que le pilote applique sur la pédale peut être décomposée en 2 couples : un couple selon l'axe X qui résulte de la force appliquée sur la pédale et de la distance transversale entre le point d'application de la force et le centre du pédalier (0,14 m), et un couple selon l'axe Y qui résulte de la force appliquée sur la pédale et de la longueur de la manivelle (0,175 m).

Dans le but de comprendre la déformation du cadre en fonction des couples moteurs appliqués sur la pédale, cette expérimentation est décomposée en 2 conditions :

Application d'une force \vec{F}_1 provoquant un couple autour de l'axe X (Figure IV-30) : le bras de levier mesure 0,6 m et pour obtenir un couple similaire à celui de forces

appliquées sur la pédale par un pilote comprises entre 0 et 850 N, des charges de 0 à 20 kg sont appliquées avec un incrément de 1 kg.

Application d'une force \vec{F}_2 provoquant un couple autour de l'axe X et un couple autour de l'axe Y (Figure IV-32) : les bras de levier mesurent 0,7 m et 0,87 m et pour obtenir deux couples similaires à celui de forces appliquées sur la pédale par un pilote comprises entre 0 et 850 N, des charges de 0 à 21 kg sont appliquées avec un incrément de 1 kg.

Les charges sont appliquées sur le système de barres à l'aide câbles en aciers sur lesquels les charges sont fixées. Les mesures ne sont pas répétées.

2.2.2. Résultats

Pour les 2 conditions, les jauges 2,5, 7 et 8 mesurent une déformation en traction, et les jauges 1, 3, 4 et 6 mesurent une déformation en compression.

Dans la première condition, les déformations les plus importantes sont présentes sur le tube de selle (jauge 3 en compression) et sur la base arrière droite (jauge 7 en traction) (Figure IV-31). Dans la seconde condition, les déformations les plus importantes sont enregistrées au niveau du tube en diagonale (jauge 1 en compression), au niveau du tube de selle (jauge 3 en compression) et au niveau de la base arrière droite (jauge 7 en traction) (Figure IV-33).

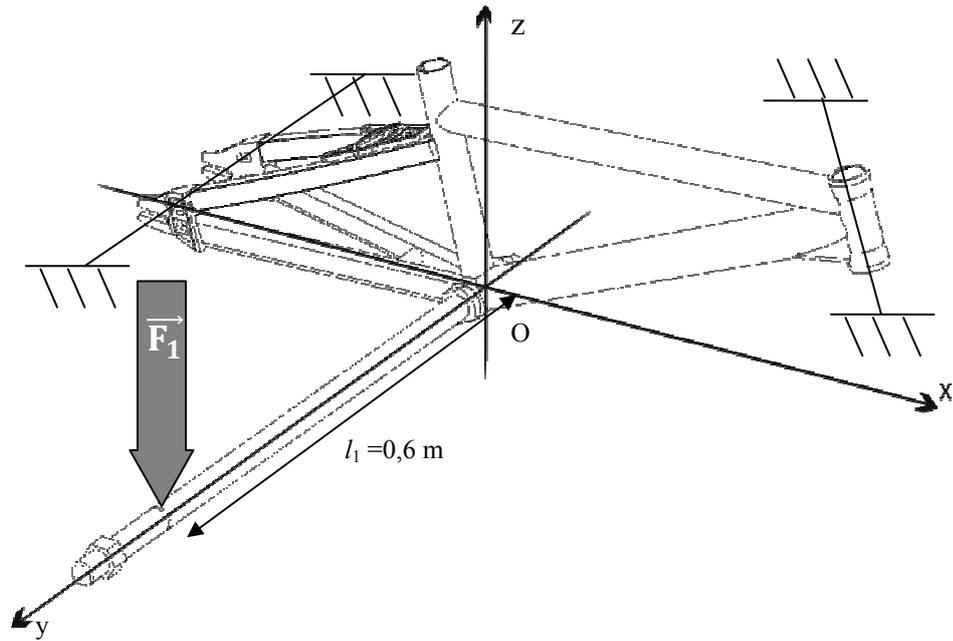


Figure IV-30 Dispositif d'application de la force \vec{F}_1 sur une barre vissée dans l'axe de pédalier d'un cadre de type BMX pour créer un moment autour de l'axe X avec un bras de levier l_1 d'une longueur égale à 0,6 m.

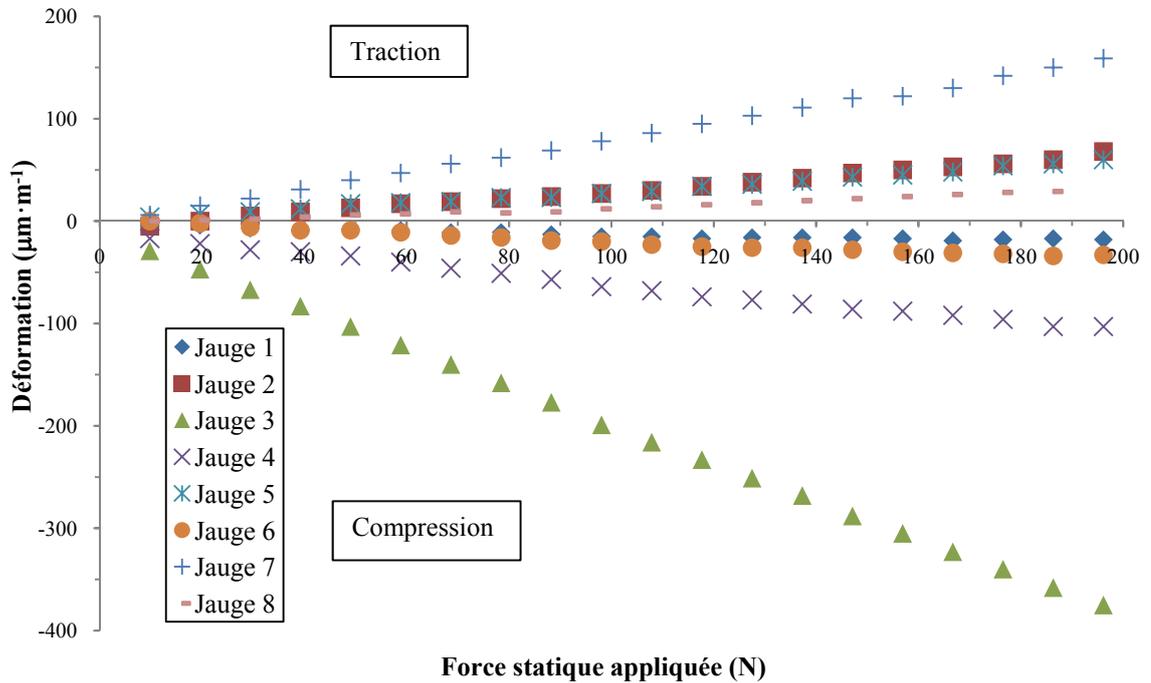


Figure IV-31 Déformations enregistrées à l'aide de jauges d'extensométrie résultantes d'une force \vec{F}_1 statique appliquée sur un bras de levier l_1 mesurant 0,6 m fixé dans l'axe de pédalier.

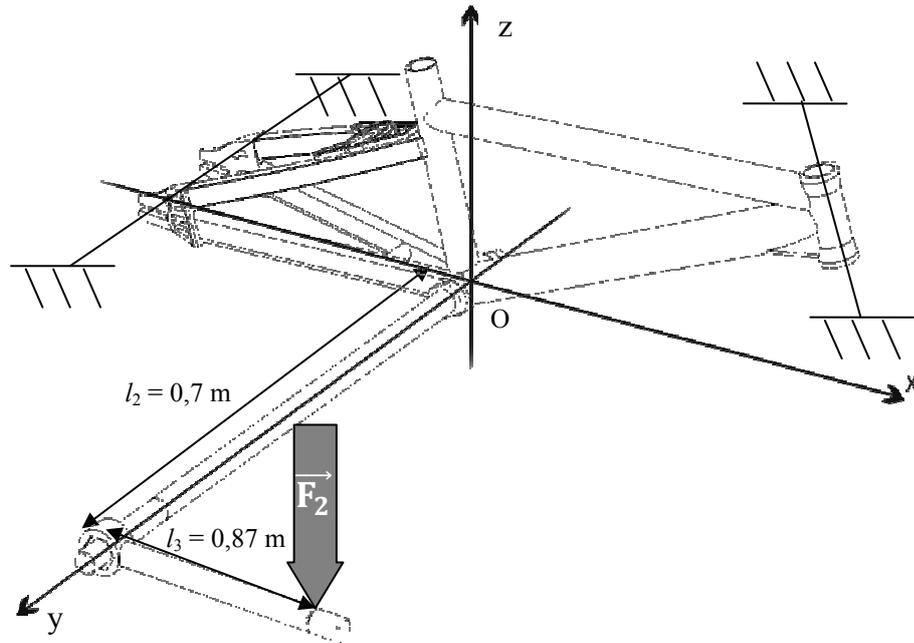


Figure IV-32 Dispositif d'application de la force \vec{F}_2 sur un système de barres fixées dans l'axe de pédalier d'un cadre de type BMX pour créer un moment autour de l'axe X et autour de l'axe Y, avec un bras de levier l_2 d'une longueur égale à 0,7 m et un bras de levier l_3 d'une longueur égale à 0,87 m, respectivement.

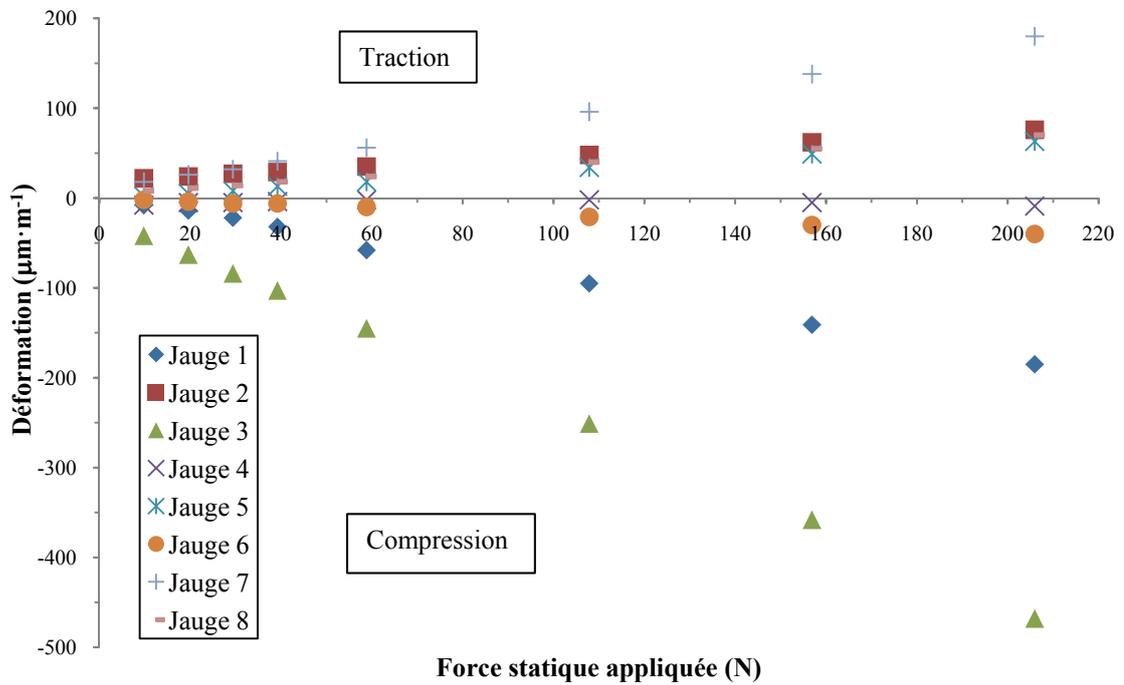


Figure IV-33 Déformations enregistrées à l'aide de jauges d'extensométrie résultantes d'une force \vec{F}_2 statiques appliquées sur des bras de levier l_2 et l_3 , mesurant 0,7 et 0,87 m, respectivement.

2.2.3. Discussion

Dans les 2 conditions, toutes les jauges réagissent aux déformations de la même façon : les jauges 2, 5, 7 et 8 réagissent aux déformations en tractions, et les jauges 1, 3, 4 et 6 aux déformations en compression.

Dans les 2 conditions, les déformations les plus importantes sont enregistrées par les jauges 1, 3 et 7. Ces jauges sont placées respectivement sur le tube diagonal, le tube de selle et la base arrière droite. La jauge 1 réagit aux déformations provoquées par le couple autour de l'axe Y et la jauge 7 réagit aux déformations provoquées par le couple autour de l'axe Z. Quant à la jauge 3, elle réagit plus fortement lorsque la force appliquée engendre un couple autour de l'axe X.

