

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'UNIVERSITÉ DE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE

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

Par
Pierre DEBRAUX

ETUDE DES DETERMINANTS DE LA PERFORMANCE EN

CYCLISME

PUISSANCE MUSCULAIRE ET AERODYNAMISME

APPLICATION EN BMX

Directeur de thèse : William BERTUCCI (MCU, HDR)

Soutenue le 24 septembre 2010

Devant le jury composé de :

Directeur de Thèse :	W. BERTUCCI	Maître de Conférences, HDR, Université de Reims, France
Rapporteur :	J.-P. MARIOT	Professeur des Universités, Université du Maine, France
Rapporteur :	F. GRAPPE	Maître de Conférences, HDR, Université de Franche-Comté, France
Membre du jury	H. VANDEWALLE	Maître de Conférences, HDR, INSEP, France
Membre du jury :	J.-P. DRON	Professeur des Universités, Université de Reims, France
Membre du jury :	A. LODINI	Professeur des Universités, 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'UNIVERSITÉ DE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE

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

Par
Pierre DEBRAUX

ETUDE DES DETERMINANTS DE LA PERFORMANCE EN
CYCLISME
PUISSANCE MUSCULAIRE ET AERODYNAMISME
APPLICATION EN BMX

Directeur de thèse : William BERTUCCI (MCU, HDR)

Soutenue le 24 septembre 2010

Devant le jury composé de :

Directeur de Thèse :	W. BERTUCCI	Maître de Conférences, HDR, Université de Reims, France
Rapporteur :	J.-P. MARIOT	Professeur des Universités, Université du Maine, France
Rapporteur :	F. GRAPPE	Maître de Conférences, HDR, Université de Franche-Comté, France
Membre du jury	H. VANDEWALLE	Maître de Conférences, HDR, INSEP, France
Membre du jury :	J.-P. DRON	Professeur des Universités, Université de Reims, France
Membre du jury :	A. LODINI	Professeur des Universités, Université de Reims, France

Cette thèse est dédiée à la mémoire de

Асен М. Манолов

Grand-père, père, ami, un grand homme

3 Décembre 1924 – 13 Février 2010

REMERCIEMENTS

C'est avec un plaisir sincère que j'aimerais remercier toutes les personnes qui ont participé à leur manière à l'accomplissement de ce travail de thèse.

En premier lieu je souhaite exprimer ma profonde gratitude à **Monsieur William Bertucci, Maître de Conférences des Universités (HDR)**, qui a accepté de diriger cette thèse dans la continuité de mon mémoire de Master. Qu'il soit remercié pour sa grande disponibilité à mon égard, son regard critique, ses compétences scientifiques et ses conseils. J'ai énormément appris à son contact, merci.

Mes remerciements à **Monsieur le Professeur des Universités Alain Lodini** pour m'avoir accueilli au sein du Laboratoire d'Analyses des Contraintes Mécaniques (LACM-DTI) et pour m'avoir aidé à structurer mon travail.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à **Monsieur Frederic Grappe, Maître de Conférences des Universités (HDR)** et à **Monsieur le Professeur des Universités Jean-Pierre Mariot** pour avoir accepté spontanément de juger mon travail. Et je remercie sincèrement **Monsieur Henry Vandewalle, Maître de Conférences des Universités (HDR)** et **Monsieur le Professeur des Universités Jean-Paul Dron** d'avoir accepté de faire partie de mon jury de soutenance.

Je remercie **Simon Rogier** pour sa disponibilité, sa bonne humeur, et son aide dans les diverses expérimentations que j'ai menées.

Merci à **Fabien Legrand, Maître de Conférences des Universités** et **Mickael Soudain-Pineau** pour leur aide précieuse en statistiques.

Un grand merci à **Stephane Herrgott, Remi Pronier, Adrian Pages, Marien Jesson, Youssef El Aji** et à tous **les athlètes de Force**, aux **pilotes de BMX de Clairoux**, aux **pilotes de BMX du pôle France d'Aix en Provence**, et aux **cyclistes du C.R.E.C.F.**, qu'ils soient tous assurés de ma gratitude pour avoir permis la réalisation de ce travail.

J'aimerais remercier tout particulièrement **Aneliya**. Elle a su me soutenir, m'aider et me supporter à chaque instant durant ces 3 dernières années. Elle m'aide à m'accomplir et à me surpasser au quotidien, pour tout cela qu'elle en soit profondément remerciée.

Et je clos ces remerciements en témoignant ma reconnaissance à **ma famille** pour son soutien, et sans qui je n'aurai pas pu poursuivre mes études jusqu'à ce jour. Et je tiens à exprimer ma gratitude à **la famille Manolovi** pour leur soutien permanent et leurs encouragements.

PUBLICATIONS

PUBLICATIONS INTERNATIONALES A COMITE DE LECTURE

- ✓ [Debraux P](#), Bertucci W, Manolova AV, Rogier S, Lodini A. New method to estimate the cycling frontal area. *Int J Sports Med* 2009; 30 (4): 266-272.
- ✓ **[Article en soumission]** [Debraux P](#), Grappe F, Manolova AV, Bertucci W. The aerodynamic drag in cycling: Methods of assessment. *J Sports Sci*.
- ✓ **[Article en soumission]** Manolova AV, Crequy S, Lestriez P, [Debraux P](#), Chiementin X, Bertucci W. Measurements of strain in bicycle frame through different conditions of test. *Sports Eng*.

COMMUNICATIONS ORALES

- ✓ [Debraux P](#), Manolova AV, Bertucci W. Déterminants musculaires de la performance lors d'exercices à intensité maximale : Application en BMX. 2^{ème} Journée Gilles Cometti, 19 – 20 Nov. 2010, Dijon, France.
- ✓ [Debraux P](#), Bertucci W. Résistances à l'avancement en cyclisme : Théorie et applications. *Séminaire des Entraîneurs et des Cadres Techniques du Cyclisme*, 13 – 14 Nov. 2009, Bourges, France.
- ✓ [Debraux P](#), Bertucci W. Validation d'une méthode de mesure de l'aire frontale projetée de cyclistes. *Journée Nationale des Cadres Techniques de Cyclisme*, 17 – 18 Nov. 2006, Chatenay Malabry, France.

- ✓ Debraux P, Bertucci W, Manolova AV. Reconstruction 3D et estimation de la surface frontale chez le nageur de papillon. *3^{ème} Congrès du Réseau Français d'Ingénierie Sportive* 2006, Bidart, France.
- ✓ Debraux P, Bertucci W, Manolova AV. Casque BMX : Amélioration de l'aérodynamisme. *3^{ème} Congrès du Réseau Français d'Ingénierie Sportive* 2006, Bidart, France.
- ✓ Taiar R, Debraux P, Manolova AV, Toshev Y. 3D Swimmer body modelling based on experimental video data. *10th National Congress on theoretical and applied mechanics* 2005, Varna, Bulgarie.

COMMUNICATION AFFICHEE

- ✓ Manolova AV, Debraux P, Bertucci W. Strain in BMX frame through different tests. *8th Conference of the International Sports Engineering Association (ISEA)*, 12 – 16 Juil. 2010, Vienne, Autriche.

Les compétitions de BMX se déroulent sur une piste spécifique de 300-400 m parsemée de bosses et de virages avec un départ sur plan incliné. Les vitesses atteintes par les pilotes peuvent être supérieures à 70 kmh⁻¹ quelques secondes après le départ. Peu d'études scientifiques ont été consacrées aux paramètres liés à la performance en BMX. Néanmoins une étude a montré que la phase de départ était primordiale et que la puissance maximale musculaire était un des principaux facteurs de la performance lors de cette phase.

L'objectif de cette thèse est d'étudier les déterminants de la performance dans cette discipline à partir de deux paramètres essentiels : la production de puissance musculaire des membres inférieurs et une variable de l'aérodynamisme, l'aire frontale projetée.

Dans un premier temps, l'étude de la production de puissance musculaire des membres inférieurs au cours de tests de sprints sur cyclo-wattmètre et d'exercices de ½ Squat chez des cyclistes sur route et des pilotes de BMX a montré que l'aire de section musculaire et la force maximale étaient des indicateurs de la performance pour des sprints courts (~ 6-30s). La comparaison des profils musculaires inertiels à des athlètes de force a montré que les pilotes de BMX produisaient une puissance maximale à des charges relatives faibles et qu'il était nécessaire d'augmenter la puissance produite à des charges élevées.

Dans un deuxième temps, une nouvelle méthode de terrain pour la mesure de l'aire frontale projetée en cyclisme a été testée, elle est reproductible et valide en comparaison aux méthodes de pesage des photographies et de digitalisation. Cette méthode a permis de mesurer l'aire frontale projetée de pilotes de BMX lors de sprints de 80 m. Ces sprints ont permis de mettre en évidence l'importance de la puissance maximale, de l'aire frontale projetée et de la cadence moyenne de pédalage sur la performance chronométrique, et la nécessité de trouver un braquet optimal pour diminuer la différence entre la cadence moyenne et la cadence optimale.

Pour optimiser la performance en compétition chez les pilotes de BMX, il apparaît nécessaire : i) de suivre un entraînement en musculation pour augmenter la masse musculaire et la force maximale des membres inférieurs ; ii) d'adapter le braquet selon le niveau des pilotes ; et iii) d'optimiser l'aire frontale projetée selon les phases de course. Des solutions sont proposées dans cette thèse.

Mots-Clés – BMX · Puissance musculaire · Accélérométrie · Aérodynamisme · Aire frontale projetée

ABSTRACT

The BMX competitions take place on a specific track of 300-400 m with bumps and turns, and with a downhill start. The displacement velocity reached by the riders may be greater than 70 kmh^{-1} a few seconds after the start. Few scientific studies focused to the parameters related to the performance in BMX. Nevertheless, a study showed that the starting phase was capital and that the maximum muscle power was a major contributor to performance during this phase.

The aim of this thesis is to study the determinants of performance in this sport in focusing on two main parameters: the muscular power output of the lower limbs and a variable of aerodynamics, the projected frontal area.

Firstly, the study of the muscular power output in lower body during sprints on a cycle ergometer and a ½ Squat among road cyclists and BMX riders showed that the muscle cross-sectional area and maximal muscle strength were indicators of performance for all-out sprints ($\sim 6\text{-}30\text{s}$). A comparison of muscular inertial profiles has shown that BMX riders produced a maximal power output with relative light loads and it was necessary to increase muscular power output at heavy loads.

Secondly, a new field method for measuring the projected frontal area in cycling has been tested. This method is reproducible and valid in comparison to the methods of weighing photographs and digitization. This method was used to measure the projected frontal area of BMX riders during 80 m sprints. These sprints allowed to highlight the importance of the maximal power, the projected frontal area and the average pedaling rate on the chronometric performance and the need to find an optimal gear to decrease the difference between the average pedaling rate and the optimal pedaling rate.

To optimize the performance in competition among the BMX riders, it seems necessary: *i*) to follow a resistance training to increase muscle mass and muscle maximal strength of the lower limbs; *ii*) to adjust the gear ratio depending on the riders; and *iii*) to optimize the projected frontal area for some phases of the race. Solutions are proposed in this thesis.

Keywords – BMX · Muscular power output · Accelerometer · Aerodynamics · Projected frontal area

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	V
PUBLICATIONS	VII
RÉSUMÉ	IX
ABSTRACT.....	X
TABLE DES MATIÈRES.....	XI
LISTE DES ABRÉVIATIONS	XVI
I. INTRODUCTION	22
II. LE BMX, DISCIPLINE OLYMPIQUE	26
1. DESCRIPTION DE L'ACTIVITE	26
2. LE DEPART : PHASE DECISIVE	27
III. PUISSANCE MUSCULAIRE	35
1. REVUE DE LITTÉRATURE	35
1.1. DEFINITION DE LA NOTION DE PUISSANCE	36
1.2. EVALUATION DE LA PUISSANCE DES MEMBRES INFÉRIEURS EN MUSCULATION.....	36
1.2.1. Méthodes de calcul de la puissance musculaire	37
1.2.1.1. Mesure du déplacement	37
1.2.1.2. Mesure des forces verticales de réaction au sol	39
1.2.1.3. Mesure des forces verticales de réaction au sol et du déplacement.....	40
1.2.1.4. L'accélérométrie	40
1.2.2. Méthode de calcul de la puissance musculaire pour le saut vertical.....	41
1.3. PARAMETRES INFLUENÇANT LA PUISSANCE MAXIMALE	43
1.3.1. La relation Force – Vitesse musculaire	43
1.3.2. La relation Charge – Puissance pour les membres inférieurs	45

1.3.2.1.	Influence du type d'exercice sur la relation Charge – Puissance	49
1.3.2.2.	Puissance maximale : Pic et moyenne	51
1.3.2.3.	Influence de la masse corporelle.....	52
1.4.	EVALUATION DE LA PUISSANCE DES MEMBRES INFERIEURS EN CYCLISME.....	54
1.4.1.	Tests sur cyclo-ergometre	54
1.4.1.1.	Test de « Wingate »	54
1.4.1.2.	Test « force – vitesse »	56
1.4.2.	Paramètres influençant la puissance musculaire en cyclisme.....	58
1.4.2.1.	La longueur de manivelle.....	59
1.4.2.2.	Optimisation du cycle de pédalage	60
1.4.2.3.	La cadence optimale de pédalage.....	64
1.4.2.4.	Les pédales à fixation automatique	64
2.	ETUDE DES DETERMINANTS MUSCULAIRES DE LA PERFORMANCE EN CYCLISME SUR ROUTE ET EN BMX LORS D'EXERCICES A INTENSITES MAXIMALES.....	68
2.1.	DETERMINANTS MUSCULAIRE DE LA PERFORMANCE EN CYCLISME SUR ROUTE LORS D'EXERCICES A INTENSITE MAXIMALES	70
2.1.1.	METHODES EXPERIMENTALES.....	70
2.1.1.1.	Sujets	70
2.1.1.1.1.	Données anthropométriques et composition corporelle	70
2.1.1.1.2.	Détermination de l'aire de section musculaire de la cuisse.....	71
2.1.1.2.	Protocole.....	72
2.1.1.2.1.	Détermination du 1RM en ½ Squat concentrique	72
2.1.1.2.2.	Profil musculaire inertiel avec incrémentation de la charge en ½ Squat concentrique	73
2.1.1.2.3.	Test de détente verticale (« Squat Jump »)	76
2.1.1.2.4.	Tests de « Force – Vitesse » sur watt-ergomètre	76
2.1.1.3.	Analyses statistiques	78
2.1.2.	RÉSULTATS.....	78
2.1.2.1.	Données anthropométriques et 1RM.....	79
2.1.2.2.	Profil musculaire inertiel avec incrémentation de la charge en ½ squat concentrique	79
2.1.2.3.	Saut vertical	83
2.1.2.4.	Tests de « Force – Vitesse » sur cyclo-wattmètre	84
2.1.2.5.	Corrélations	86
2.1.3.	DISCUSSIONS.....	89
2.1.4.	CONCLUSION.....	98

2.2.	DETERMINANTS MUSCULAIRE DE LA PERFORMANCE EN BMX.....	100
2.2.1.	Méthodes expérimentales.....	100
2.2.1.1.	Sujets	100
2.2.1.1.1.	Données anthropométriques et composition corporelle	100
2.2.1.2.	Protocole.....	100
2.2.1.2.1.	Profil musculaire inertiel avec incrémentation de la charge en ½ Squat concentrique ..	101
2.2.1.2.2.	Test de détente verticale (« Squat Jump »)	102
2.2.1.2.3.	Tests de « Force – Vitesse » et de Wingate sur cyclo-wattmètre	103
2.2.1.3.	Analyses statistiques	104
2.2.2.	Résultats.....	105
2.2.2.1.	Profil musculaire inertiel avec incrémentation de la charge en ½ Squat concentrique.....	105
2.2.2.2.	Saut vertical	108
2.2.2.3.	Tests de « Force – Vitesse » et de Wingate sur cyclo-wattmètre	109
2.2.2.4.	Corrélations	110
2.2.3.	Discussions	111
2.2.4.	Conclusion	118
3.	COMPARAISON DES PROFILS MUSCULAIRES INERTIELS CHEZ DES PILOTES DE BMX, DES CYCLISTES SUR ROUTES ET DES athlètes de force	120
3.1.	INTRODUCTION	120
3.2.	METHODES EXPERIMENTALES.....	121
3.2.1.	Sujets et anthropométrie.....	121
3.2.2.	Protocole.....	121
3.2.2.1.	Protocole d'évaluation du profil musculaire inertiel des Pilotes de BMX de haut niveau	122
3.2.2.2.	Protocole d'évaluation du profil musculaire inertiel des Athlètes de force.....	123
3.2.2.3.	Test de détente verticale (« Squat Jump »)	124
3.2.2.4.	Performance en sprint départ arrêté	125
3.2.3.	Analyses statistiques	126
3.3.	RESULTATS.....	126
3.3.1.	Données anthropométriques et 1RM.....	126
3.3.2.	PROFIL MUSCULAIRE inertiel.....	127
3.3.3.	Saut vertical	131
3.4.	DISCUSSIONS.....	132
3.5.	CONCLUSIONS	135
4.	OPTIMISATION DES PARAMÈTRES EN BMX.....	137

IV. ANALYSE D'UNE VARIABLE DE L'AERODYNAMISME : L'AIRE FRONTALE PROJETEE.....142

1.	REVUE DE LITTERATURE	143
1.1.	LES DIFFERENTES RESISTANCES OPPOSEES A L'AVANCEMENT EN CYCLISME	143
1.2.	VARIABLES DE LA TRAINEE AERODYNAMIQUE	144
1.2.1.	Masse volumique de l'air	145
1.2.2.	Coefficient de traînée	146
1.2.3.	Aire frontale projetée	151
1.3.	METHODES DE MESURES DE L'AIRE FRONTALE PROJETEE	153
1.3.1.	Méthode de pesage des photographies	153
1.3.2.	Méthode de planimétrie	155
1.3.3.	Méthode de digitalisation.....	157
1.4.	LIMITES DES METHODES ACTUELLES DE MESURE DE L'AIRE FRONTALE PROJETEE ...	159
2.	MISE EN PLACE D'UNE NOUVELLE MÉTHODE DE MESURE DE TERRAIN [Annexe A]	161
2.1.	INTRODUCTION	161
2.2.	METHODES EXPERIMENTALES.....	162
2.2.1.	Sujets.....	162
2.2.2.	Protocole de mesure en conditions de laboratoire	162
2.2.3.	Détermination de l'aire frontale projetée à l'aide d'une nouvelle méthode de terrain	164
2.2.4.	Détermination de l'aire frontale projetée à l'aide de la méthode de référence : la méthode de pesage des photographies	165
2.2.5.	Détermination de l'aire frontale projetée à l'aide de la méthode de digitalisation	166
2.2.6.	Détermination de l'aire frontale effective en conditions réelles de pédalage	167
2.2.7.	Analyses statistiques	170
2.3.	RESULTATS.....	171
2.4.	DISCUSSIONS.....	173
2.5.	CONCLUSIONS	178

V. RELATIONS COUPLE – VITESSE ET PUISSANCE – VITESSE EN BMX LORS D'UN SPRINT DE 80M CHEZ DES PILOTES DE HAUT NIVEAU181

1.	METHODES EXPERIMENTALES.....	182
1.1.	SUJETS	182

1.2.	AIRE FRONTALE PROJETEE TOTALE	182
1.3.	SPRINT DE 80 M.....	184
1.4.	ANALYSES STATISTIQUES	185
2.	RESULTATS.....	186
3.	DISCUSSIONS.....	187
4.	CONCLUSION.....	191
5.	OPTIMISATION DES PARAMÈTRES EN BMX.....	192
VI.	CONCLUSION.....	196
VII.	PERSPECTIVES.....	199
VIII.	BIBLIOGRAPHIE	204
IX.	LISTE DES FIGURES	222
X.	LISTE DES TABLEAUX.....	231
XI.	ANNEXE A	234
XII.	ANNEXE B.....	241
XIII.	ANNEXE C	242
XIV.	ANNEXE D	249

LISTE DES ABRÉVIATIONS

CHAPITRE III.1. PUISSANCE MUSCULAIRE – Revue de littérature

Symbole	Unité	Définition
1RM	kg	Charge maximale dynamique
a_i	ms^{-2}	Accélération instantanée
APS		Activité Physique et Sportive
Cad	rpm	Cadence de pédalage
Cad_{Opt}	rpm	Cadence optimale de pédalage
Ch_{Opt}	% 1RM	Charge relative à laquelle la production de puissance est maximale
Ch_{rel}	% 1RM	Charge relative à la charge maximale dynamique
CMJ		Countermovement Jump
Con.		Concentrique
d	m	Distance d'application d'une force
F	N	Force
F₀	N	Force maximale théorique
F_i	N	Force instantanée
F_{moy}	N	Force moyenne
F_{Opt}	N	Force optimale
g	ms^{-2}	Accélération gravitationnelle (~ 9,81)
h	m	Déplacement vertical du centre de gravité
h_c	m	Hauteur corporelle
h_{po}	m	Hauteur de la phase de poussée lors d'un saut vertical
I	Ns	Moment linéaire ou Impulsion
IE	%	Index d'endurance
l	m	Longueur de la manivelle
m_c	kg	Masse corporelle

m_{ch}	kg	Masse de la charge
P	W	Puissance
p	kgms ⁻¹	Quantité de mouvement
PC		Power Clean (Epaulé)
P_i	W	Puissance instantanée
P_{MAX}	W	Puissance musculaire maximale
P_{MIN}	W	Puissance minimale produite
P_{moy}	W	Puissance moyenne
SJ		Squat Jump
$SJ h_{MAX}$	m	Hauteur de saut
t	s	Temps
t_s	s	Temps de suspension lors d'un saut vertical
v	ms ⁻¹	Vitesse
v_0	ms ⁻¹	Vitesse maximale théorique
v_i	ms ⁻¹	Vitesse instantanée
v_{moy}	m·s ⁻¹	Vitesse moyenne
v_{t0}	ms ⁻¹	Vitesse initiale
W	J	Travail mécanique d'une force
ω	rads ⁻¹	Vitesse angulaire de pédalage