Ces résultats indiquent que le cadre subit peu de déformation lorsque la force appliquée engendre un couple autour de l'axe Y. Le tube qui supporte l'effort dans cette condition est le tube diagonal. Le tube de selle quant à lui subit également les plus fortes déformations dans les 2 conditions.

Malgré des couples importants, la plupart des tubes du cadre subissent peu de déformations. Néanmoins, dans les deux conditions, le tube de selle est le plus sollicité en déformation. Bien que ce tube ne soit pas en contact avec le pilote de BMX lors du pédalage, il peut apparaître comme un élément important car il assure la liaison de tous les tubes du cadre. Ces résultats devront être confirmés par une étude des déformations du cadre en condition de pédalage avec un pilote.

2.3. Mesures des déformations subies par le cadre de BMX en condition dynamique

Afin de compléter les résultats obtenus lors des expérimentations en condition statique, et de se rapprocher des déformations réellement subies par le cadre en condition de pédalage, l'objectif est d'étudier les déformations du cadre de BMX subies lors de différentes actions provoquées par un pilote.

Cette expérimentation a également pour but d'aider à l'élaboration d'un protocole expérimental dans l'étude des déformations subies par le cadre en fonction des forces appliquées sur les pédales par le pilote.

2.3.1. Méthode

2.3.1.1. Matériels et mesures

Une bicyclette de type BMX équipée de deux pédales instrumentées, de jauges d'extensométrie, d'un pédalier instrumenté repose sur un ergo-trainer adapté pour les BMX durant les tests (Figure IV-34).



Figure IV-34 Bicyclette de type BMX placée sur un ergo-trainer équipée d'un capteur de puissance, de deux pédales instrumentées, et d'un cadre équipé de jauges d'extensométrie.

La bicyclette est fixée sur cet ergo-trainer par l'axe de la roue arrière. Une résistance est générée par cet appareil par le biais d'un rouleau en contact avec le pneumatique de la roue arrière. La bicyclette est positionnée horizontalement, à niveau.

Afin d'étudier l'intensité et l'orientation des forces appliquées sur les pédales par le pilote en fonction du temps et la façon dont ces forces influencent le comportement en déformation du cadre, la bicyclette est équipée de deux pédales instrumentées avec des capteurs d'effort à 6 composantes (Sensix, France) (Figure IV-35). La fréquence d'échantillonnage de ces pédales est de 250 Hz. Ces pédales sont prévues pour s'adapter à des chaussures standards de cyclisme. Ces pédales instrumentées permettent de mesurer les forces antéro-postérieures, latéro-médiales et verticales appliquées sur la pédale et le couple global appliqué sur le pédalier en fonction du temps. Le repère orthonormé de la pédale est similaire à celui de la Figure III-7.

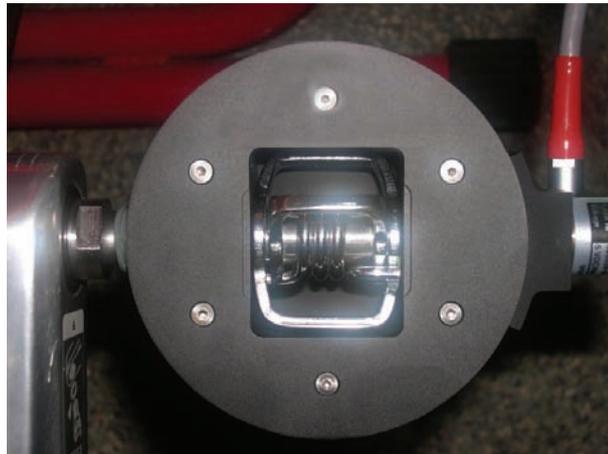


Figure IV-35 Pédale instrumentée avec un capteur d'effort à 6 composantes (Sensix, France).

La bicyclette est également équipée d'un capteur de puissance SRM (SRM Training System BMX, Schoberer Rad Messtechnik, Allemagne) (Figure IV-36) constitué de 8 jauges de contrainte, dont la fréquence d'échantillonnage est de 2 Hz. La validité du système SRM a été démontrée par Jones et Passfield (1998) Les pédales instrumentées sont liées au pédalier instrumenté à l'aide de manivelles (DXR, Shimano, France) dont la longueur est de 0,175 m. Le SRM mesure et enregistre la puissance mécanique développée

(P , W) et la cadence de pédalage (Cad , $tr \cdot min^{-1}$) en fonction du temps. Avant chaque test, le système SRM est calibré en fonction des recommandations du constructeur.



Figure IV-36 Capteur de puissance SRM (SRM Training System BMX, Schoberer Rad Messtechnik, Allemagne).

Lors des mesures, les déformations en fonction du temps sont enregistrées avec l'aide d'un ordinateur et d'un système d'acquisition dynamique (Model 5100A Scanner, Vishay Instruments Division, France) dont la fréquence d'échantillonnage est de 10 Hz (Figure IV-37).



Figure IV-37 Système d'acquisition dynamique (Model 5100A Scanner, Vishay Instruments Division, France).

2.3.1.2. Protocole

Un pilote (âge : 24 ans ; taille : 1,75 m ; masse corporelle : 77,8 kg ; masse grasse corporelle : 17,2 %) de niveau national s'est porté volontaire pour cette étude. Il a lu et signé un document d'information et de consentement avant d'effectuer l'expérience dans le

laboratoire du L.A.C.M., Reims, France. Un seul pilote a réalisé cette étude pour que la masse et la technique soient constantes à travers l'expérimentation et n'affectent pas les résultats [Stone et Hull 1995 ; Watt et al. 2004]

Ce sujet réalise trois types de tests : 1) Le pilote a pour instruction d'appliquer une force isométrique maximale debout sur la pédale droite en s'aidant du guidon. Les manivelles sont horizontales, avec la pédale droite en avant. La roue arrière est bloquée. ; 2) En condition dynamique, le pilote effectue deux essais de pédalage sur ergo-trainer en position debout sur les pédales à une cadence de 100 et 200 $\text{tr}\cdot\text{min}^{-1}$ et à une puissance de 300 et 550 W, respectivement ; et 3) En condition dynamique, le pilote réalise avec la bicyclette un saut vertical sous-maximal sur place sans aucune vitesse de déplacement préalable, avec les manivelles horizontales et la pédale droite vers l'avant.

Dans les 3 tests, le cycliste porte des chaussures avec système de fixation automatique. La pression de gonflage pour les pneumatiques avant et arrière est 200 et 250 kPA, respectivement.

2.3.2. Résultats

Premier test : Effort maximal isométrique sur la pédale droite

Les forces tridimensionnelles appliquées sur la pédale droite en condition isométrique maximale (Figure IV-38) à partir du temps $t = 2$ s peuvent être décrites comme suit : la force verticale appliquée est dirigée vers le bas et elle atteint une valeur maximale de 1330 N. Dans la direction antéro-postérieure, la force appliquée est dirigée principalement vers l'arrière avec une valeur maximale est de 184 N. Et les forces latéro-médiales sont appliquées également de chaque côté du centre de la pédale, avec des valeurs maximales latérale et médiale égales à 53 et 52 N, respectivement.

Le couple global au niveau de l'axe du pédalier est également mesuré (Figure IV-39). Le pilote applique un couple maximal de 140 N·m.

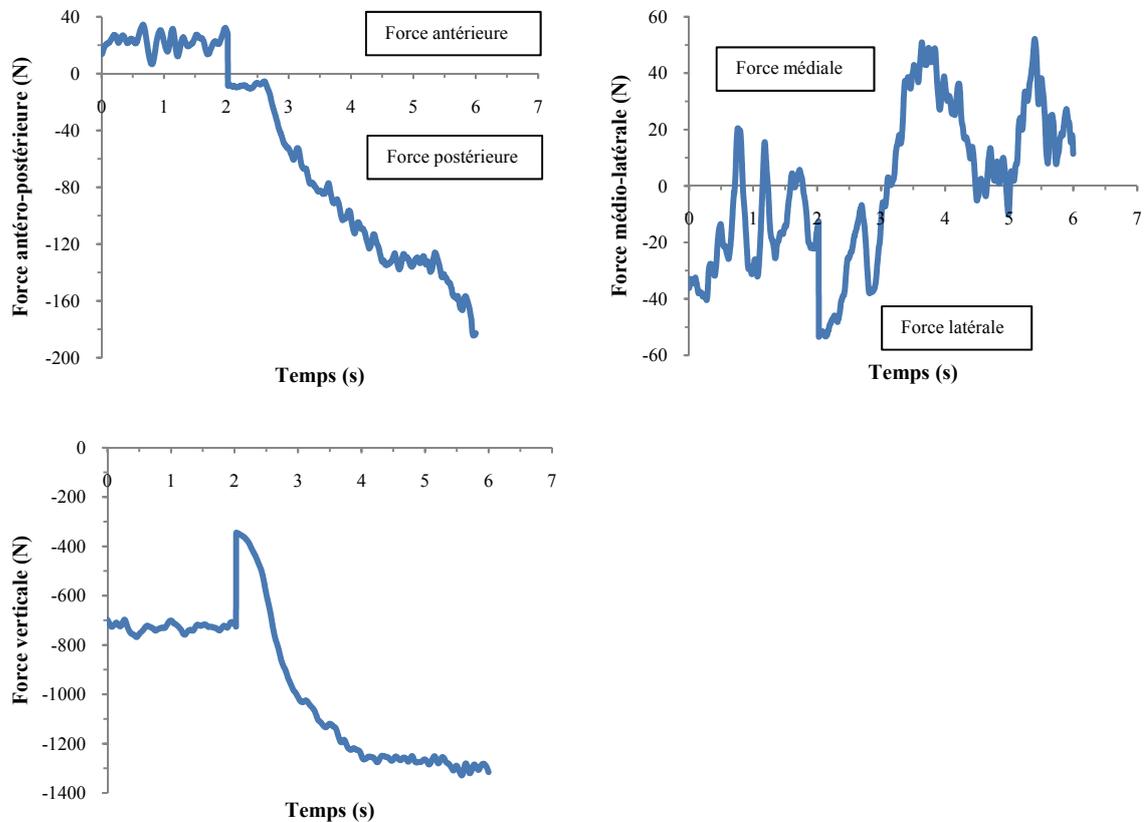


Figure IV-38 Forces tridimensionnelles appliquées sur la pédale droite (manivelle horizontale et pédale droite à l'avant) en fonction du temps durant un test statique d'application d'une force isométrique maximale.

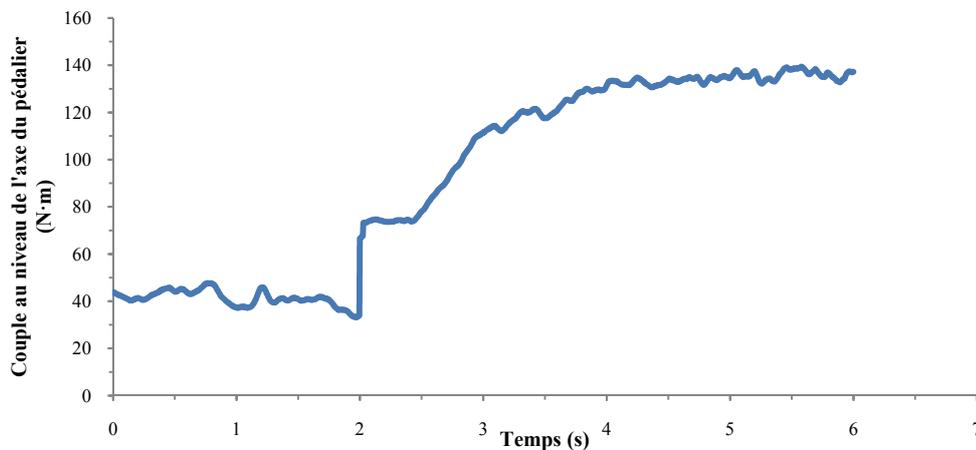


Figure IV-39 Couple maximal en situation isométrique (manivelle horizontale et pédale droite à l'avant) appliqué au niveau du pédalier en fonction du temps par un pilote debout sur les pédales.

Dans le même temps, les déformations subies par le cadre sont enregistrées à l'aide des jauges d'extensométrie (Figure IV-40). Trois jauges subissent une déformation en traction (les jauges 2, 4, 7 et 8), et cinq jauges une déformation en compression (les jauges 1, 3, 5 et 6). Les jauges réagissant le plus sont : la jauge 5, située sur la base droite arrière extérieure et orientée parallèlement à l'axe du tube, avec une valeur maximale de $573 \mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$; la jauge 3, située sur le tube de selle et orientée parallèlement à l'axe du tube, avec une valeur maximale de $408 \mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$; la jauge 2, située sur le tube diagonal et orientée à 45° selon l'axe du tube, avec une valeur maximale de $328 \mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$; et la jauge 6, située sur la base droite arrière extérieure et orientée à 45° selon l'axe du tube, avec une valeur maximale de $316 \mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$.