CHAPITRE III.2.1. PUISSANCE MUSCULAIRE – Partie expérimentale I

Symbole	Unité	Définition
MG	%	Pourcentage de masse grasse
L_{Cuisse}	m	Longueur de la cuisse
L_{Jambe}	m	Longueur de la jambe
AM_{Cuisse}	cm ²	Aire de section musculaire de la cuisse
C_{TC}	cm	Circonférence totale de la cuisse
D_c	-	Densité corporelle

d_E	cm	Distance entre l'épicondyle fémoral latéral et médial
P_{Cuisse}	cm	Pli cutané quadricipital
Myo F	N	Force produite déterminée à l'aide du Myotest [®]
Myo v	ms ⁻¹	Vitesse enregistrée à l'aide du Myotest [®]
Myo P	W	Puissance produite déterminée à l'aide du Myotest [®]
Myo P_{MAX}	W	Puissance maximale produite déterminée à l'aide du Myotest [®]
Myo P_{moy}	W	Puissance moyenne produite déterminée à l'aide du Myotest [®]
Myo F_{MAX}	N	Force maximale produite déterminée à l'aide du Myotest [®]
Myo v_{MAX}	ms ⁻¹	Vitesse maximale enregistrée à l'aide du Myotest [®]
Myo F_0	N	Force moyenne théorique en ½ Squat
Myo v_0	ms ⁻¹	Vitesse moyenne théorique en ½ Squat
Myo F_{moy}	N	Force moyenne produite déterminée à l'aide du Myotest [®]
Myo v_{moy}	ms ⁻¹	Vitesse moyenne enregistrée à l'aide du Myotest [®]
SJ P_{MAX}	W	Puissance maximale produite au cours d'un SJ
SJ P_{moy}	W	Puissance moyenne produite au cours d'un SJ
SJ v_{moy}	ms ⁻¹	Vitesse moyenne atteinte au cours d'un SJ
SJ v_{MAX}	ms ⁻¹	Vitesse maximale atteinte au cours d'un SJ
SJ F_{moy}	N	Force moyenne développée au cours d'un SJ
SJ F_{MAX}	N	Force maximale développée au cours d'un SJ
SRM Cad	rpm	Cadence de pédalage
SRM F	N	Force propulsive appliquée sur la pédale
SRM F_0	N	Force maximale théorique en pédalage
SRM P	W	Puissance mécanique produite mesurée par le SRM
SRM P_{MAX}	W	Puissance mécanique maximale produite mesurée par le SRM
SRM v_0	rpm	Vitesse maximale théorique en pédalage
SRM v_{Opt}	rpm	Cadence optimale de pédalage

CHAPITRE III.2.2. PUISSANCE MUSCULAIRE – Partie expérimentale II

Symbole	Unité	Définition
FV P_{MAX}	W	Puissance maximale produite lors d'un test « Force – Vitesse »
WIN P_{moy}	W	Puissance moyenne produite lors d'un test de Wingate

CHAPITRE III.3 PUISSANCE MUSCULAIRE – Partie expérimentale III

Symbole	Unité	Définition
AF		Athlètes de force
BMX_{HN}		Pilotes de BMX de haut niveau
BMX_{RN}		Pilotes de BMX de niveau régional à national
RFD_{moy}	Ns ⁻¹	Taux moyen de développement de la force
t_{5m}	s	Temps sur un sprint de 5m lors d'un départ arrêté

CHAPITRE IV.1. AIRE FRONTALE PROJETEE – Revue de littérature

Symbole	Unité	Définition
A_{BSA}	m ²	Aire de surface cutanée
AeroP		Position Aérodynamique avec prolongateur
Alt	km	Altitude
A_p	m ²	Aire frontale projetée du cycliste et de son équipement
$A_p C_D$	m ²	Aire frontale effective
C_D	-	Coefficient de traînée
DM		Méthode de digitalisation
DP		Position de compétition
NM		Nouvelle méthode de terrain
PB	mmHg	Pression barométrique du fluide
q	Pa	Pression dynamique
R_A	N	Résistance aérodynamique
Re	-	Nombre de Reynolds
R_G	N	Résistance due à la gravité

R_R	N	Résistance de roulement
R_T	N	Résistances totales à l'avancement
STA	°	Angle du tube de selle par rapport à l'horizontale
t	s	Temps
T	K	Température absolue
TA	°	Angle du tronc par rapport à l'horizontale
TAP		Position Traditionnelle Aérodynamique
UP		Position « redressée » sur une bicyclette
v_f	ms^{-1}	Vitesse d'écoulement du fluide sur le corps du cycliste
WP		Méthode de pesage des photographies
ρ	kgm^{-3}	Masse volumique de l'air
ρ_0	kgm^{-3}	Masse volumique de l'air sec en condition STPD (Standard Temperature and Pressure Dry) (kg.m^{-3})

CHAPITRE V. PERFORMANCE EN SPRINT 80M EN BMX

Symbole	Unité	Définition
C	Nm	Couple de pédalage
v_{80}	ms^{-1}	Vitesse maximale sur 80 m
C_0	Nm	Couple de pédalage maximal théorique
Cad_0	rpm	Cadence de pédalage maximale théorique
C_{Opt}	Nm	Couple de pédalage optimal



Pilote de Bicycle MotoCross (BMX)

I. INTRODUCTION

Discipline olympique depuis peu, le Bicycle Motocross (BMX) est encore une discipline mal connue et peu d'études scientifiques lui ont été consacrées. Les études traitant du BMX portent essentiellement sur les pathologies et les traumatismes liées à sa pratique [Illingworth et al., 1984 ; Brogger-Jensen et al., 1990 ; Delaney et Corr, 2005] et sur le matériel [Arola et al., 1999 ; Watt et al., 2004]. Certaines études se sont toutefois intéressées à la performance en BMX, Paquet et al. [2006] ont étudiée l'influence de certaines variables psychologiques sur la performance des pilotes, Zabala et al. [2008] se sont penchés sur l'intérêt d'une supplémentation en bicarbonate de sodium lors d'efforts répétés chez des pilotes de BMX et Bertucci et al. [2007] se sont intéressés aux facteurs mécaniques de la performance. De nombreux autres aspects restent à être étudiés et améliorés dans cette discipline.

La course de BMX se déroule sur une piste spécifique parsemée de bosses et de virages. Le départ s'effectue arrêté et la durée de chaque course n'excède pas 40 secondes. D'après Bertucci et al. [2007], la phase de départ apparaît décisive dans le classement de la course, et la puissance maximale est corrélée avec des temps de passage sur la ligne droite initiale. Comme le cyclisme sur piste, le BMX est une discipline où un haut niveau de production de puissance est nécessaire pour une meilleure performance.

De plus, les vitesses maximales lors des départs peuvent atteindre jusqu'à 70 kmh^{-1} et varient selon les pistes. En course, le pilote conserve presque en permanence la position de danseuse qui lui permet de produire une puissance supérieure à celle obtenue en position assise. Dans les virages serrés, ou encore lors du franchissement des différentes bosses, le cycliste arrête de pédaler, il se concentre alors sur les aspects techniques du pilotage. Lors de ces phases,

aucune action motrice n'est générée au niveau des pédales, la vitesse du cycliste est alors fortement influencée par les résistances à l'avancement. Le pilote doit s'efforcer de conserver la plus grande vitesse lors des passages techniques. Il semble alors que l'aérodynamisme du pilote lors de ces phases de non pédalage doit être étudié sur le terrain pour tenter de l'optimiser.

L'objectif de cette thèse est donc d'évaluer et de proposer des solutions d'optimisation de deux paramètres liés à la performance en cyclisme : la production de puissance musculaire des membres inférieurs qui est liée à l'accélération et une variable de l'aérodynamisme, l'aire frontale projetée qui permet de maximiser la vitesse et sa conservation. La discipline olympique de BMX servira à illustrer ce travail.

Cette thèse s'articulera autour de 2 axes principaux présentés en 2 parties distinctes. Le premier axe traitera de la production de puissance musculaire des membres inférieurs et de son évaluation selon différents exercices chez plusieurs échantillons d'athlètes. Cette partie aura pour objectif d'identifier les déterminants de la performance à partir notamment d'une évaluation inertielle dynamométrique et de tests « Force – Vitesse » sur cyclo-wattmètre, et d'établir des profils musculaires caractéristiques vers lesquels tendre dans le but de maximiser la production de puissance musculaire des membres inférieurs.

Puisque les pilotes de BMX développent une puissance très importante lors des départs de compétition, et que les vitesses maximales atteintes lors des 30 premiers mètres sont souvent supérieures à 70 kmh^{-1} , le deuxième axe proposera une méthode de terrain pour la mesure de l'aire frontale projetée, un paramètre très important de l'aérodynamisme en cyclisme. Le but de cette partie sera de permettre d'obtenir une méthode pour quantifier l'aire frontale des pilotes de BMX sur le terrain afin d'optimiser leur position pour minimiser la perte de vitesse lors des phases de non-pédalage. Enfin, les relations puissance – aire frontale projetée et cadence

moyenne – cadence optimale de pédalage seront étudiées lors d'un sprint de 80 m sur terrain chez des pilotes de BMX de haut niveau. L'objectif sera de mettre en évidence les déterminants de la performance sur un sprint court.

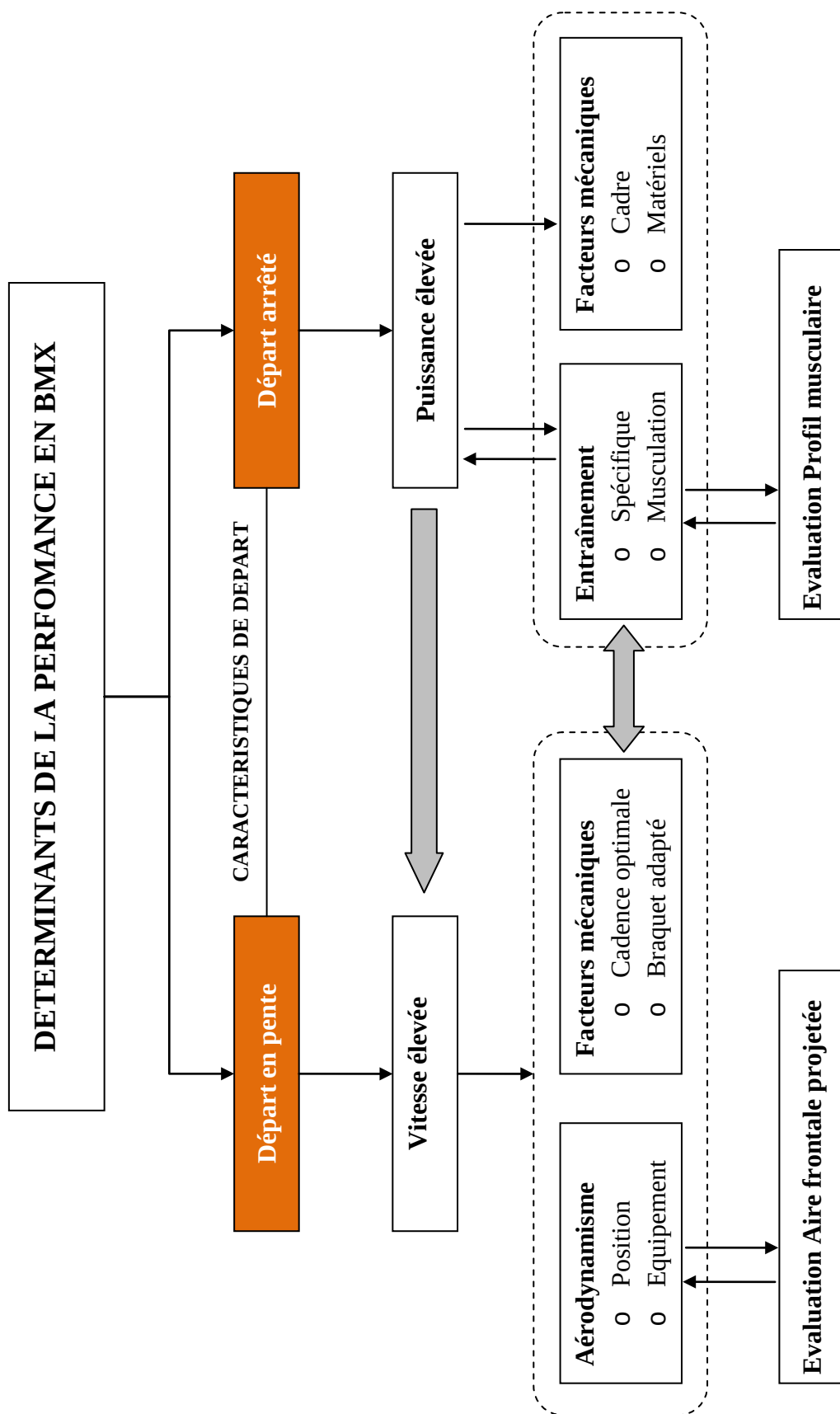


Figure I-1 – Présentation schématique des déterminants de la performance en BMX.

II. LE BMX, DISCIPLINE OLYMPIQUE

Le Bicycle Motocross (BMX) est devenue discipline olympique en 2003, et il a été introduit aux Jeux Olympique de 2008 à Pékin, Chine [[UCI, 2008](#)]. Deux françaises se sont d'ailleurs imposées sur les deux premières places du podium, Anne-Caroline Chausson pour l'or et Laëtitia Le Corguillé pour l'argent. Le suivi scientifique de l'équipe de France par l'équipe du laboratoire d'analyses des contraintes mécaniques (LACM-DTI) dont je fais partie menée par William Bertucci a permis d'optimiser la préparation physique de ces athlètes [[Bertucci et al., 2007](#)]. Et ce suivi perdure en vue des Jeux Olympiques de 2012 à Londres [[Service expertise et optimisation de la performance, FFC](#)].

1. DESCRIPTION DE L'ACTIVITE

Les compétitions 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-1](#)).

Les compétitions de BMX sont organisées en manche. Les cyclistes doivent enchaîner jusqu'à huit manches par jour avec seulement 15 minutes de récupération entre les manches. Lors d'une manche, huit pilotes sont positionnés sur la ligne de départ. Une grille de départ s'abaisse hydrauliquement après un signal à la fois visuel (*i.e.*, feu de couleur) et auditif (*i.e.*, message vocal pré-enregistré). Une fois, la grille baissée, les pilotes s'élancent alors pour un tour de piste qui durera entre 30 et 40 secondes. Les quatre

premiers accèderont au tour suivant. Le classement des pilotes à la fin de la première ligne droite apparaît décisif pour le classement de la course puisqu'une fois le premier obstacle franchi, il est très difficile de dépasser un adversaire [Bertucci et al., 2007].



Figure II-1 – Piste de BMX des Jeux Olympiques de Pékin 2008

La taille de la bicyclette utilisée en BMX contraint les pilotes à pédaler en position debout sur les pédales. Il a été montré par Caldwell et al. [1998 ; 1999] et Li et Caldwell [1998] que la position debout menait à des patterns d'application de la force sur la pédale différents. Et de plus, ces auteurs ont montré que la force et la puissance maximales appliquées sur la pédale étaient supérieures en position debout comparé à la position assis.

2. LE DEPART : PHASE DECISIVE

Le départ s'effectue sur une butte de départ (Figure II-1). Ce plan incliné doit avoir une élévation minimale de 1,5 mètre supérieure à la ligne droite initiale. Et sa pente doit être longue d'au minimum 12 mètres. Par exemple, la rampe de départ de la piste des J.O. de Pékin était longue d'environ 16 mètres pour un dénivelé d'environ 8 mètres et une

inclinaison moyenne d'environ 25° (Figure II-2). Ce plan incliné de départ est suivie d'une portion plate de ligne droite d'environ 8 – 10 m avant un premier obstacle (*i.e.*, bosse).



Figure II-2 – Rampe de départ de la piste de BMX des Jeux Olympiques de Pékin 2008.

Lors des courses de BMX, le départ s'effectue arrêté. Les pilotes ont les pieds placés sur les pédales, et la roue avant de la bicyclette est appuyée contre la grille de départ. Pour obtenir une des premières places avant le premier obstacle, le pilote doit être capable de produire un niveau élevé de puissance mécanique dès l'abaissement de la grille, de manière à vaincre son inertie et à s'élancer le plus rapidement possible [Bertucci et al., 2007].

En 2007, des pilotes de BMX ont effectué des entraînements sur une piste de BMX similaire à celle de Pékin, les données issues de ces tests ont été enregistrées à l'aide d'un PowerTap placé sur la roue arrière de la bicyclette de BMX (Modèle Professional, CycleOps, Etats-Unis). La fréquence d'échantillonnage de ce système est de 1,2 Hz. Ce système de mesure est valide et reproductible pour mesurer la puissance mécanique produite [Gardner et al., 2004 ; Bertucci et al., 2005b].

La vitesse de déplacement d'un pilote et la puissance mécanique produite sont présentées en Figure II-3 [Service expertise et optimisation de la performance, FFC]. La vitesse maximale atteinte par ce pilote est égale à environ 15 ms^{-1} , soit $\sim 54 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Son accélération est importante, puisqu'il passe d'une vitesse de 0 à $14,8 \text{ ms}^{-1}$ en seulement 2,5

secondes environ. La [Figure II-3](#) montre un exemple de la production de puissance maximale en fonction du temps lors d'un départ de type compétition, la puissance mécanique maximale atteinte par ce pilote est égale à environ 1063 W.

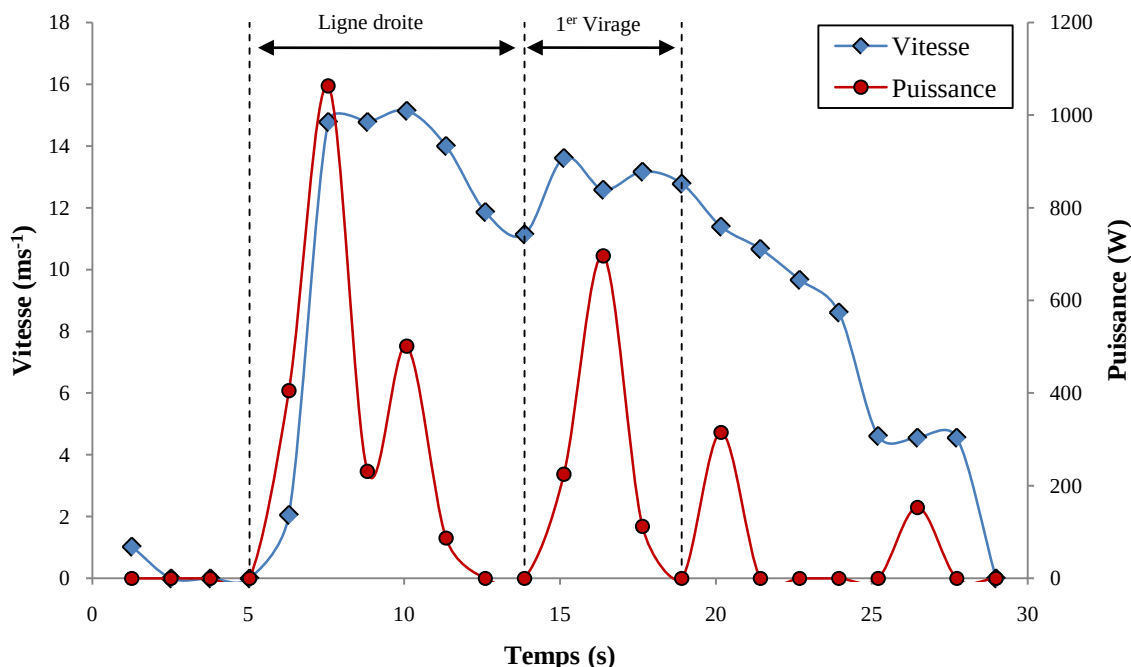


Figure II-3 – Mesures de vitesse de déplacement et de puissance mécanique produite à l'aide d'un PowerTap lors d'un départ d'entraînement sur la piste de BMX des J.O. de Pékin [[Service expertise et optimisation de la performance, FFC](#)].

Pour certains pilotes, les vitesses maximales atteintes lors de ces tests étaient plus importantes. Des temps de passages sur la première ligne droite ont été enregistrés à l'aide de cellules photoélectriques (Racetime 2, Microgate, Italie) ([Figure II-4](#)). Cinq cellules photoélectriques ont été placées à espaces réguliers sur la butte de départ et jusqu'au premier obstacle. La pente très importante de cette butte de départ ($\sim 53\%$) a permis aux pilotes d'atteindre des vitesses maximales en moyenne supérieures à 70 kmh^{-1} juste avant le dernier obstacle avec un pic de vitesse de 72 kmh^{-1} environ sur les 25 premiers mètres pour un pilote masculin, illustré en [Figure II-4](#).