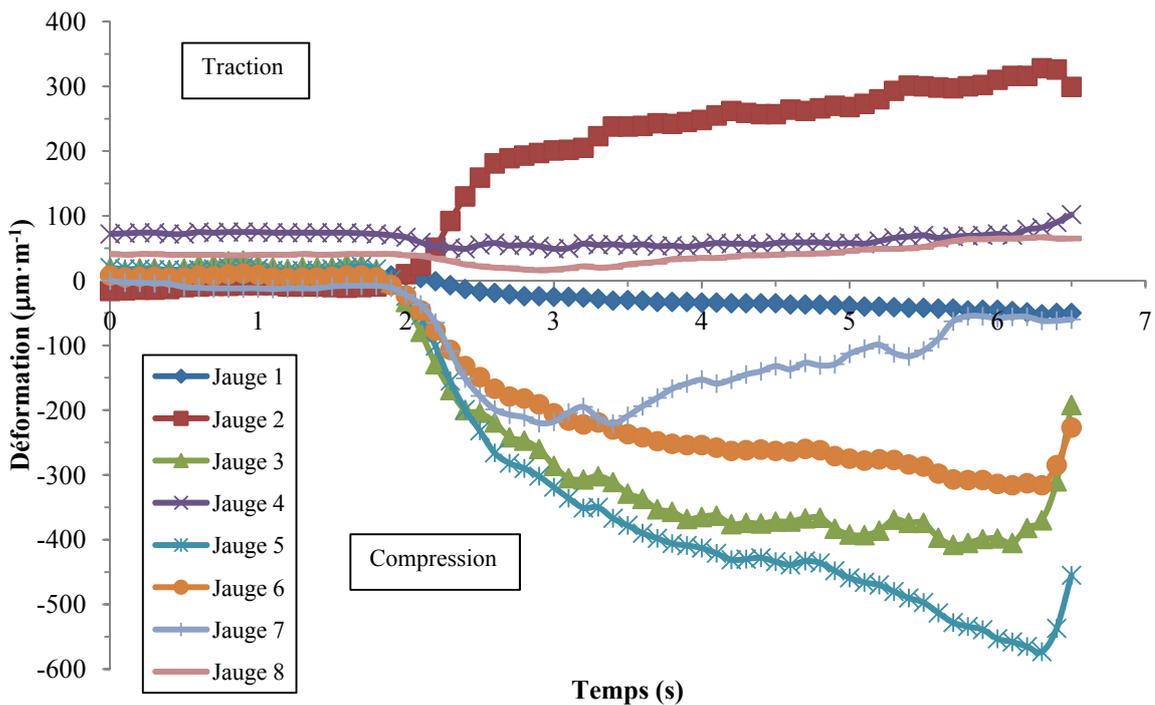


Figure IV-40 Déformation d'un cadre de BMX mesurée par des jauges d'extensométrie lors de l'application d'une force maximale isométrique sur la pédale droite par un pilote debout et tenant le guidon. La pédale est placée à l'avant et horizontalement (Fréquence d'échantillonnage 10 Hz).

Second test : Pédalage sur ergo-trainer (100 tr·min⁻¹ à 300 W)

Les forces tridimensionnelles appliquées sur les deux pédales en condition dynamique (Figure IV-41) peuvent être décrites comme suit : la force verticale appliquée est dirigée vers le bas durant la phase motrice principale et elle atteint une valeur maximale d'environ 580 N. Lors de la phase de récupération, une force de 117 N peut être observée. Dans la direction antéro-postérieure, la force appliquée est dirigée principalement vers l'avant pendant la phase motrice principale avec une valeur maximale de 55 N à droite et de 190 N à gauche. Pour la pédale droite, la force est appliquée latéralement lors de la phase motrice principale avec une valeur maximale de 54 N, et médialement avec une valeur maximale de 48 N lors de la phase de récupération. Pour la pédale gauche, la force est appliquée latéralement lors de la phase motrice principale avec une valeur de 33 N.

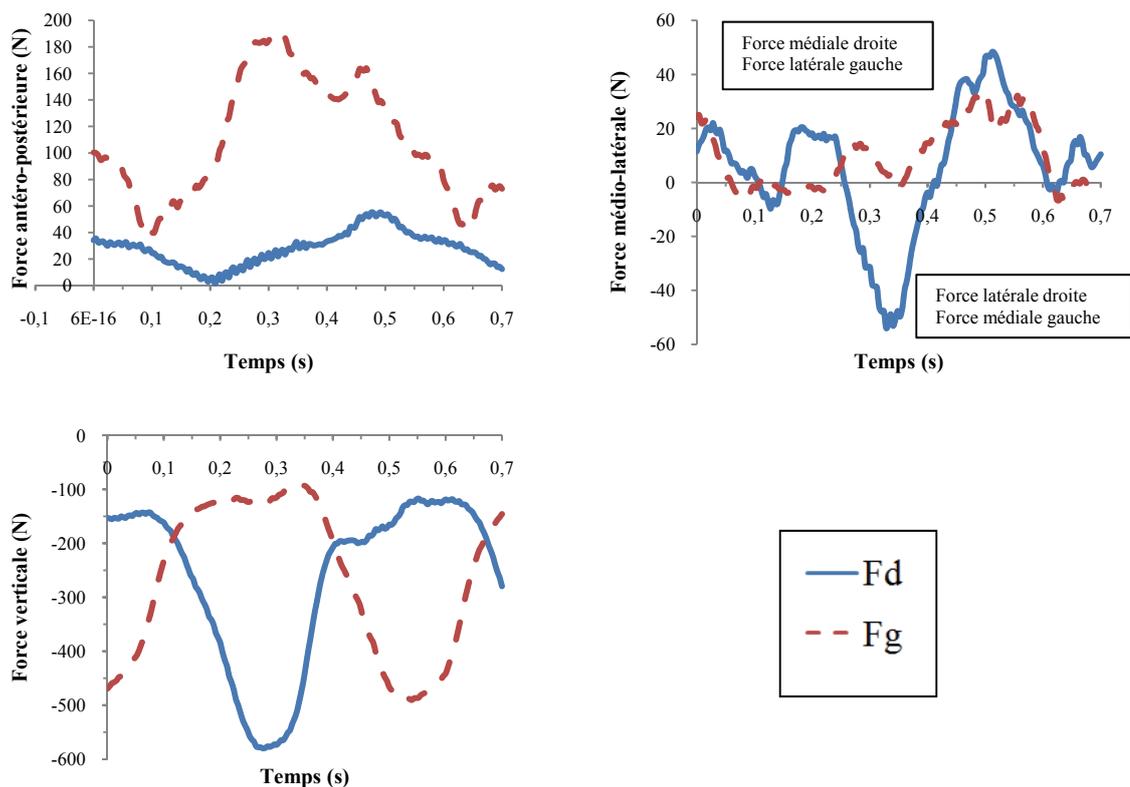


Figure IV-41 Forces tridimensionnelles appliquées sur les pédales durant un cycle de pédalage sur ergo-trainer à 300 W et 100 tr·min⁻¹ en position de danseuse. Fd représente la force sur la pédale droite et Fg, la force sur la pédale gauche.

Le couple global au niveau de l'axe pédalier est également mesuré, il est présenté durant un cycle de pédales (Figure IV-42). Le pilote applique un couple maximal d'environ 60 N·m durant la phase motrice principale droite et de 78 N·m durant la phase motrice principale gauche.

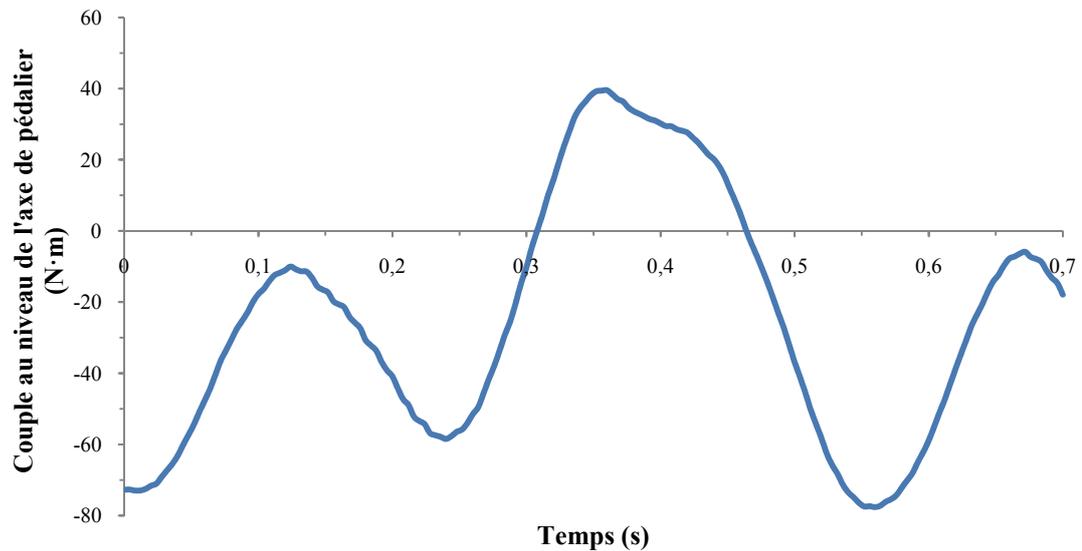


Figure IV-42 Couple pédalier appliqué durant un cycle de pédales à 300 W et à 100 tr·min⁻¹ en fonction du temps.

Dans le même temps, les déformations subies par le cadre sont enregistrées à l'aide des jauges d'extensométrie (Figure IV-43). Trois jauges subissent une déformation plus élevées que les autres. Les jauges réagissant le plus sont : la jauge 3, située sur le tube de selle et orientée parallèlement à l'axe du tube ; la jauge 5, située sur la base droite arrière extérieure et orientée parallèlement à l'axe du tube ; et la jauge 7 située à l'extrémité de la base droite arrière intérieure et orientée parallèlement à l'axe du tube.

Ces 3 jauges enregistrent des déformations maximales lors de la phase motrice principale. La jauge 3 est la jauge qui réagit le plus en fonction de la force verticale sur la pédale lors de la phase motrice.

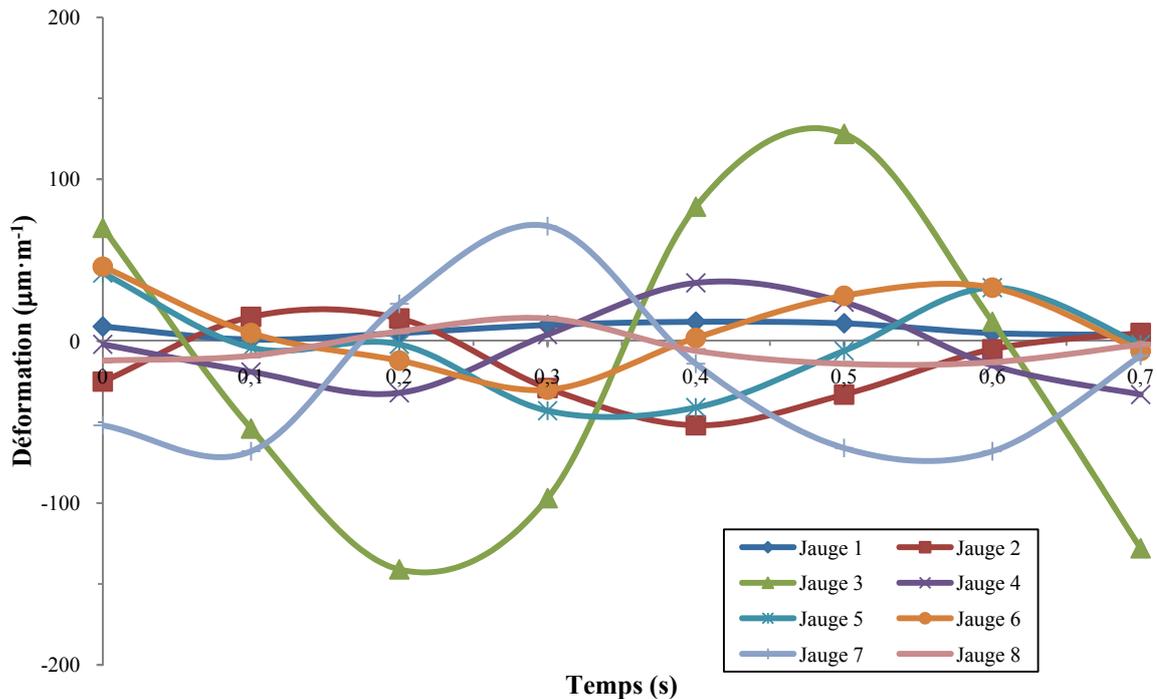


Figure IV-43 Déformation d'un cadre de BMX mesurée par des jauges d'extensométrie lors d'un cycle de pédalage à 300 W et 100 tr·min⁻¹ debout sur les pédales (Fréquence d'échantillonnage 10 Hz).