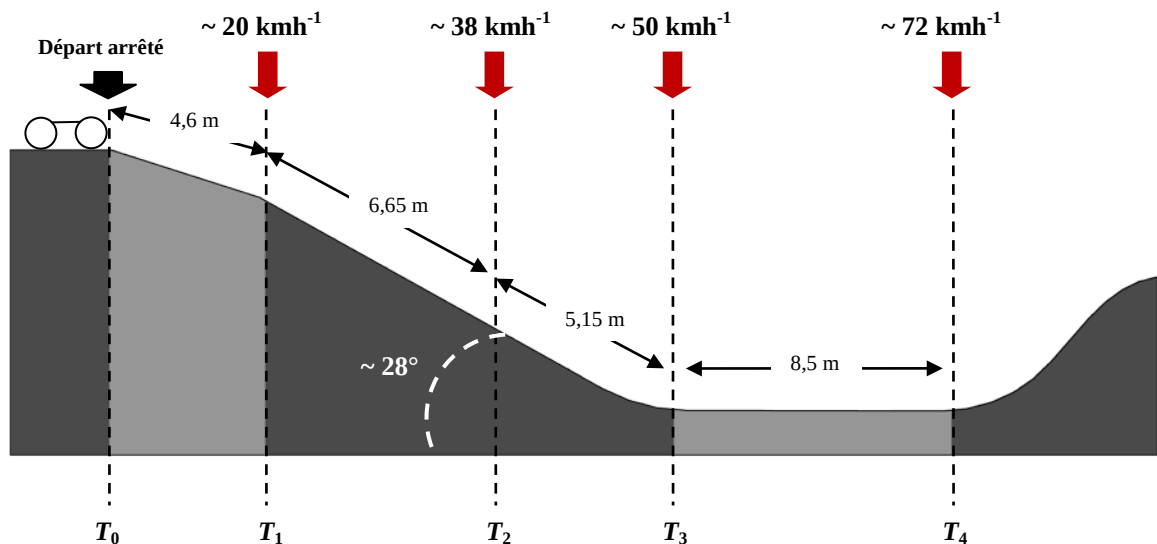


Figure II-4 – Exemples de vitesses maximales atteintes par un pilote de BMX masculin de haut niveau lors de départs d'entraînement effectués sur une butte de départ identique à celle des Jeux Olympiques de 2008 [Service expertise et optimisation de la performance, FFC].

La Figure II-5 illustre les performances chronométriques entre T_0 et T_1 , à 4,6 m du départ chez deux pilotes de BMX, une femme et un homme dont les masses corporelles étaient respectivement 60 et 90 kg. Les puissances maximales produites dès les premiers mètres sont très élevées et dépassent 1150 W. L'accélération est très forte, et les vitesses atteintes sont très importantes dès les premiers coups de pédales.

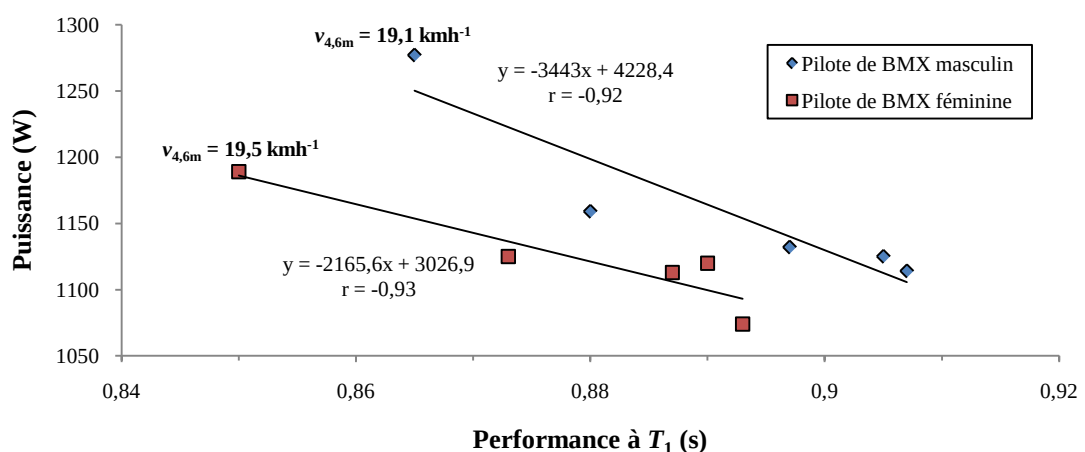


Figure II-5 – Exemples de production de puissance maximale chez deux pilotes (1 femme et 1 homme) en fonction du temps sur les 5 premiers mètres lors de départs d'entraînement effectués sur une butte de départ identique à celle des Jeux Olympiques de 2008 [Service expertise et optimisation de la performance, FFC].

Bertucci et al. [2007] ont montré que la puissance maximale était un facteur déterminant de la performance en BMX, et qu'elle était fortement corrélée avec les performances chronométriques sur les 5 premiers mètres de la course, et sur les 30 premiers mètres (*i.e.*, avant le premier obstacle). Il semble alors important de développer la production de puissance musculaire maximale des membres inférieurs chez les pilotes de BMX pour améliorer les performances lors du départ.

De part la configuration de la piste, les pilotes de BMX ne peuvent pas pédaler en continue. Le départ, avant et en sortie de virage sont les seules phases où les pilotes peuvent conserver une vitesse de course élevée. La durée totale d'une course ne dépassant pas 45s, et la phase de départ étant primordiale, il est important pour les pilotes d'atteindre une vitesse élevée au départ, et de conserver cette vitesse lors du franchissement des obstacles grâce à leur technique. De plus, comme pour le cyclisme sur piste, la bicyclette de BMX ne possède pas de dérailleur [Dorel et al., 2005], ce qui signifie que le développement est unique et qu'il doit être déterminé avant la course. Or, selon la relation « Force – Vitesse » de Hill [1938], plus la vitesse de raccourcissement d'un muscle est grande et moins la force développée est élevée.

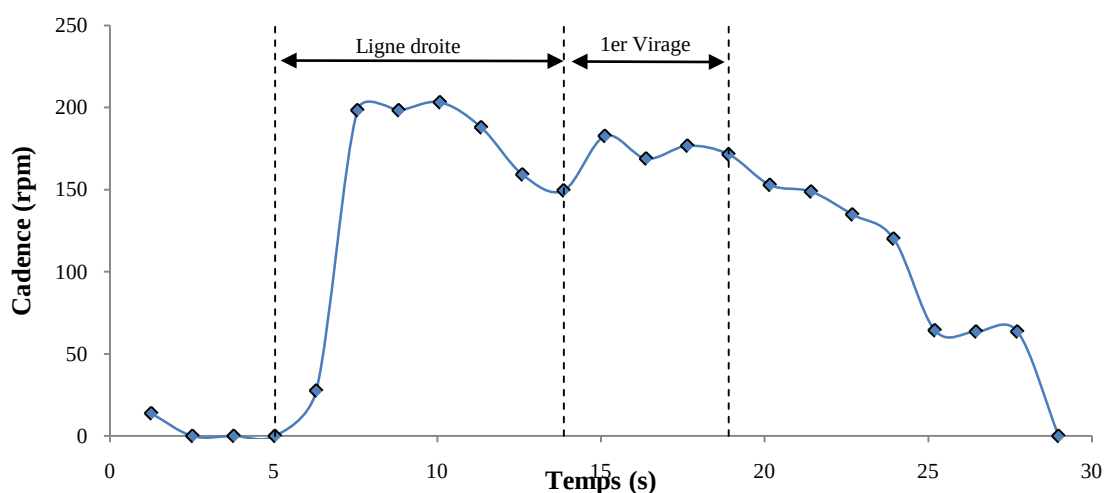


Figure II-6 – Mesure de la cadence de pédalage à l'aide d'un PowerTap lors d'un départ d'entraînement sur la piste de BMX des J.O. de Pékin [Service expertise et optimisation de la performance, FFC].

La [Figure II-6](#) présente les données de cadence de pédalage enregistrée en fonction du temps à l'aide d'un PowerTap. Le pilote développe une force importante au départ lorsque la cadence de pédalage est très faible.

A vitesse maximale ($> 70 \text{ kmh}^{-1}$), la cadence de pédalage est égale voire supérieure à environ 200 rotation par minute (rpm). A cet instant de la course, le pilote se situe avant le premier obstacle, sa cadence de pédalage est supérieure à la cadence optimale et les forces qu'ils développent sur les pédales ne pourraient pas produire une puissance mécanique plus grande. La position debout et l'équipement vestimentaire (*i.e.*, casque de motocross ouvert avec visière, vêtements larges) des pilotes offrent une résistance à l'air importante, et les résistances aérodynamiques sont très fortes à cette vitesse [[di Prampero et al., 1979](#)]. Une amélioration de sa position (*e.g.*, position plus regroupée, coudes près du corps) permettrait de minimiser les pertes de vitesse liées à la résistance aérodynamique. Et en considérant le fait que les pilotes pédalent environ 10 s sur une course qui dure entre 30 et 45 s, la minimisation des résistances opposées à l'avancement (*i.e.*, résistances aérodynamiques et de roulement) permettraient d'optimiser la performance en BMX.

A partir de ce constat, il semble d'étudier la production de puissance musculaire des membres inférieurs des pilotes de BMX lors d'exercices à intensité maximale et d'analyser également une variable de l'aérodynamisme des pilotes lors des phases où le pédalage ne transmet plus de forces motrices optimales.

RESUME – LE BMX, DISCIPLINE OLYMPIQUE

- ❑ Le BMX se déroule sur une piste spécifique parsemée d'obstacles et de virages, et le départ s'effectue sur un plan incliné. Une course dure en 30 et 40 s. Le classement avant le premier obstacle détermine, sauf accident, le classement final.
- ❑ Les qualités physiques de force et de vitesse sont essentielles dans cette discipline. Et la puissance maximale produite apparaît être un facteur déterminant de la performance sur la première ligne droite.
- ❑ Les bicyclettes de BMX ne sont pas équipées de dérailleur. Le développement doit être déterminé avant la course. Il est important que les athlètes puissent développer une grande force et une grande puissance, pour optimiser leur départ.
- ❑ Compte tenue des vitesses atteintes ($> 60 \text{ kmh}^{-1}$), la tenue vestimentaire et les positions adoptées lors des phases de non-pédalage doivent être étudiées d'un point de vue aérodynamique.

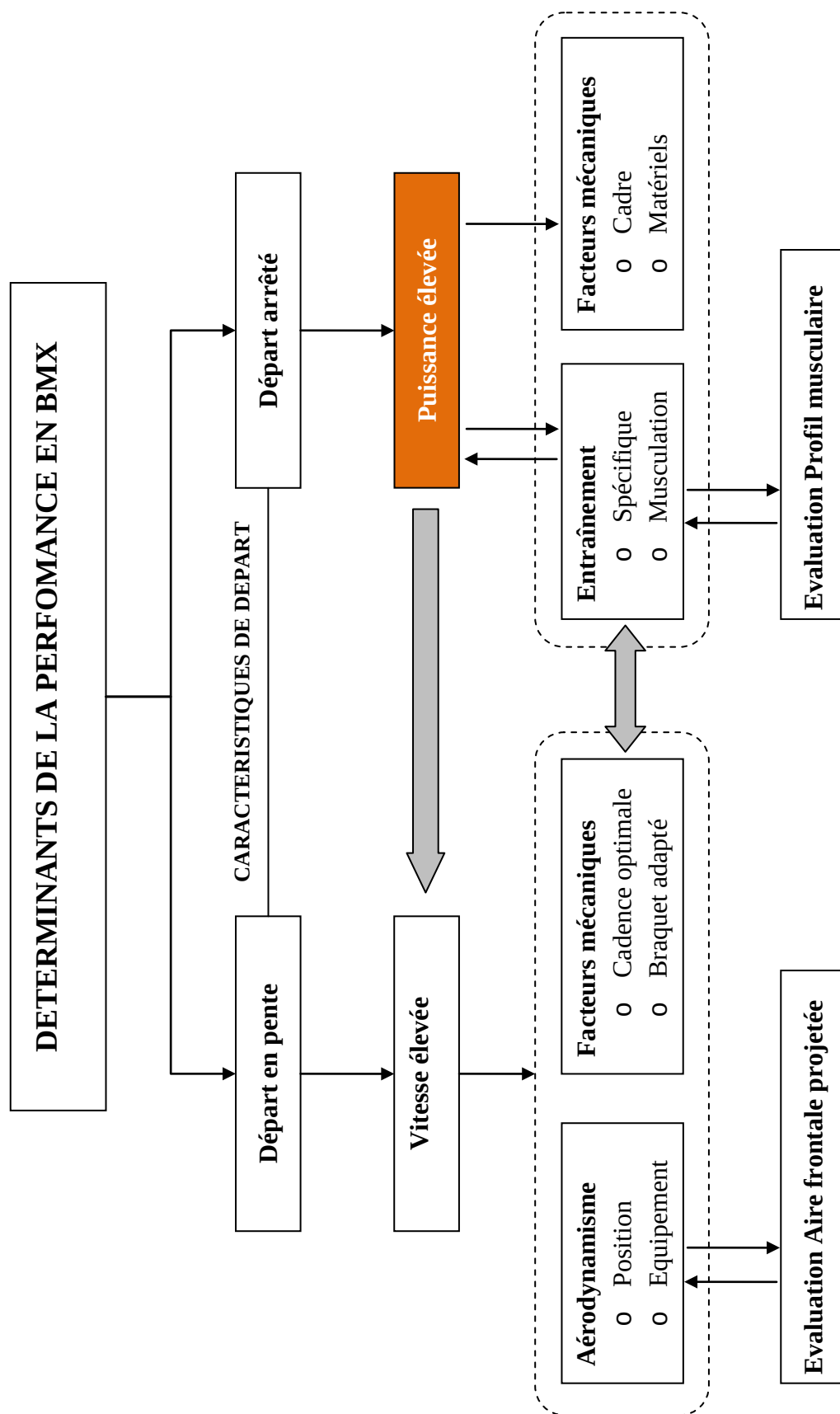


Figure II-7 – Présentation schématique des déterminants de la performance en BMX.

III. PUISSANCE MUSCULAIRE

[Bertucci et al. \[2007\]](#) ont montré que la production maximale de puissance musculaire des membres inférieurs est un paramètre déterminant de la performance lors d'un départ de compétition en BMX. Tout d'abord, il semble nécessaire de définir la puissance musculaire, d'étudier les différentes méthodologies d'évaluation avec leurs avantages et leurs limites et les paramètres qui influencent la production de puissance musculaire. Puis, une étude comparative entre un profil inertiel dynamométrique sur un mouvement d'extension des membres inférieurs et des tests de sprints sur cyclo-wattmètre permettra d'identifier les déterminants de la performance en pédalage qui peuvent être améliorés grâce à une préparation physique spécifique avec un mouvement de musculation.

1. REVUE DE LITTÉRATURE

La puissance musculaire maximale (P_{MAX} , W) représente pour un athlète, la faculté de produire une force donnée à une vitesse élevée. Chaque mouvement, à l'exception des postures immobiles issues d'une contraction musculaire isométrique, implique une production de puissance musculaire [[Knudson, 2009](#)], et elle est un paramètre déterminant de la performance dans de nombreuses disciplines (*e.g.*, cyclisme, haltérophilies, force athlétique, etc.) [[Newton et Kraemer, 1994](#) ; [Zink et al., 2006](#)].

1.1. DEFINITION DE LA NOTION DE PUISSANCE

La définition mécanique de la puissance (P , W) est la quantité de travail mécanique d'une force (W , J) par unité de temps (t , s) [[Sapega et Drillings, 1983](#) ; [Knudson, 2009](#)] :

$$P = \frac{W}{t} \quad (1)$$

Or le travail mécanique d'une force est égal au produit de la force (F , N) et de la distance sur laquelle cette force est appliquée (d , m) :

$$W = Fd \quad (2)$$

Donc

$$\frac{W}{t} = \frac{Fd}{t} \quad (3)$$

La puissance produite peut alors être exprimée comme le produit de la force et de la vitesse (v , ms^{-1}) [[Newton et Kraemer, 1994](#) ; [Cronin et Sleivert, 2005](#)] :

$$P = Fv \quad (4)$$

Pour un muscle, la puissance générée est le produit de la force produite par ce muscle et de sa vitesse de contraction. Et lors d'un mouvement poly-articulaire, la puissance externe totale est le produit de la force externe développée et de la vitesse du mouvement.

1.2. EVALUATION DE LA PUISSANCE DES MEMBRES INFÉRIEURS EN MUSCULATION

Dans le cadre de l'évaluation de la production de puissance musculaire des membres inférieurs lors d'exercices de type Squat avec ou sans saut, il existe 5 méthodes principales différentes qui consiste à : **i)** mesurer le déplacement ; **ii)** mesurer les forces verticales de réaction au sol ; **iii)** mesurer les forces verticales de réaction au sol et le déplacement ; **iv)** mesurer l'accélération ; et **v)** estimer à l'aide d'équations [[Harman et al., 1991](#) ; [Johnson et Bahamonde, 1996](#) ; [Dugan et al 2004](#) ; [Li et al., 2008](#) ; [Samozino et al., 2008](#)].

1.2.1. METHODES DE CALCUL DE LA PUISSANCE MUSCULAIRE

Le [Tableau III-1](#) présente les différentes méthodes utilisées dans la littérature pour calculer la puissance musculaire produite par les membres inférieurs lors de mouvements de type Squat et ses variantes.

Tableau III-1 – Comparaison de la littérature et des différentes méthodes utilisées pour calculer la production de puissance musculaire.

Etudes		Méthodes d'acquisition	Mouvements
Harris et al.	[2007]	Déplacement	SJ Machine
Harris et al.	[2008]	Déplacement	SJ Machine
Sleivert et Taingahue	[2004]	Accélérométrie	SJ
Stone et al.	[2003]	Déplacement	SJ
			CMJ
Cormie et al.	[2008]	Force + Déplacement	CMJ
Cormie et al.	[2007d]	Force + Déplacement	CMJ
Patterson et al.	[2009]	Force + Déplacement	CMJ
Baker et al.	[2001]	Déplacement	CMJ
Sheppard et al.	[2008]	Force + Déplacement	CMJ
Bevan et al.	[2010]	Déplacement	CMJ
Dayne et al.	[2010]	Force + Déplacement	CMJ
Cormie et al.	[2007b ; 2007e]	Force + Déplacement	CMJ
			Squat
			Power Clean
Zink et al.	[2006]	Force + Déplacement	Squat
Siegel et al.	[2002]	Déplacement	Squat
Izquierdo et al.	[1999]	Déplacement	½ Squat Con.
Izquierdo et al.	[2002]	Déplacement	½ Squat Con.

CMJ : Counter Movement Jump ; **SJ** : Squat Jump; **Con.** : Concentrique.

1.2.1.1. Mesure du déplacement

La force produite lors d'un mouvement de type Squat et ses variantes peut être dérivée de la cinématique de la barre et de la masse du système étudié. Pour mesurer le

déplacement du système étudié, différentes technologies sont utilisées dans la littérature : transducteur de position linéaire [e.g., McBride et al., 2002 ; Cronin et al., 2004 ; Cormie et al., 2007a], encodeur rotatif [e.g., Baker et al., 2001], ou encore des systèmes tel que le V-Scope (Lipman Electronic Engineering Ltd, Ramat Hahayal, Israel) qui utilise une technologie à ultrasons et infrarouge pour détecter le déplacement et la position dans l'espace d'un émetteur positionnée sur la masse déplacée [e.g., Stone et al., 2003].

Quelque soit la technologie utilisée, il est nécessaire de connaître le déplacement entre chaque période d'échantillonnage et la fréquence d'échantillonnage pour connaître le temps entre chaque période. A partir de ces informations, il est possible de déterminer la première dérivée du déplacement du système étudié qui est la vitesse de déplacement instantanée (v_i , ms^{-1}). La seconde dérivée du déplacement du système étudié est l'accélération instantanée (a_i , ms^{-2}). La force instantanée (F_i , N) et la puissance instantanée (P_i , W) produites par le système peuvent être calculées :

$$v_i = \frac{dx}{dt} \quad (5)$$

$$a_i = \frac{d^2x}{dt^2} \quad (6)$$

$$F_i = (m_c + m_{Ch})(a_i + g) \quad (7)$$

$$P_i = F_i v_i \quad (8)$$

Où x (m) est le déplacement du système, t représente le temps entre 2 échantillonnages de données, m_{Ch} (kg) est la charge déplacée et g est l'accélération gravitationnelle ($9,81 \text{ ms}^{-2}$).

Cette méthode ne fonctionne que sur des mesures réalisées sur des mouvements linéaires. Et la manipulation des données (dérivation du temps) peut amplifier les bruits enregistrés sur les données brutes [Dugan et al., 2004 ; Cormie et al., 2007a]. De plus, pour utiliser cette méthode, il convient de supposer que le corps du sujet et la charge déplacée sont considérées comme un système unique car la vitesse instantanée obtenue est celle de

la charge sur laquelle est attaché le transducteur linéaire, or ce n'est pas le cas pour les mouvements d'haltérophile par exemple.

1.2.1.2. Mesure des forces verticales de réaction au sol

Cette méthode nécessite une plateforme de force qui mesure le moment linéaire (ou impulsion) [e.g., [Rahmani et al., 1998](#) ; [McBride et al., 2002](#) ; [Samozino et al., 2008](#)]. Pour mesurer la puissance optimale, il est nécessaire de connaître le taux d'échantillonnage de la plateforme, la force verticale de réaction au sol (F , N) et que la vitesse initiale (v_{t0} , ms^{-1}) du système étudié soit nulle.

L'impulsion (I , N·s) représente l'intégrale de la force appliquée en fonction du temps. Elle est égale au produit de la force appliquée (F , N) par le temps d'application de cette force (Δt , s) :

$$I = \int_t^{t+1} F dt \quad (9)$$

$$I = F \Delta t \quad (10)$$

or

$$I = \Delta p \quad (11)$$

Où p est la quantité de mouvement.

$$\Delta p = m \Delta v \quad (12)$$

Pour chaque instant i avec $v_{t0} = 0$:

$$F_i t = m(v_{i+1} - v_i) \quad (13)$$

$$P_i = F_i v_i \quad (14)$$

Cette approche est valide seulement si les données sont collectées avec une vitesse initiale du système étudié égale à 0. La puissance est calculée uniquement sur l'axe vertical, les forces agissants sur les axes antéro-postérieur et médio-latéral étant négligées.