Second test : Pédalage sur ergo-trainer (200 tr·min⁻¹ à 550 W)

Les forces tridimensionnelles appliquées sur les deux pédales en condition dynamique (Figure IV-44) peuvent être décrites comme suit : la force verticale appliquée est dirigée vers le bas durant la phase motrice principale et elle atteint une valeur maximale d'environ 1120 N. Lors de la phase de récupération, une force de 200 N peut être observée. Dans la direction antéro-postérieure, la force appliquée est dirigée principalement vers l'avant pendant la phase motrice principale avec une valeur maximale de 66 N à droite et de 251 N à gauche. Dans la direction latéro-médiale, la force sur la pédale droite est appliquée latéralement lors de la phase motrice principale avec une valeur maximale de 84 N, et médialement avec une valeur maximale de 97 N lors de la phase de récupération. Pour la pédale gauche, lors de la phase motrice principale, la force est appliquée

latéralement avec une valeur de 54 N, tandis qu'en phase de récupération, la force appliquée est médiale avec une valeur d'environ 20 N.

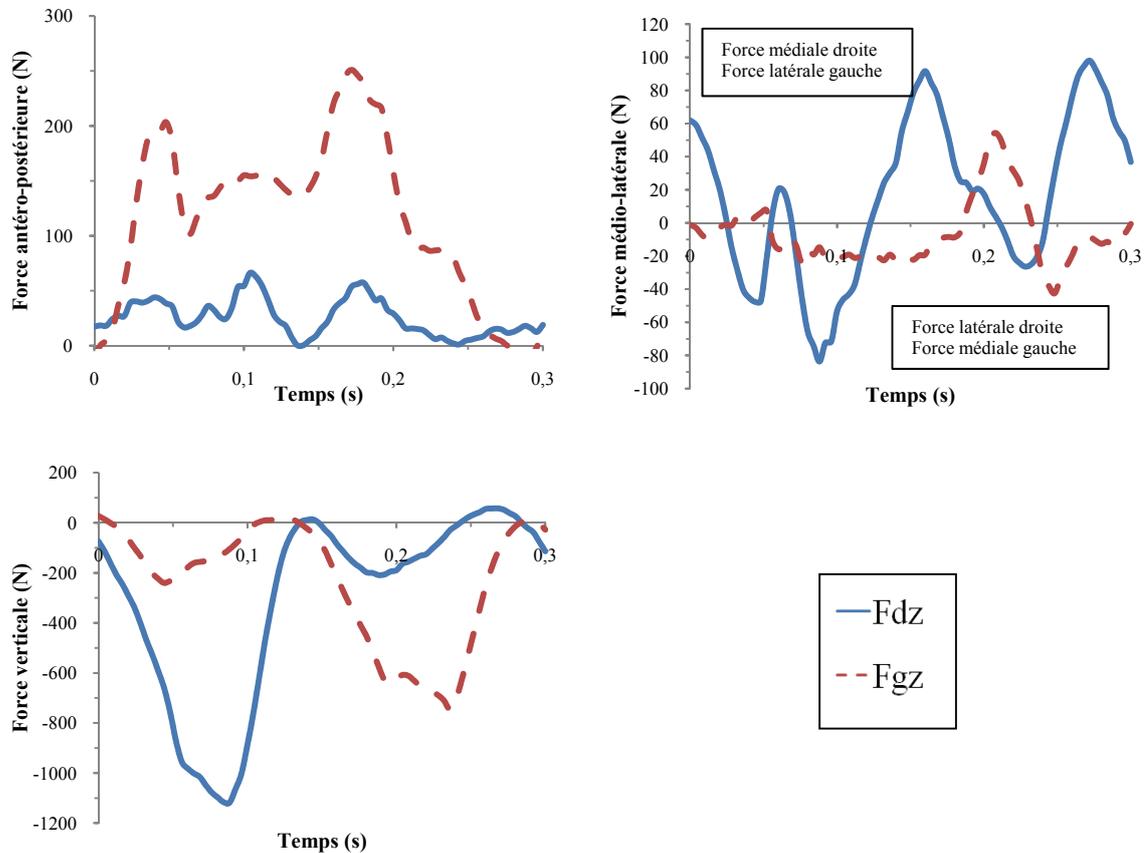


Figure IV-44 Forces tridimensionnelles appliquées sur les pédales durant un cycle de pédalage sur ergo-trainer à 550 W et 200 tr·min⁻¹ en position de danseuse. F_d représente la force sur la pédale droite et F_g , la force sur la pédale gauche.

Le couple global au niveau du pédalier est également mesuré, il est présenté durant un cycle de pédales (Figure IV-45). Le pilote applique un couple maximal d'environ 157 N·m durant la phase motrice principale et de 117 N durant la phase motrice principale gauche.

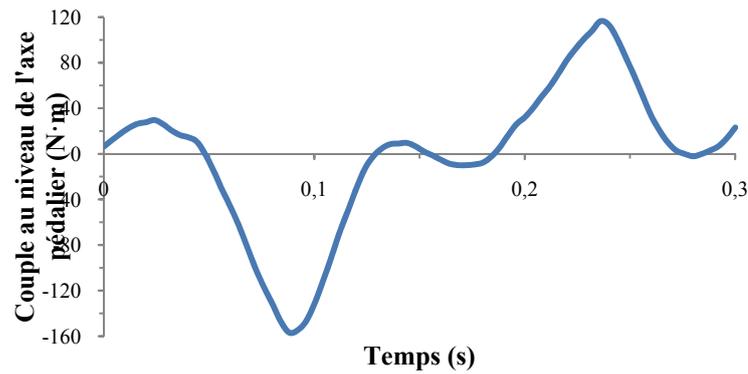


Figure IV-45 Couple pédalier appliqué durant un cycle de pédales à 550 W et à 200 tr·min⁻¹ en fonction du temps.

Dans le même temps, les déformations subies par le cadre sont enregistrées à l'aide des jauges d'extensométrie (Figure IV-46). Plusieurs jauges subissent une déformation plus élevées que les autres. Les jauges réagissant le plus sont : la jauge 3, située sur le tube de selle et orientée parallèlement à l'axe du tube ; la jauge 7 située à l'extrémité de la base droite arrière intérieure et orientée parallèlement à l'axe du tube ; la jauge 5, située sur la base droite arrière extérieure et orientée parallèlement à l'axe du tube ; la jauge 6 située sur la base droite arrière extérieure et orientée à 45° par rapport à l'axe du tube ; et la jauge 2 située sur le tube diagonal et orientée à 45° par rapport à l'axe du tube.

Ces 5 jauges enregistrent des déformations maximales lors de la phase motrice principale. La jauge 3 est la jauge qui réagit le plus en fonction de la force verticale sur la pédale lors de la phase motrice.

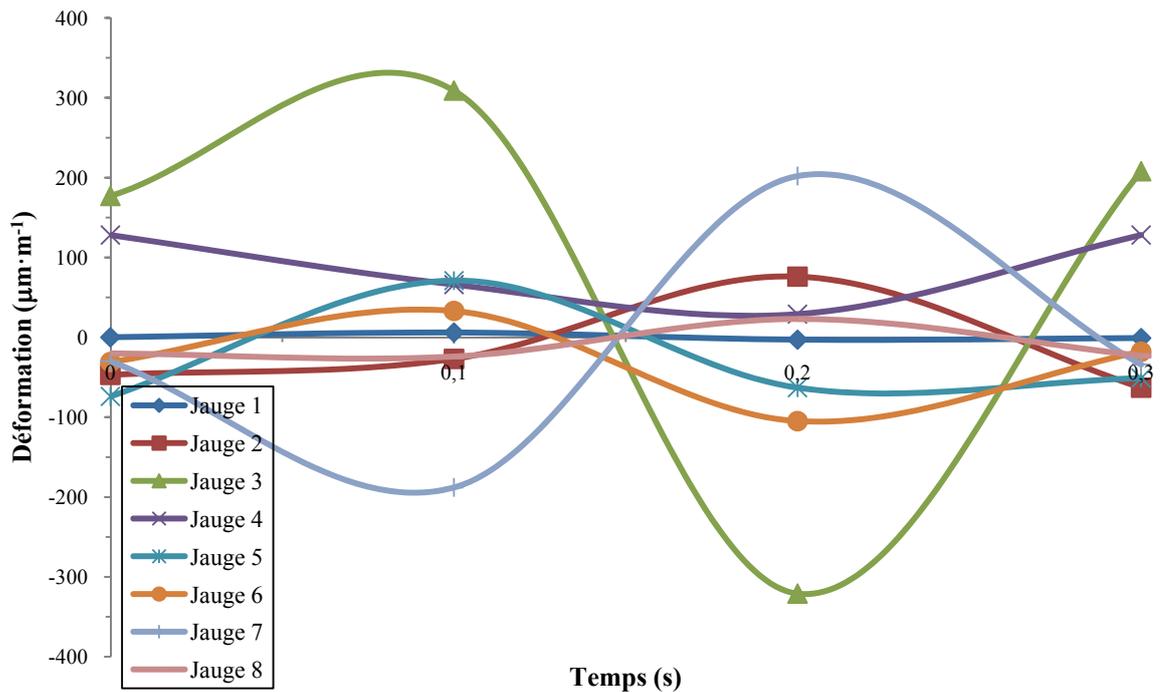


Figure IV-46 Déformation d'un cadre de BMX mesurée par des jauges d'extensométrie lors d'un cycle de pédalage à 550 W et 200 tr·min⁻¹ debout sur les pédales (Fréquence d'échantillonnage 10 Hz).

Troisième test : Saut vertical

Lors d'un saut vertical avec une bicyclette, les forces verticales sont enregistrées (Figure IV-47) en fonction du temps pour les deux pédales. La force verticale appliquée est dirigée vers le bas durant tout le test. La force appliquée sur les deux pédales avant le saut est environ 330 N. Juste avant le saut, elle atteint une valeur maximale d'environ 1160 N au moment du décollage de la bicyclette pour la pédale droite et 1047 N pour la pédale gauche.

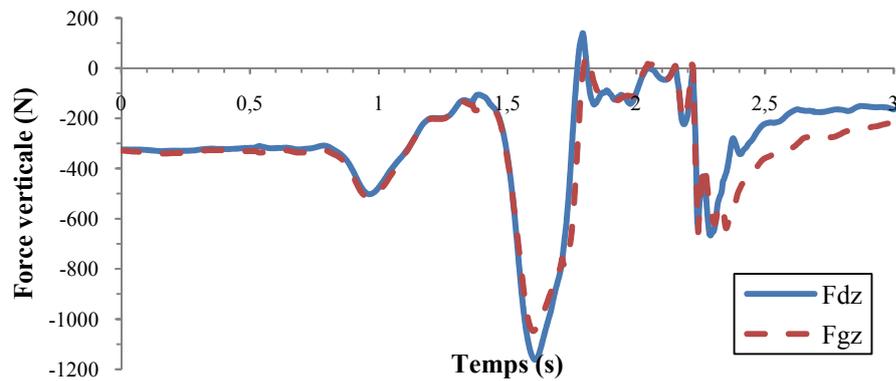


Figure IV-47 Force verticale appliquée sur la pédale droite (Fdz) et la pédale gauche (Fgz) par le pilote lors d'un saut vertical avec la bicyclette en fonction du temps. Fdz représente la force verticale sur la pédale droite et Fgz, la force verticale sur la pédale gauche.

Le couple au niveau du pédalier est également mesuré en fonction du temps (Figure IV-48). La valeur maximale du couple apparaît au moment de l'application maximale de la force verticale, et il est égal à environ 263 N·m.

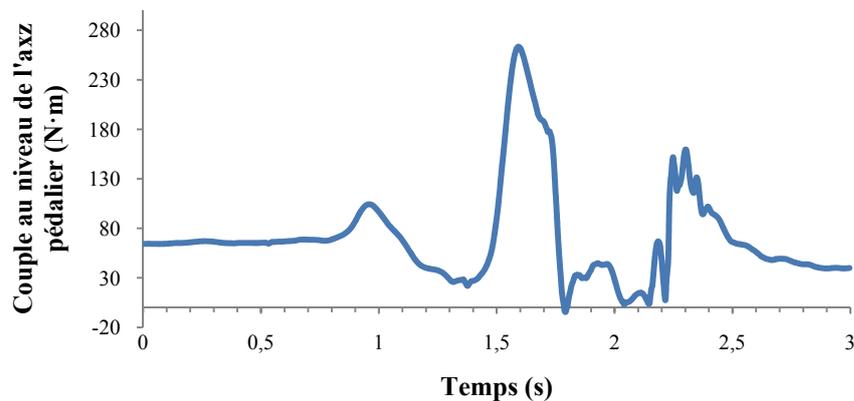


Figure IV-48 Couple au niveau du pédalier produit en fonction du temps lors d'un saut vertical.