1.2.1.3. Mesure des forces verticales de réaction au sol et du déplacement

Le principe de cette méthode est d'utiliser une plateforme de force pour mesurer la force instantanée produite et un transducteur linéaire pour obtenir la vitesse instantanée de déplacement par dérivation du déplacement en fonction du temps [e.g., [Rahmani et al., 1998](#) ; [McBride et al., 1999](#) ; [Cormie et al., 2007a](#) ; [2007c](#)]. Il est ainsi possible d'obtenir la puissance musculaire instantanée produite. Néanmoins cette méthode suppose que le sujet et la charge déplacée soient considérés comme un système unique car la vitesse enregistrée est celle de la charge sur laquelle le transducteur linéaire est attaché. De plus, seul la vitesse linéaire verticale est obtenue. Ces points sont importants à observer lors de l'étude de mouvements de types haltérophilie (*i.e.*, Arraché et Epaulé-Jeté).

1.2.1.4. L'accélérométrie

Le calcul de la puissance produite lors d'un mouvement est basée sur le principe de la mesure de l'accélération du système étudié par un accéléromètre [e.g., Myotest[®]] en fonction du temps [e.g., [Thompson et Bembien, 1999](#) ; [Jidovtseff et al., 2006](#) ; [2008a](#) ; [Sheperd et al., 2010](#)]. La force instantanée produite lors du mouvement peut être calculée en multipliant la masse du système en mouvement par son accélération linéaire et l'accélération gravitationnelle. La vitesse de déplacement instantanée du système est obtenue par intégration de a_i en fonction du temps, et il est possible également d'obtenir le déplacement instantané en intégrant la vitesse en fonction du temps. La puissance produite instantanée est calculée en multipliant F_i et v_i [[Thompson et Bembien, 1999](#) ; [Dugan et al., 2004](#)] :

$$F_i = ma_i + mg \quad (15)$$

$$v_i = \int_t^{t+1} a dt \quad (16)$$

$$P_i = F_i v_i \quad (17)$$

Cette méthode permet de déterminer la puissance produite uniquement sur des mouvements linéaires. Et l'accéléromètre doit rester aligner avec le plan dans lequel le mouvement se réalise. Il est également nécessaire que le corps du sujet et la charge déplacée soit considérée comme un système unique.

1.2.2. METHODE DE CALCUL DE LA PUISSANCE MUSCULAIRE POUR LE SAUT VERTICAL

Les sauts verticaux, Squat Jump (SJ) et Countermovement Jump(CMJ), sont des mouvements qui maximisent la production de puissance [e.g., [Stone et al., 2003](#) ; [Cormie et al., 2008](#)], et ils sont encore à ce jour, des tests de terrain très largement utilisés dans différentes APS pour évaluer le niveau de puissance des sportifs. Pour cette raison, des méthodes de calcul ont été proposées pour obtenir les valeurs de puissances produites lors des sauts à partir de la hauteur de saut et de la masse corporelle sur le terrain, donc sans matériels coûteux.

La formule la plus utilisée était celle dite de Lewis [[Harman et al., 1991](#)]. Cette formule s'appliquait à l'aide d'un nomogramme. Elle consistait à mesurer la hauteur de saut (SJ h_{MAX} , m) en calculant la différence entre la hauteur que pouvait atteindre un sujet avec sa main au sommet de son saut et la hauteur qu'il pouvait atteindre debout le bras levé et la main tendue, avec g est l'accélération gravitationnelle ($9,81 \text{ ms}^{-2}$) et m_c est la masse corporelle du sujet (kg) :

$$P = g m_c \sqrt{\frac{g}{2}} \sqrt{SJ h_{MAX}} \quad (18)$$

Néanmoins, cette formule ne mesure que la puissance moyenne en Squat Jump, et il faut prendre en compte le mouvement de balancier des bras dans la conception de cette formule. [Harman et al. \[1991\]](#) ont voulu évaluer la validité de cette formule en exécutant

des sauts avec ce test et des sauts sur plateforme de force. Mais les tests ont été réalisés séparément et sur un petit échantillon ($n=17$). [Johnson et Bahamonde \[1996\]](#) ont repris cette étude, mais cette fois en étudiant le CMJ (néanmoins, il y avait toujours un balancement du bras) et sur un nombre plus important de sujets ($n=69$ hommes et $n=49$ femmes). Ces auteurs ont développé deux formules de régression expérimentales corrélées avec les valeurs obtenues grâce à la plateforme de force pour calculer P_{MAX} ($r = 0,95$) et P_{moy} ($r = 0,90$) selon SJ h_{MAX} , m_c et la taille des sujets (h_c , cm) :

$$P_{MAX} = 78,5 \text{ SJ } h_{MAX} + 60,6 m_c - 15,3 h_c - 1,308 \quad (19)$$

$$P_{moy} = 41,4 \text{ SJ } h_{MAX} + 31,2 m_c - 13,9 h_c + 431 \quad (20)$$

Les limitation de telles équations sont le manque de justifications théoriques expliquant les liens entre la puissance et les paramètres SJ h_{MAX} , m_c et h_c , la dépendance liée à l'échantillon utilisée pour créer cette régression [[Samozino et al., 2008](#)].

[Samozino et al. \[2008\]](#) ont proposé une méthode de terrain pour calculer la puissance musculaire moyenne lors d'un SJ basée sur les lois fondamentales de la dynamique. Ils ont testé la reproductibilité et la validité en comparaison avec la méthode de mesures des forces de réaction au sol. Les équations proposées sont basées sur m_c , SJ h_{MAX} (i.e., la hauteur entre le point le plus haut atteint par le centre de masse du corps et la hauteur du centre de masse au moment du décollage), la hauteur sur laquelle la poussée avant le décollage s'effectue (h_{PO} , m). Ainsi la force moyenne produite (F_{moy} , N), la vitesse moyenne (v_{moy} , ms^{-1}), SJ h_{MAX} et la puissance moyenne (P_{moy} , W) sont obtenues à l'aide des équations suivantes (où t_s est le temps de suspension en l'air en s) :

$$\text{SJ } h_{MAX} = \frac{1}{8} g t_s^2 \quad (21)$$

$$F_{moy} = mg \left(\frac{h}{h_{PO}} + 1 \right) \quad (22)$$

$$v_{\text{moy}} = \sqrt{\frac{gh}{2}} \quad (23)$$

$$P_{\text{moy}} = mg \left(\frac{h}{h_{\text{PO}}} + 1 \right) \sqrt{\frac{gh}{2}} \quad (24)$$

L'avantage principal de ces équations sur les précédentes, en plus du fait d'être simple, rapide et standardisée, est que la distance sur laquelle le sujet exerce une force de la position de départ jusqu'au décollage des pieds est prise en compte. En effet, deux athlètes possédant la même masse corporelle, et atteignant la même hauteur de saut mais commençant leur saut d'une hauteur différente ne développeront pas forcément la même puissance car l'athlète partant d'une position de départ plus basse sera le moins puissant.

1.3. PARAMETRES INFLUENÇANT LA PUISSANCE MAXIMALE

Puisque la puissance musculaire est un travail résultant de l'action d'un ou de plusieurs muscles, sa production est fortement liée aux propriétés contractiles du muscle, ainsi qu'à sa structure.

1.3.1. LA RELATION FORCE – VITESSE MUSCULAIRE

La relation de Force – Vitesse du muscle ([Figure III-1](#)) indique que l'augmentation de la vitesse de raccourcissement entraîne une diminution de la production de force, et réciproquement [[Hill, 1938](#)]. La puissance mécanique étant le produit de la force et de la vitesse, le résultat direct de cette relation est que lorsque le muscle est activé maximalement contre des charges données, il existe une charge optimale qui permet la plus grande production de puissance mécanique [*e.g.*, [Dugan et al., 2004](#)].

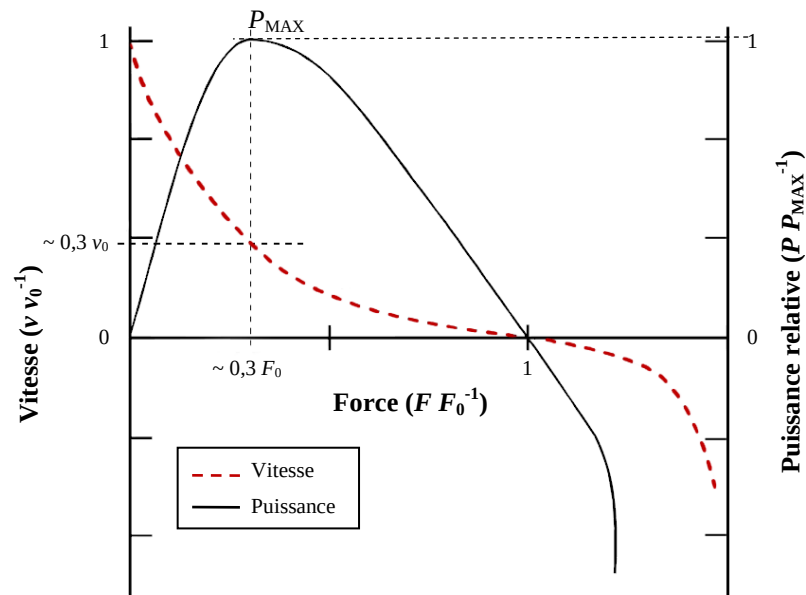


Figure III-1 – Relations Force – Vitesse et Force – Puissance pour le muscle squelettique. $F F_0^{-1}$: Force normalisée par rapport à la force isométrique maximale. $v v_0^{-1}$: Vitesse de raccourcissement normalisée par rapport à la vitesse maximale. P_{MAX} : Puissance maximale [D’après [Newton, 1997](#)].

Comme illustré en [Figure III-1](#), pour un muscle isolé, la puissance mécanique maximale (P_{max} , W) est produite contre une résistance correspondant à environ 30% de la force isométrique maximale (F_0 , N), ce qui correspond à une vitesse de raccourcissement du muscle d’approximativement 30% de la vitesse maximale (v_0 , ms⁻¹) [[Hill 1938](#) ; [Newton 1997](#) ; [Zatsiorsky and Kraemer 2006](#)].

Néanmoins, plusieurs recherches ont démontré par leurs résultats qu’il n’existait pas de consensus sur un pourcentage de la force isométrique maximale défini qui permettrait de produire une puissance maximale. [Cronin et Sleivert \[2005\]](#), en citant le travail de [Faulkner et al. \[1986\]](#), ont mis en évidence que même s’il est reporté un pic de puissance à approximativement un tiers de la vitesse de raccourcissement maximale, il n’est pas précisé s’il existe une différence significative entre les puissances produites aux différentes forces testées (15 – 50 % de F_0). Les résultats des recherches d’[Edgerton et al. \[1986\]](#) rapportés par [Cronin et Sleivert \[2005\]](#), ont montré que différents muscles isolés produisaient une puissance maximale à différents pourcentages de leur force isométrique

maximale respective. Cette différence serait à attribuer à la différence des longueurs de fibres de chacun des muscles, puisque le nombre de sarcomères arrangés en série influence la vitesse de raccourcissement des fibres musculaires, et que cette vitesse influe sur la production de puissance maximale.