Dans le même temps, les déformations subies par le cadre sont enregistrées à l'aide des jauges d'extensométrie (Figure IV-49). Les jauges 5 et 7, situées sur la base arrière droite extérieure et intérieure, respectivement subissent le plus de déformations. La déformation enregistrée au cours du temps par les jauges 3, 5, 6 et 7 correspond à l'évolution du couple du pédalier.

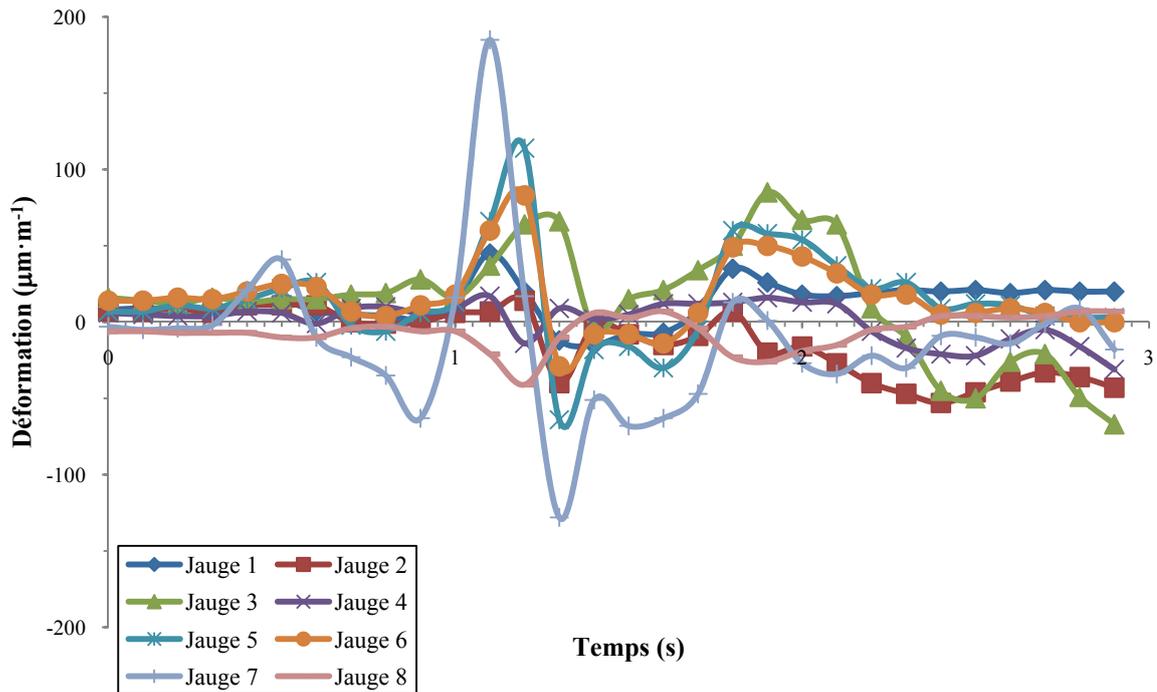


Figure IV-49 Déformation d'un cadre de BMX mesurée par des jauges d'extensométrie en fonction du temps lors d'un saut vertical. Les manivelles sont horizontales et la pédale droite est à l'avant.

2.3.3. Discussion

Premier test : Effort maximal isométrique sur la pédale droite

Lors de cet effort, le pilote a appliqué une force orientée principalement verticalement et vers l'arrière. La force verticale est la composante principale des forces appliquées sur la pédale droite. Les forces médio-latérales sont négligeables. L'orientation postérieure de la force s'explique par le fait que le cycliste ait poussé sur les pédales avec les talons orientés vers le sol.

La force verticale maximale appliquée est de 1330 N, elle provoque un couple élevé au niveau de l'axe du pédalier (environ 140 N·m).

Les déformations subies par le cadre apparaissent fortement liées à la force verticale appliquée sur la pédale et au couple. Les jauges 5, 3, 6 et 2 réagissent le plus fortement au couple appliqué par le pilote dans l'ordre décroissant d'importance.

Comparé au dispositif avec barres (**Figure IV-32**), le fait que le pilote s'aide du guidon lors de l'application de la force sur la pédale change beaucoup la réaction à la déformation de ces jauges. En effet, les jauges ayant une forte réaction de déformation sont plus nombreuses et les réactions sont plus fortes. Les forces qui agissent sur le guidon ont donc une influence sur la déformation du cadre dans cette situation où l'effort est isométrique.

Ce test confirme la déformation importante dans le tube de selle et dans la périphérie proche de l'axe de pédalier au niveau de la base arrière.

Second test : Pédalage sur ergo-trainer

Lors des deux tests dynamiques, la composante principale de la force appliquée sur la pédale est la force verticale. Cette force appliquée est plus grande en fonction de la puissance appliquée. Le pilote qui a effectué ces tests applique une grande force vers l'avant lors du pédalage sur la pédale gauche. Les forces médio-latérales sont négligeables. Le couple est également proportionnel à la force appliquée.

Les jauges 3 et 7 sont les deux jauges qui réagissent principalement en fonction de la force verticale appliquée sur la pédale et du couple au niveau de l'axe du pédalier. Plus la force verticale et le couple sont grands lors du pédalage et plus la déformation enregistrée par ces jauges est grande. L'amplitude de déformation enregistrée par ces jauges au cours du pédalage est plus grande que lors de l'application d'une force isométrique maximale par le pilote. Ces jauges sont situées sur le tube de selle pour la jauge 3 et à l'extrémité de la base arrière droite pour la jauge 7.

Ces résultats obtenus lors de tests dynamiques confirment et amplifient les réponses des jauges obtenues lors des tests d'application d'un couple avec le système de barres. Et ils confirment les résultats obtenus dans la littérature. En effet, [Watt et al. \(2004\)](#) ont

montré lors de tests similaires sur ergo-trainer avec une bicyclette de cyclisme sur route, que la jauge axiale placée sur le tube de selle réagissait fortement et qu'elle pouvait être corrélée avec la production de puissance.

Troisième test : Saut vertical

Lors du saut vertical, le profil des courbes de déformation du cadre enregistré par les jauges d'extensométrie 7, 5, 6 et 3 en fonction du temps est fortement similaire à celui du couple et de la force verticale appliqués sur les pédales. Cela confirme que la déformation du cadre est principalement influencée par les forces verticales appliquées sur les pédales.

2.3.4. Conclusion

Les tests dynamiques réalisés confirment et amplifient les résultats obtenus lors des tests en condition expérimentale où un couple est appliqué sur le cadre à l'aide d'un système de barres : le tube de selle subit de fortes déformations en comparaison des autres tubes du cadre de BMX sans subir de déformations irréversibles.

Bien que les intensités de pédalage utilisées lors de ces tests soient faibles comparées aux performances des meilleurs pilotes français de BMX (environ 2200 W), et que l'utilisation de l'ergo-trainer ne permette pas d'inclinaison latérale du cadre, les résultats montrent clairement le tube dont la conception et la structure est en déséquilibre avec le reste du cadre. Dans ce cadre, le tube de selle est sous-dimensionné comparé aux autres tubes, et puisqu'il est l'élément de liaison de tous les autres tubes, il subit les plus grandes déformations lors du pédalage.

Dans le cas de ce pilote, les déformations subies par le cadre sont principalement liées aux forces verticales appliquées sur les pédales et au couple au niveau de l'axe du pédalier. Néanmoins, le système de mesure des forces tridimensionnelles à l'aide de

pédales instrumentées pourraient permettre d'étudier les déformations subies par le cadre en fonction de l'orientation des forces. En effet, certains pilotes peuvent appliquer une grande force sur la pédale mais avec un mauvais index d'efficacité. Et les forces inefficaces au pédalage peuvent peut-être engendrer ou participer à de plus grandes déformations des tubes constituant le cadre.

V. CONCLUSION

Ce travail s'est appuyé sur la constatation que les cadres de bicyclettes étaient conçus majoritairement sans prise en compte des réelles sollicitations lors de la pratique de l'activité cyclisme. Les fortes sollicitations mécaniques provoquées par les pilotes lors des compétitions peuvent provoquer des endommagements allant jusqu'à la rupture de certains tubes constituant le cadre.

En tenant compte de cela, l'objectif de cette thèse était de proposer un protocole expérimental d'étude d'un cadre en tenant compte de l'interaction entre le pilote et sa bicyclette lors du pédalage. L'activité olympique de BMX a été utilisée pour illustrer cette mise en place d'un protocole.

Tout d'abord, une étude de l'activité a été nécessaire pour comprendre les paramètres discriminants liés à la performance et qui influencent la déformation du cadre.

Les qualités physiques et les efforts fournis par les pilotes de BMX ont été mesurés à l'aide de tests standardisés. Ces tests ont montré que la puissance musculaire produite par les pilotes était un facteur déterminant de la performance lors de la phase d'accélération, c'est-à-dire lors du départ.

Le mouvement spécifique du pédalage debout sur les pédales lors du départ a été étudié pour mesurer l'angle d'inclinaison latérale maximale du cadre de BMX. Car il apparaît que cette inclinaison représente le travail fait par les membres supérieurs dans le but d'assister les membres inférieurs à la production du pic de puissance [Hull et al. 1990]. La mesure de cet angle a été utile pour prévisualiser les contraintes subies par le cadre

incliné, et ainsi déterminer où placer des jauges d'extensométrie pour étudier les déformations du cadre.

Ensuite, pour comprendre les sollicitations dont le cadre fait l'objet, l'étude des déformations de cette structure en fonction de l'effort du cycliste a été décomposée en plusieurs parties.

Dans un premier temps, une étude expérimentale en condition statique a permis d'étudier la déformation du cadre à l'aide de jauges d'extensométrie, et de valider l'utilisation d'un modèle numérique pour étudier cette déformation par la méthode d'analyse aux éléments finis. L'utilité de cette méthode numérique est de permettre un gain de temps, et une plus grande facilité dans l'optimisation ou la conception d'un cadre de bicyclette. La modification des paramètres de structure (matériau, épaisseur des tubes, longueur des tubes, angulation de la structure, etc.) est simplifiée.

Dans un second temps, afin de simuler les forces et les couples créés par le pilote lors de l'application d'une force sur la pédale, un système de barres a été conçu. Ce système est standard et permet d'étudier la déformation du cadre de bicyclette en fonction de la quantification des couples appliqués par le pilote sur les pédales. Cette étude a permis de mettre en évidence sur le cadre testé que les zones les plus sensibles à la déformation se situent sur le tube de selle et sur les bases arrières. Elle permet de connaître l'homogénéisation de la structure et de savoir quel élément est inadapté dans sa conception.

Et enfin, les déformations subies par le cadre ont été étudiées en condition dynamique avec un pilote. Pour cela, la bicyclette de BMX dont le cadre est équipé de jauges d'extensométrie a été placée sur ergo-trainer, et équipée d'un pédalier et de pédales instrumentés. Le pilote a réalisé différents tests : Application d'une force isométrique maximale, pédalage à différentes cadences et intensités et un saut vertical. Ces tests ont eu

pour but de vérifier et d'amplifier les résultats de déformation obtenus lors des tests statiques. Pour le cadre testé, même si les déformations mesurées sont bien en deçà de la limite de déformation plastique, le tube de selle est l'élément discriminant dans cette structure, et il démontre le déséquilibre dans la conception du cadre.

Cette mise en place d'un protocole d'optimisation de la conception d'un cadre montre qu'il est important d'étudier le comportement de la structure du cadre dans les conditions les plus proches de la réalité de l'activité en n'omettant pas le facteur humain, et l'interaction homme-machine.

VI. PERSPECTIVES

Pour continuer ce travail, il sera nécessaire de mesurer la déformation subie par le cadre lors d'efforts maximaux en situation réelle. Pour cela, il faudra équiper le pilote d'un appareil d'acquisition portatif afin que le pilote puisse se déplacer librement.

A l'aide de ce protocole et de l'outil numérique, il serait intéressant de tester différents cadres (tant sur la structure que sur les matériaux utilisés) afin d'obtenir des paramètres discriminants de la performance d'un cadre, de créer un modèle à partir de ces paramètres et de concevoir numériquement ce cadre.

A l'aide des pédales équipées de capteur d'effort à 6 composantes, il serait possible de déterminer plus précisément les déformations sur le cadre en fonction des composantes de la force appliquée sur la pédale, et ainsi de quantifier l'index d'efficacité du pédalage, et son impact sur la déformation du cadre. Cela pourrait permettre d'optimiser la conception des cadres, et également de personnaliser les cadres en fonction de l'athlète, de sa masse, de sa puissance et de son style de pédalage, par exemple.

De plus, il serait intéressant de quantifier la transmission par le cadre de la puissance musculaire produite sur la pédale vers l'axe de la roue arrière. Pour cela, il faudrait, en plus du pédalier équipé d'un SRM, équiper le moyeu de la roue arrière d'un PowerTAP ou d'un système permettant la mesure au niveau de la roue arrière de la puissance développée.

Et pour des activités de cyclisme telles que le BMX ou le vélo-tout-terrain, il semble important d'étudier également le comportement de la structure à l'aide d'une analyse modale. En effet, les vibrations pourraient entraîner des pertes d'adhérences, endommager la structure, et provoquer des problèmes de santé chez le cycliste (douleurs, tendinites, etc.).

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Alvarez-Segui M, Castello-Ponce A, Verdu-Pascual F (2001) A dangerous design for a mountain bike. *Int J Legal Med* 115: 165 – 166.
- [2] Arola D, Reinhall PG, Jenkins MG, Iverson SC (1999) An experimental analysis of a hybrid bicycle frame. *Experimental techniques* May/june: 21 – 24.
- [3] Ashby M, Bréchet Y, Salvo L (2001) Sélection des matériaux et des procédés de mise en oeuvre (Traité des Matériaux volume 20). Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- [4] Baker J, Brown E, Hill G, Phillips G, Williams R, Davies B (2002) Handgrip contribution to lactate production and leg power during high-intensity exercise. *Med Sci Sports Exerc* 34 (6): 1037 – 1040.
- [5] Baker JS, Gal J, Davies B, Bailey D, Morgan R (2001) Power output of legs during high intensity cycle ergometry: Influence of hand grip. *J Sci Med Sports* 4 (1): 10 – 18.
- [6] Barna T, Bretz K, Fodor T, Rudoj I, Tsura A (2002) Experimental testing of magnesium and chrome-molybdenum-alloy bicycle frames. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on* 51(2): 348 – 353.
- [7] Belluye N, Cid M (2001) Approche biomécanique du cyclisme moderne, données de la littérature. *Sci Sports* 16 : 71 – 87.
- [8] Bertucci W, Hourde C (2006) Tests d'évaluation en BMX. Journée Nationale des Cadres Techniques de Cyclisme, Chatenay Malabry, FRANCE.
- [9] Bertucci W, Hourde C, Manolova A, Vettoretti F (2007) Facteurs mécaniques de la performance lors de la phase d'accélération en BMX chez des pilotes entraînés. *Sci Sports* 22 : 179 – 181.

- [10] Bertucci W, Talar R, Grappe F (2005) Differences between sprint tests under laboratory and actual cycling conditions. *J Sports Med Phys Fitness* 45: 277 – 283.
- [11] Bobbert MF, Jaspers RT, Sijpkens IWT (2007) Muscle activation patterns in squat jumps from different initial positions. *J Biomech* 40 (S2): S300.
- [12] Bolourchi F, Hull ML (1985) Measurement of rider induced loads during simulated bicycling. *Int J Sports Biomech* 1: 308 – 329.
- [13] Caldwell GE, Hagberg JM, McCole SD, Li L (1999) Lower extremity joint moments during uphill cycling. *J Appl Biomech* 15: 166 – 181.
- [14] Caldwell GE, Li L, McCole SD, Hagberg JM (1998) Pedal and crank kinetics in uphill cycling. *J Appl Biomech* 14: 245 – 259.
- [15] Callaghan JP, Phil M (2005) Lower body problems and injury in cycling. *Journal of Bodywork and Movement Therapies* 9: 226 – 236.
- [16] Castejon L, Miravete A, Ullod J, Larrodé E (1994) Composite monocoque frame for a mountain bicycle: testing and calculation. *Applied Composite Materials* 1: 111 – 119.
- [17] Cormie P, McBride JM, McCaulley GO (2008) Power-time, force-time, and velocity-time curve analysis during the jump squat: Impact of load. *J Appl Biomech* 24: 112 – 120.
- [18] Cormie P, McCaulley GO, McBride JM (2007) Power versus strength-power jump squat training: Influence on the load-power relationship. *Med Sci Sports Exerc* 39(6): 996 – 1003.
- [19] Coyle E, Sidossis L, Horowitz J, Beltz J (1992) Cycling efficiency is related to the percentage of type 1 muscle fibers. *Med Sci Sports Exerc* 24 (7): 782 – 788.

- [20] Coyle EF, Feltner ME, Kautz SA, Hamilton MT, Montain SJ, Baylor AM, Abraham LD, Petrek GW (1991) Physiological and biomechanical factors associated with elite endurance cycling performance. *Med Sci Sports Exerc* 23 (1): 93 – 107.
- [21] Dauty M, Bryand F, Potiron-Josse M (2002) Relation entre la force isocinétique, le saut et le sprint chez le footballeur de haut niveau. *Sci Sports* 17 : 122 – 127.
- [22] Davis RR, Hull ML (1981_a) Design of Aluminium bicycle frames. *Journal of Mechanical Design* 103: 901 – 907.
- [23] Davis RR, Hull ML (1981_b) Measurement of pedal loading in bicycling: II. Analysis and results. *J Biomechanics* 14 (12): 857 – 872.
- [24] De Lorenzo DS, Hull ML (1999_a) A hub dynamometer for measurement of wheel forces in off-road bicycling. *J Biomech Eng* 121: 132 – 137.
- [25] De Lorenzo DS, Hull ML (1999_b) Quantification of structural loading during off-road cycling. *J Biomech Eng* 121: 399 – 405.
- [26] Delaney DP, Carr MC (2005) Urethral strictures incident to bicycle motocross racing. *Urology* 65: 798.e18 – 798.e19.
- [27] Doorenbosch CAM, Ingen Schenau GJ van (1995) The role of mono- and bi-articular muscles during contact control leg tasks in man. *Hum Mov Sci* 14: 279 – 300.
- [28] Doré E, Baker JS, Jammes A, Graham M, New K, Van Praagh E (2006) Upper body contribution during leg cycling peak power in teenage boys and girls. *Res Sports Med* 14: 245 – 257.
- [29] Dorel S, Hautier CA, Rambaud O, Rouffet D, Van Praagh E, Lacour J-R, Bourdin M (2005) Torque and power-velocity relationships in cycling : Relevance to track sprint performance in world-class cyclists. *Int J Sports Med* 26: 739 – 746.

- [30] Gabbe BJ, Finch CF, Cameron PA, Williamson OD (2005) Incidence of serious injury and death during sport and recreation activities in Victoria, Australia. *Br J Sports Med* 39: 573 – 577.
- [31] Gardner AS, Stephens S, Martin DT, Lawton E, Lee H, Jenkins D (2004) Accuracy of SRM and Power Tap power monitoring systems for bicycling. *Med Sci Sports Exerc* 36: 1252–1258.
- [32] Giannetti R, Chichi F, Erzegovesi P, (1998) Low-cost lightweight strain measurement system for bicycle application. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 47: 893 – 899.
- [33] Grappe F (2005) *Cyclisme et optimisation de la performance*. Paris : De Boeck Université.
- [34] Harris NK, Cronin JB, Hopkins WG, Hansen KT (2008) Squat jump training at maximal power loads vs. heavy loads: Effect on sprint ability. *J Strength Cond Res* 22 (6): 1742 – 1749.
- [35] Henke T (1998) Real-time feedback of pedal forces for the optimization of pedaling technique in competitive cycling. In *Proceeding of the 16th Symposium of the International Society of Biomechanics in Sports*. University of Konstanz, Germany: 174 – 177.
- [36] Hill AV (1938) The heat of shortening and the dynamic constants of muscle. *Proc Roy Soc B* 126: 136 – 195.
- [37] Hof AL (2001) The force resulting from the action of mono- and bi-articular muscles in a limb. *J Biomech* 34: 1085 – 1089.
- [38] Hori N, Newton RU, Andrews WA, Kawamori N, McGuigan MR, Nosaka K (2007) Comparison of four different methods to measure power output during the hang power clean and the weighted jump squat. *J Strength Cond Res* 21 (2): 314 – 320.

- [39] Hull ML, Beard A, Varma H (1990) Goniometric measurement of hip motion in cycling while standing. *J Biomech* 23: 687 – 703.
- [40] Hull ML, Bolourchi F (1988) Contributions of rider-induced loads to bicycle frame stress. *Journal of Strain Analysis* 23 (3): 105 – 114.
- [41] Hull ML, Davis RR (1981) Measurement of pedal loading in bicycling: I. Instrumentation. *J Biomech* 14: 843 – 856.
- [42] Ingen Schenau GJ van, Boot PJM, De Groot G, Snakers RJ, Van Woensel WWLM (1992) The constrained control of force and position in mutli-joint movements. *Neuroscience* 46: 197 – 207.
- [43] Jacobs R, Ingen Schenau GJ van (1992) Control of an external force in leg extensions in humans. *J Physiol* 457: 611 – 626.
- [44] Jones SM, Passfield L (1998) Dynamic calibration of bicycle power measuring cranks. In: Haake SJ (ed). *The Engineering of sport*. Oxford: Blackwell Science: 265-274
- [45] Karchin A, Hull ML (2002) Experimental optimization of pivot point height for swing-arm type rear suspensions in off-road bicycles. *J Biomech Eng* 124: 101 – 106.
- [46] Kautz S, Feltner E, Coyle E, Baylor A (1991) The pedalling technique of elite endurance cyclists: Changes with increasing workload at constant cadence. *Int J Sport Biomech* 7: 29 – 53.
- [47] Kooijman JDG, Schwab AL, Meijaard JP (2008) Experimental validation of a model of an uncontrolled bicycle. *Multibody Syst Dyn* 19: 115 – 132.
- [48] Lara-Lopez A, Aguilera-Cortez LA, Barbosa-Castillo F (1999) Measurements of forces applied to handgrips and pedals for a sample population of mexican males. *Applied Ergonomics* 30: 173 – 176.

- [49] Lehance C, Croisier JL, Bury T (2005) Optojump system efficiency in the assessment of lower limbs explosive strength. *Sci Sports* 20: 131–135.
- [50] Lessard L.B., Nemes J.A., Lizotte P.L. (1995) Utilization of FEA in the design of composite bicycle frames. *Composites* 26(1): 72 – 74
- [51] Li L, Caldwell GE (1998) Muscle coordination in cycling: effect of surface incline and posture. *J Appl Physiol* 85 (3): 927 – 934.
- [52] Martin JC, Davidson CJ, Pardyjak ER (2007) Understanding sprint-cycling performance: the integration of muscle power, resistance, and modelling. *Int J Sports Physiol Perf* 2: 5 -21.
- [53] McKenna SP, Hill MR, Hull ML (2002) A single loading direction for fatigue life prediction and testing of handlebars for off-road bicycles. *International Journal of Fatigue* 24: 1149 – 1157.
- [54] Morin J-B, Belli A (2003) Mechanical factors of 100 m sprint performance in trained athletes. *Sci Sports* 18: 161 – 163.
- [55] Morin J-B, Hintzy F, Belli A, Grappe F (2002) Relations force-vitesse et performances en sprint chez des athlètes entraînés. *Sci Sports* 17 : 78 – 85.
- [56] Mornieux G, Zameziati K, Mutter E, Bonnefoy R, Belli A (2006) A cycle ergometer mounted on a standard force platform for three-dimensional pedal forces measurement during cycling. *J Biomech* 39: 1296 – 1303.
- [57] Moussay S, Bessot N, Gauthier A, Larue J, Sesboüe B, Davenne D (2003) Diurnal variations in cycling kinematics. *Chronobiol Int* 20 (5): 879 – 892.
- [58] Murphy DF, Connolly DAJ, Beynon BD (2003) Risk factors for lower extremity injury: a review of the literature. *Br J Sports Med* 37: 13 – 29.
- [59] Neptune RR, Herzog W (1999) The association between negative muscle work and pedaling rate. *J Biomech* 32: 1021 – 1026.

- [60] Neptune RR, Kautz SA, Hull ML (1997) The effect of pedaling rate on coordination in cycling. *J Biomech* 30 (10): 1051 – 1058.
- [61] Neptune RR, Kautz SA, Zajac FE (2000) Muscle contributions to specific biomechanical functions do not change in forward versus backward pedaling. *J Biomech* 33: 155 – 164.
- [62] Pantelidis N.G. (2005) Development and evaluation of an RTM bicycle frame. *Sandwich Structures 7: Advancing with Sandwich Structures and Materials. Proceedings of the 7th International Conference on Sandwich Structures, Aalborg, Denmark, 29-31 August.*
- [63] Patel ND (2004) Mountain bike injuries and clipless pedals: a review of three cases. *Br J Sports Med* 38: 340 – 341.
- [64] Patterson RP, Moreno MI (1990) Bicycle pedaling forces as a function of pedaling rate and power output. *Med Sci Sports Exerc* 22 (4): 512 – 516.
- [65] Peterson LA and Londry KJ (1986) Finite-element structural analysis: A new tool for bicycle frame design. The strain energy design method. *Bike Tech* 5 (2).
- [66] Peterson LA, Londry KJ (1986) Finite-element structural analysis: a new tool for bicycle frame design. The strain energy design method. *Bike Tech* 5 (2): 1 – 15.
- [67] Raasch CC, Zajac FE (1999) Locomotor strategy for pedaling: muscle groups and biomechanical functions. *J Neurophysiol* 82: 515-525.
- [68] Raasch CC, Zajac FE, Ma B, Levine WS (1997) Muscle coordination of maximum-speed pedaling. *J Biomech* 30 (6): 595 – 602.
- [69] Ravier G, Grappe F, Rouillon JD (2003) Comparison between the maximal variables of velocity, force and power from two analysis methods in the functional assessment of karate. *Sci Sports* 18: 134 – 140.

- [70] Ravier G, Grappe F, Rouillon JD (2004) Application of force-velocity cycle ergometer test and vertical jump tests in the functional assessment of karate competitor. *J Sports Med Phys Fitness* 44: 349 – 355.
- [71] Reiser II RF, Maines JM, Eisenmann JC, Wilkinson JG (2002) Standing and seated wingate protocols in human cycling. A comparison of standard parameters. *Eur J Appl Physiol* 88: 152 – 157.
- [72] Rowe T, Hull ML, Wang EL (1998) A pedal dynamometer for off-road bicycling. *J Biomech Eng* 120: 160 – 164.
- [73] Samozino P, Morin JB, Hintzy F, Belli A (2008) A simple method for measuring force, velocity and power output during squat jump. *J Biomech* 41: 2940 – 2945.
- [74] Sanderson DJ (1991) The influence of cadence and power output on the biomechanics of force application during steady-rate cycling in competitive and recreational cyclists. *J Sports Sci* 9: 191 – 203.
- [75] Shelton H, Obie Sullivan J, Gall K (2004) Analysis of the fatigue failure of a mountain bike front shock. *Engineering Failure Analysis* 11: 375 – 386.
- [76] Soden PD, Adeyefa BA (1979) Forces applied to a bicycle during normal cycling. *J Biomech* 12: 527 – 541.
- [77] Soden PD, Millar MA, Adeyefa BA, Wong YS (1986) Loads, stresses, and deflections in bicycle frames. *J Strain Analysis* 21 (4): 185 – 195.
- [78] Stone C, Hull ML (1993) Rider/Bicycle interaction loads during standing treadmill cycling. *J Appl Biomech* 9: 202 – 218.
- [79] Stone C, Hull ML (1995) The effect of rider weight on rider-induced loads during common cycling situations. *J Biomech* 28 (4): 365 – 375.
- [80] Ting LH, Kautz SA, Brown DA, Zajac FE (1999) Phase reversal of biomechanical functions and muscle activity in backward pedaling. *J Neurophysiol* 81: 544- 551.

- [81] UCI (2008) Règlement UCI – Titre VI : Epreuve de BMX (Disponible à l'adresse suivante :
<http://www.uci.ch/Modules/BUILTIN/getObject.asp?MenuId=MTk1OQ&ObjTypeCode=FILE&type=FILE&id=34048&LangId=2>).
- [82] Vandewalle H, Peres G, Heller J, Panel J, Monod H (1987) Force-velocity and maximal power on a cycle ergometer: Correlation with the height of a vertical jump. *Eur J Appl Physiol* 56: 650 – 656.
- [83] Watt J, Reiser II RF, Walrath DE, Peterson ML (2004) Quantifying power output using cycling frame strain. *The Engineering of Sport* 5 (1): 522 – 528.
- [84] Watt JB, Reiser II RF, Peterson ML, Walrath DE (2002) Quantifying power output during cycling through measuring strain energy in a bicycle frame. *Biomed Sci Instrum* 38: 417 – 421.
- [85] Wilson GJ, Newton RU, Murphy AJ, Humphries BJ (1993) The optimal training load for the development of dynamic athletic performance. *Med Sci Sports Exerc* 25 (11): 1279 – 1286.
- [86] Zajac FE, Neptune RR, Kautz SE (2002) Biomechanics and muscle coordination of human walking Part I: Introduction to concepts, power transfer, dynamics and simulations. *Gait Posture* 16: 215 – 232.
- [87] Zameziati K, Mornieux G, Rouffet D, Belli A (2006) Relationship between the increase of effectiveness indexes and the increase of muscular efficiency with cycling power. *Eur J Appl Physiol* 96: 274 – 281.
- [88] Zipfel E, Olson J, Puhlman J, Cooper RA (2009) Design of a custom racing hand-cycle: review and analysis. *Disabil Rehabil Assist Technol* 4 (2): 119 – 128.

Available online at www.sciencedirect.com

Science & Sports 22 (2007) 179–181

<http://france.elsevier.com/direct/SCISPO/>

Communication brève

Facteurs mécaniques de la performance lors de la phase d'accélération en BMX chez des pilotes entraînés

Mechanical performance factors of the bmx acceleration phase in trained riders

W. Bertucci^{a,*}, C. Hourde^b, A. Manolova^a, F. Vettoretti^c

^a Laboratoire d'analyse des contraintes mécaniques - EA 3304 LRC CEA/UFR STAPS, université de Reims-Champagne-Ardenne, bâtiment 6, campus Moulin-de-la-Housse, 51687 Reims, France

^b Laboratoire d'étude sur la croissance cellulaire, la régénération et la réparation tissulaires, UMR 7149 CNRS, faculté des sciences, université Paris-XII, France

^c Fédération française de cyclisme, France

Reçu le 10 janvier 2007 ; accepté le 6 avril 2007

Disponible sur internet le 01 juin 2007

Résumé

Introduction. – Le BMX sera pour la première fois discipline olympique en 2008. Toutefois, très peu d'études scientifiques portent sur cette discipline. Les facteurs mécaniques de la performance ainsi que la manière de les évaluer sont encore mal connus. Un élément apparaît toutefois comme une évidence, la phase d'accélération est un moment clé de la course.

Synthèse des faits. – Les résultats des tests de détente et charge-vitesse exprimés en puissance (W) sont les plus liés ($p < 0,01$) avec la performance lors de la phase d'accélération.

Conclusions. – Les tests de détente et charge-vitesse apparaissent pertinents pour évaluer les facteurs biomécaniques de la performance lors d'une phase d'accélération en BMX.

© 2007 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Introduction. – The BMX sport will be for the first time on the Olympic Games in 2008. Nevertheless, few scientific studies are focused on this field. The mechanics performance factors and the procedure for their evaluation will not yet well know. One thing appears like evidence; the acceleration phase was one key of the performance.

Synthesis. – The jump and the force-velocity test results indicate that the power output in absolute values presented the stronger relationships ($P < 0.01$) with the acceleration performance.

Conclusions. – The jump and the force-velocity test were adapted to evaluate the biomechanics factors of the performance acceleration phase in BMX.

© 2007 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Mots clés : BMX ; Test de détente ; Test charge-vitesse ; Phase d'accélération

Keywords: BMX; Jump test; Force-velocity test; Acceleration phase

1. Introduction

Le BMX sera pour la première fois aux jeux olympiques de Pékin en 2008. Or, les connaissances scientifiques sur cette

discipline cycliste sont relativement rares. Il existe à notre connaissance uniquement des études portant sur les pathologies engendrées par les chutes [3] ou récemment sur les effets de certaines variables psychologiques sur la performance lors de la réalisation du test de Wingate [7]. Les compétitions de BMX (Race) se déroulent sur une ou deux journées sur une piste de 270 à 400 m parsemée d'obstacles (bosses simples, doubles, virages relevés...). Au départ, huit pilotes sont positionnés der-

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : william.bertucci@univ-reims.fr (W. Bertucci).

rière une grille de départ qui s'abaisse hydrauliquement après un signal à la fois visuel (feu vert) et auditif (message vocal enregistré), les pilotes s'élancent alors pour un tour effectué entre 30 et 40 secondes. Les quatre premiers accèdent au tour suivant. Les cyclistes doivent enchaîner jusqu'à huit manches par jour avec seulement 15 minutes de récupération entre les manches. La position à la fin de la première ligne droite (après environ dix secondes de course) apparaît très importante, car par la suite il est assez difficile de doubler un adversaire. Pour réussir un bon départ le pilote doit être capable de produire un niveau élevé de puissance mécanique au départ (phase d'accélération) de manière à vaincre son inertie et à s'élaner le plus rapidement possible. Par la suite il doit avoir une excellente habileté technique pour enrouler les petites bosses à vitesse élevée ou encore réaliser des sauts sur les bosses les plus hautes. À l'heure actuelle en BMX, les tests d'évaluation des qualités physiques sont encore choisis de manière empirique sans savoir véritablement quel test est le plus adapté. Le but de cette étude est donc de déterminer si les variables biomécaniques mesurées, lors du test de détente verticale (squat jump) et lors du test charge-vitesse sur bicyclette ergométrique, sont liées à la performance lors de la phase d'accélération en BMX. Les résultats permettront de savoir si le test de détente et le test charge-vitesse sont appropriés pour l'évaluation des pilotes de BMX, et quelles variables biomécaniques mesurées lors de ces tests sont liées à la performance lors de la phase d'accélération.

2. Matériel et méthode

Trente-cinq pilotes de BMX (âge : 17 ± 3 ans ; taille : $1,70 \pm 0,13$ m ; masse : $65,9 \pm 13,1$ kg ; masse grasse : $15,7 \pm 4,8$ %) de niveau régional à national ont participé volontairement à cette étude. Après un échauffement standardisé, les sujets ont réalisé deux types de test d'évaluation :

- trois tests de détente verticale (squat jump). La posture de départ était standardisée (angle segmentaire cuisse-jambe de 90°), les mains étaient positionnées au niveau des hanches. Le temps de récupération entre les sauts était d'une minute. Les hauteurs de saut (H_{SJ} [m]) ainsi que la puissance maximale (P_{SJ} [W]) étaient calculées à partir des temps de vol mesurés à l'aide du système Optojump (Microgate SLR, Italie) [5]. La meilleure performance des trois essais était retenue ;
- trois tests de sprint (charge-vitesse) ont été réalisés contre une résistance respectivement de 0,4, 0,6 et 0,8 N.kg⁻¹ [1]. Les tests étaient effectués en position assise pendant sept secondes sur un vélo de course (Look, France) équipé de pédales automatiques disposées sur un ergotrainer (Cateye). Le temps de récupération entre les sprints était de cinq minutes. Lors des tests charge-vitesse, la puissance mécanique (W) et la cadence de pédalage max (Cad_{max} [rpm]) étaient mesurées par le système PowerTap (modèle professionnel, CycleOps, États-Unis) précédemment validé par rapport au système de mesure SRM Training System (SRM, Jülich, Welldorf, Allemagne) [2,4]. Ce système de

mesure de la puissance (0,8 Hz) est un moyeu arrière munit de huit jauges de déformation qui permet de mesurer le couple moteur produit ainsi que la vitesse de rotation de la roue. La puissance mécanique est alors obtenue par le produit du couple moteur et de la vitesse angulaire de la roue arrière.

Pour les tests de sauts et ceux réalisés sur ergotrainer, les valeurs de puissance maximale étaient exprimées à la fois en valeur absolue (respectivement P_{SJ} et P_S [W]) mais également en tenant compte de la masse de chaque individu (respectivement $P_{SJ/m}$ et $P_{S/m}$ [W.kg⁻¹]). Sur le terrain, la première ligne droite d'une piste de BMX (Clairoix, France) a été instrumentée à l'aide de cellules chronométriques (Racetime 2, Microgate, Italie) disposées :

- au départ (0,1 m avant la barrière de départ) ;
- 5,2 m après le départ (trois premiers coups de pédale) permettant la mesure de T_1 (s) ;
- 28,7 m après le départ (avant le premier obstacle) permettant la mesure de T_2 (s).

Au départ, le pilote était maintenu en équilibre par un expérimentateur placé derrière lui. Après un compte à rebours, le pilote s'élançait le plus rapidement possible (le temps de réaction n'était pas pris en compte). Des corrélations ont été établies entre les variables mécaniques mesurées lors des tests et les performances chronométriques mesurées sur la piste de BMX en utilisant une méthodologie similaire à celle de Morin et al. [6] qui ont étudié la phase d'accélération sur des sprinteurs de 100 m en athlétisme. Un seuil de significativité fixé à $p < 0,01$ a été retenu.

3. Résultats

Le Tableau 1 montre les valeurs moyennes des variables mécaniques étudiées et leur coefficient de corrélation avec les temps mesurés lors de la phase d'accélération sur la piste de BMX. Les puissances mécaniques mesurées lors des tests de détente et charge-vitesse sont fortement corrélées avec les performances en T_2 ($r : 0,83-0,85$). La Fig. 1 indique la relation significative ($p < 0,01$) qui existe entre la puissance produite lors du test charge-vitesse et la performance chronométrique (T_2) lors de la phase d'accélération.

4. Discussion

Les résultats de cette étude indiquent qu'il existe une relation significative entre les résultats (P_{SJ} , $P_{SJ/m}$, P_S , $P_{S/m}$) des tests de détente et charge-vitesse et les résultats chronométriques (T_1 et T_2) mesurés sur le terrain lors de la phase d'accélération en BMX (Tableau 1). Seules les Cad_{max} lors des trois tests charge-vitesse ne sont pas liées significativement avec les résultats de terrain. Cela est certainement dû au fait que lors de la phase d'accélération les premiers coups de pédale sont réalisés avec une faible cadence de pédalage en sollicitant donc certainement plus la capacité de force du pilote que sa capacité de vélocité. Les P_{SJ} ainsi que les P_S obtenues lors des trois

Tableau 1

Valeurs des variables mesurées et calculées (moyenne \pm écart-type) et matrice de corrélations liant les paramètres mécaniques et les performances chronométriques réalisées lors de la phase d'accélération en BMX

	Moyenne \pm écart-type	T_1 (s) 1,08 \pm 0,07	T_2 (s) 3,64 \pm 0,17
H_{SJ} (m)	0,34 \pm 0,05	-0,47 *	-0,58 *
P_{SJ} (W)	835 \pm 213	-0,75 *	-0,83 *
$P_{SJ/m}$ (W.kg ⁻¹)	12,6 \pm 1,0	-0,48 *	-0,59 *
P_S 0,4 N.kg ⁻¹ (W)	982 \pm 311	-0,76 *	-0,83 *
$P_{S/m}$ 0,4 N.kg ⁻¹ (W.kg ⁻¹)	14,7 \pm 2,4	-0,60 *	-0,65 *
Cad_{max} 0,4 N.kg ⁻¹ (rpm)	149 \pm 17	-0,25	-0,35
P_S 0,6 N.kg ⁻¹ (W)	980 \pm 304	-0,78 *	-0,85 *
$P_{S/m}$ 0,6 N.kg ⁻¹ (W.kg ⁻¹)	14,7 \pm 2,3	-0,62 *	-0,66 *
Cad_{max} 0,6 N.kg ⁻¹ (rpm)	133 \pm 18	-0,19	-0,35
P_S 0,8 N.kg ⁻¹ (W)	942 \pm 296	-0,77 *	-0,85 *
$P_{S/m}$ 0,8 N.kg ⁻¹ (W.kg ⁻¹)	14,1 \pm 2,2	-0,60 *	-0,67 *
Cad_{max} 0,8 N.kg ⁻¹ (rpm)	115 \pm 15	-0,19	-0,32

Seuil de significativité : * $p < 0,01$. T_1 : temps après 5,2 m lors de la phase d'accélération (s); T_2 : temps après 28,7 m lors de la phase d'accélération (s); H_{SJ} : hauteur maximale atteinte lors du test de détente (m); P_{SJ} : puissance maximale produite lors du test de détente (W), m : masse corporelle (kg); P_S 0,4 N.kg⁻¹, P_S 0,6 N.kg⁻¹ et P_S 0,8 N.kg⁻¹ : puissance maximale obtenue lors des tests charge-vitesse réalisés respectivement contre une résistance de 0,4, 0,6 et 0,8 N.kg⁻¹ (W); Cad_{max} 0,4 N.kg⁻¹, Cad_{max} 0,6 N.kg⁻¹ et Cad_{max} 0,8 N.kg⁻¹ : cadence de pédalage maximale mesurée lors des tests charge-vitesse réalisés contre respectivement une résistance de 0,4, 0,6 et 0,8 N.kg⁻¹.

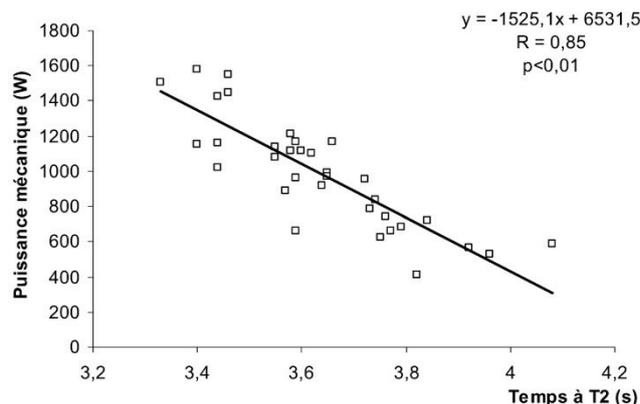


Fig. 1. Relation entre les valeurs de P_S lors du test de charge-vitesse (0,6 N.kg⁻¹) et la performance T_2 lors de la phase d'accélération en BMX.

P_S : puissance maximale obtenue lors des tests charge-vitesse (W); T_2 : temps après 28,7 m lors de la phase d'accélération (s).

tests de sprint contre 0,4, 0,6 et 0,8 N.kg⁻¹ sont les variables mécaniques les plus liées avec les performances après trois coups de pédale (T_1) [$R = -0,75, -0,76, -0,78, -0,77$, respectivement] et après environ 30 m (T_2) [$R = -0,83, -0,83, -0,85, -0,85$, respectivement]. Ces résultats indiquent qu'il existe un lien fort entre les niveaux de puissance mesurés lors des tests

de détente et charge-vitesse et la capacité d'accélération des pilotes (Fig. 1). Ces résultats suggèrent qu'une partie de la performance lors de la première ligne droite d'une Race peut être expliquée à partir de ces résultats. Il est intéressant de noter que la résistance de pédalage utilisée lors des tests charge-vitesse (0,4, 0,6, 0,8 N.kg⁻¹) n'a pas d'influence sur le degré de liaison entre P_S et les performances en T_1 et T_2 . En revanche, lorsque les résultats des tests sont exprimés en valeur relative ($P_{SJ/m}$ et $P_{S/m}$) par rapport à la masse corporelle, ils expliquent dans une moindre mesure les performances T_1 et T_2 . Cela est aussi le cas pour H_{SJ} qui est déterminé à la fois par le niveau de puissance développée mais aussi par la masse du pilote. Ces niveaux de corrélation moins élevés sont certainement liés au fait qu'en BMX, les départs sont réalisés sur une piste inclinée descendante. Dans ces conditions, la masse corporelle des pilotes (qui pourtant est liée à son inertie) ne semble donc pas représenter un handicap majeur.

5. Conclusion

Cette étude suggère que les résultats (puissance mécanique) des tests de détente (squat jump) et charge-vitesse sont bien reliés à la performance lors de la phase d'accélération en BMX, et que ces tests peuvent donc être utilisés en routine dans le suivi de l'entraînement des pilotes.

Remerciements

Nous tenons à remercier : le département performance de la Fédération française de cyclisme ainsi que le club de BMX de Clairoux pour leur aide lors de la réalisation de cette étude.

Références

- [1] Bertucci W, Tairar R, Grappe F. Differences between sprint tests under laboratory and actual cycling conditions. *J Sports Med Phys Fitness* 2005;45(3):277–83.
- [2] Bertucci W, Duc S, Villerius V, Pemin JN, Grappe F. Validity and reliability of the PowerTap mobile cycling powermeter when compared with the SRM Device. *Int J Sports Med* 2005;26(10):868–73.
- [3] Brogger JT, Hvass I, Bugge S. Injuries at the BMX Cycling European Championship 1989. *Br J Sports Med* 1990;24(4):269–70.
- [4] Gardner AS, Stephens S, Martin DT, Lawton E, Lee H, Jenkins D. Accuracy of SRM and power tap power-monitoring systems for bicycling. *Med Sci Sports Exerc* 2004;36(7):1252–8.
- [5] Lehance C, Croisier JL, Bury T. Validation du système Optojump en tant qu'outil d'évaluation de la force-vitesse (puissance) des membres inférieurs. *Sci Sports* 2005;20(3):131–5.
- [6] Morin JB, Hintzy F, Belli A, Grappe F. Relations force-vitesse et performance en sprint chez des athlètes entraînés. *Sci Sports* 2002;17(2):78–85.
- [7] Paquet Y, Bertucci W, Hourde C. Influence de variables psychologiques sur la performance au test de Wingate chez des pilotes de BMX. *Sci Sports* 2006;21(5):297–9.

PROTOCOLE D'OPTIMISATION POUR LA CONCEPTION D'UN CADRE DE BICYCLETTE DE TYPE BMX A PARTIR DE L'ETUDE BIOMECHANIQUE DE L'INTERFACE HOMME – MACHINE

PROTOCOL OF OPTIMIZATION FOR DESIGN OF BMX BICYCLE FRAME IN STUDYING BIOMECHANICS OF THE HUMAN – MACHINE INTERFACE

Résumé – Le cadre assure la fonction de squelette de la bicyclette. Son rôle structurel est le transfert de l'énergie mécanique produite par le cycliste à la roue arrière. Moins le cadre dissipera d'énergie plus il sera efficace. Dans la pratique tout-terrain de cyclisme (BMX, VTT), le cadre est soumis à de fortes sollicitations du pilote et du terrain et des chocs qu'il engendre. En BMX, la conception empirique et les importantes sollicitations du cadre peuvent entraîner des endommagements pouvant aller jusqu'à la rupture de certains tubes. L'objectif de cette thèse est de proposer un protocole expérimental visant à optimiser la conception d'un cadre, grâce à l'étude biomécanique de l'interaction homme – machine. L'activité de BMX est choisie comme illustration de ce protocole. Pour cela, l'étude se déroule en 2 phases : 1) L'étude du cycliste, les forces qu'il applique sur le cadre et de l'inclinaison latérale qu'il provoque lors du pédalage debout sur les pédales ; 2) L'étude expérimentale de la déformation du cadre. A l'aide de jauges d'extensométrie, un modèle numérique d'analyse aux éléments finis est validé en condition statique. Puis un système de barre a été conçu pour simuler les forces appliquées sur les pédales par le cycliste, pour étudier la déformation du cadre ; Et enfin, en condition dynamique, la déformation du cadre est étudiée avec un pilote lors de différents tests (pédalage à diverses intensités, application d'une force isométrique maximale et un saut vertical) à l'aide de deux pédales instrumentées, d'un pédalier instrumenté et de jauges d'extensométrie. Les résultats de cette étude montrent que pour le cadre testé le tube de selle est celui qui subit le plus de déformations, et que la déformation du cadre est fortement liée à la composante verticale de la force appliquée sur la pédale. Ce protocole permet de comprendre l'interaction entre le pilote et la bicyclette. Et il est utile dans l'optimisation de la conception des cadres.

Mots-Clés – Cyclisme · BMX · Cadre · Déformation · Forces appliquées sur la pédale

Abstract – The structural role of the bicycle frame is to transfer the mechanical energy produced by the cyclist at the rear wheel. The less the bicycle frame dissipates energy the more it is. In off-road cycling (BMX, mountain bike), high loads are applied on the frame, from the pilot and from the field and the ground reaction. In BMX, the empirical design and the important part of stress can lead to the rupture of some tubes. The aim of this thesis is to propose an experimental protocol designed to optimize the design of a frame, by studying the biomechanics of the human – machine interaction. The activity of BMX is chosen as an illustration of this protocol. For this, the study takes place in 2 phases: 1) The study of the cyclist, the forces generated on the bicycle frame and the out of plane bending when he is pedaling standing on the pedals, 2) The experimental study of deformation of the frame. Using strain gages, a numerical model of finite element analysis is validated in static condition. Then a bar system was designed to simulate the forces applied to the pedals by the cyclist in order to study the deformation of the frame. And finally, in dynamic condition, the deformation of the frame is studied during a pilot doing different tests (cycling at various intensities, application of a maximum isometric strength and vertical jump), using two instrumented 3D pedals, an instrumented crank and strain gages. The results of this study show that the higher strain is localized in the seat tube and the strain of the bicycle frame is highly correlated to the vertical component of the pedal force. This protocol can allow understanding the interaction between the rider and the bicycle. And it could be a powerful tool in optimizing the design of bicycle frames.

Key Words – Cycling · BMX · Bicycle frame · Strain · Pedal forces