Il semble alors plus important et plus utile, d'étudier la production de puissance musculaire à travers différentes charges pour des exercices mono- ou poly-articulaires, comparables aux activités physiques et sportives étudiées. Ce type d'étude permet ainsi de déterminer la charge optimale qui sollicite la production de puissance maximale pour un exercice donné. Cette charge optimale permettrait, par exemple, de déterminer les charges utilisées au cours de l'entraînement pour améliorer la production de puissance maximale, et de déterminer un développement optimal en cyclisme quand celui-ci est unique (*e.g.*, BMX, cyclisme sur piste).

1.3.2. LA RELATION CHARGE – PUISSANCE POUR LES MEMBRES INFÉRIEURS

Pour déterminer la puissance maximale produite lors d'un mouvement, il est important de s'intéresser à la relation « Charge – Puissance ». Pour un exercice donné, la charge maximale dynamique ($1RM^\dagger$) est évaluée, puis l'exercice est réalisé à différentes charges relatives (Ch_{rel} , % 1RM) à ce 1RM. La relation « Charge – Puissance » est de nature polynomiale du second degré, c'est-à-dire que sa courbe représentative décrit une parabole (Figure III-2) [Rahmani et al., 2001]. La charge relative qui permet la plus grande production de puissance est dite charge optimale (Ch_{opt} , % 1RM).

[†] Le 1RM représente la charge avec laquelle il n'est possible de déplacer un exercice qu'une seule et unique fois sur l'amplitude totale du mouvement [Kraemer et al., 2007].

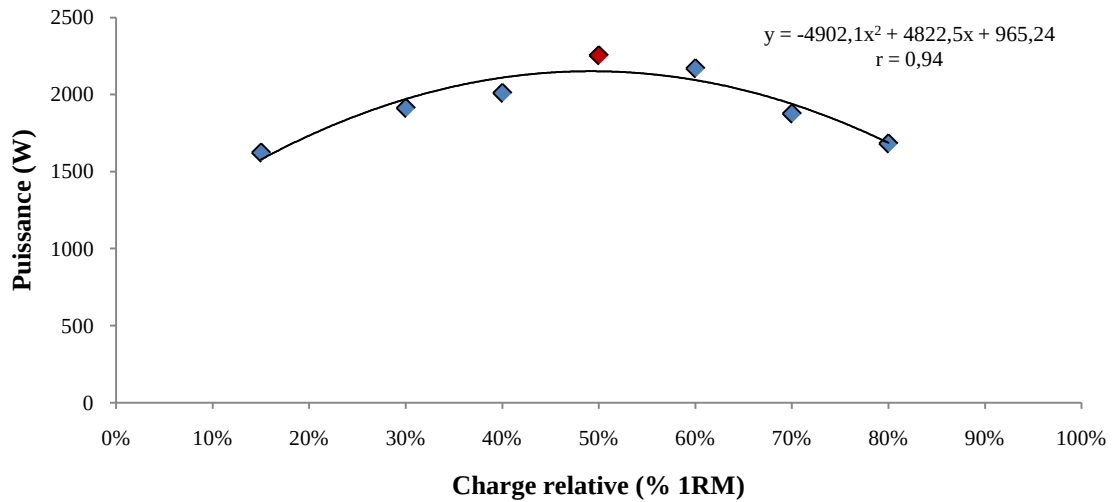


Figure III-2 – Exemple de relation « Charge – Puissance » lors d'un mouvement de Squat contre différentes charges relatives au 1RM. La charge optimale est égale à 50 % du 1RM pour cet athlète de force de niveau international [Données personnelles].

Le [Tableau III-2](#) présente les Ch_{Opt} issues de la littérature sur l'étude de la production de puissance des membres inférieurs lors d'exercices de type Squat avec et sans saut.

Tableau III-2 – Charges qui maximisent la production de puissance moyenne ou maximale pour les membres inférieurs lors d'un mouvement d'extension.

Études	Sujets	APS	Mouvements	Charges utilisées	Ch_{opt} (% 1RM)	P_{MAX} (W)
Harris et al. [2007]	18 H	Rugby	SJ machine	0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 et 100 % 1RM	21,6 ± 7,1 P_{moy} : 10 – 35	4110 ± 570 1620 ± 200
Harris et al. [2008]	18 H	Rugby	SJ Machine	20, 30, 40, 50, 60, 70 et 80 % 1RM	20 – 43,5	–
Sleivert et Taingahue [2004]	30 H	Rugby / Basketball	SJ	30, 40, 50, 60 et 70 % 1RM	50 – 70 P_{moy} : 30 – 60	17,6 ± 2,9 Wkg ⁻¹ 7,1 ± 1,3 Wkg ⁻¹
Stone et al. [2003]	22 H	Divers	SJ CMJ	10,20, 30, 40, 50, 60, 70, 80,90 et 100 % 1RM	10	5113 ± 1482 5200 ± 1302
Cormie et al. [2008]	18 H	Divers	CMJ	0, 18 ± 4, 37 ± 8, 55 ± 12 et 74 ± 15 % 1RM	0	4616 ± 1041
Cormie et al. [2007d]	26 H	Divers	CMJ	0, 20, 40, 60 et 80 kg	0	~ 55-70 Wkg ^{-1a}
Patterson et al. [2009]	20 H 17 F	Ski Alpin	CMJ	0, 25, 50, 75 et 100 % m_c	P_{moy} H : 25 % m_c P_{moy} F : 0	~ 26 Wkg ^{-1a} ~ 22 Wkg ^{-1a}
Baker et al. [2001]	32 H	Rugby	CMJ	24, 36, 48 et 60 % 1RM	P_{moy} : 58,8 ± 11	1851 ± 210
Sheppard et al. [2008]	14 H	Volleyball	CMJ	0, m_c + 25 % m_c , m_c + 50 % m_c	0	5906 ± 803

^a Données extrapolées à partir d'un graphique

^b Données normalisées

APS : Activités Physiques et Sportives ; **Ch_{opt}** : Charge optimale ; **P_{MAX}** : Puissance maximale ; **H** : Homme ; **F** : Femme ; **1RM** : 1 répétition maximale ; **CMJ** : Counter Movement Jump ; **SJ** : Squat Jump ; **Con.** : Concentrique ; **P_{moy}** : Puissance maximale moyenne.

Tabelau III-2 – Charges qui maximisent la production de puissance moyenne ou maximale pour les membres inférieurs lors d'un mouvement d'extension.

Etudes	Sujets	APS	Mouvements	Charges utilisées	Ch _{Opt} (% 1RM)	P _{MAX} (W)
Bevan et al. [2010]	47 H	Rugby	CMJ	0, 20, 30, 40, 50 et 60 % 1RM	0	4751 ± 529
Dayne et al. [2010]	11 H	Lycéens	CMJ	0, 20, 40, 60 et 80 % 1RM	0	5162 ± 758
Cormie et al. [2007b ; 2007e]	12 H	Football Américain	CMJ	0, 12, 27, 42, 56, 71, et 85 % 1RM	0	6437 ± 1046
			½ Squat	0, 12, 27, 42, 56, 71, et 85 % 1RM	56	3235 ± 453
			Power Clean (PC)	30, 40, 50, 60, 70, 80 et 90 % 1RM PC	80	4787 ± 836
Zink et al. [2006]	12 H	Divers	½ Squat (Parallèle)	20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 et 90 % 1RM	40 – 50	0,92 ± 0,11 – 0,91 ± 0,07 ^b
Siegel et al. [2002]	25 H	Divers	½ Squat (Parallèle)	30, 40, 50, 60, 70, 80 et 90 % 1RM	50 – 70	~ 1000 ^a
Izquierdo et al. [1999]	26 H	~ 40 ans	½ Squat Con.	0, 15, 30, 45, 60 et 70 % 1RM	P _{moy} : 60	486 ± 20
	21 H	~ 65 ans			P _{moy} : 70	391 ± 28
Izquierdo et al. [2002]	70 H	11 Haltérophiles	½ Squat Con.	0, 30, 45, 60 et 70 % 1RM	P _{moy} : 45	937 ± 153
		19 Handballeurs			P _{moy} : 60	752 ± 195
		18 Cyclistes			P _{moy} : 45	498 ± 110
		10 Coureurs			P _{moy} : 60	473 ± 60
		12 Groupe Contrôle			P _{moy} : 60	453 ± 100

^a Données extrapolées à partir d'un graphique

^b Données normalisées

APS : Activités Physiques et Sportives ; Ch_{Opt} : Charge optimale ; P_{MAX} : Puissance maximale ; H : Homme ; F : Femme ; 1RM : 1 répétition maximale ; CMJ : Counter Movement Jump ; SJ : Squat Jump ; Con. : Concentrique ; P_{moy} : Puissance maximale moyenne..

Ces études répertorient un grand nombre d'exercices qui sont, pour la plupart des variantes du Squat. Le Squat s'effectue debout, les mains posées sur les hanches ou maintenant une barre chargée sur le haut du dos au niveau des épaules. Il consiste à exécuter une flexion des membres inférieurs puis à revenir à la position initiale. Quelques études utilisent le ½ Squat où la position basse est généralement atteinte lorsque l'angle cuisse – jambe est égal à environ 90° [e.g., [Cormie et al., 2007b](#)], ou lorsque le point le plus bas est atteint quand les cuisses sont parallèles au sol [e.g., [Siegel et al., 2002](#) ; [Zink et al., 2006](#)]. Le Squat Jump (SJ) est un ½ Squat avec un saut vertical effectué à la fin de la phase concentrique [e.g., [Stone et al., 2003](#) ; [Sleivert et Taingahue, 2004](#)]. Le CounterMovement Jump (CMJ) est un saut vertical effectué à partir d'une position de départ debout, un contre mouvement vers le bas préparatoire est effectué avant de sauter. Le SJ Machine [[Harris et al., 2007](#) ; [2008](#)] est un squat jump réalisé sur une machine ([Figure III-3A](#)). Enfin, le Power Clean (PC) [e.g., [Cormie et al., 2007b](#) ; [2007e](#)] est un mouvement basé sur l'épaulé en haltérophilie ([Figure III-3B](#)).



Figure III-3 – Illustration du Squat Jump réalisé sur une machine spécifique (A) d'après [Harris et al. \[2008\]](#), et illustration du Power Clean (B) d'après [Duba et al. \[2009\]](#).

1.3.2.1. Influence du type d'exercice sur la relation Charge – Puissance

Les études citées dans le [Tableau III-2](#) rapportent une grande variété d'exercices, ainsi qu'une variation importante de la valeur de Ch_{Opt} (0 – 80 % 1RM). Les études qui

rapportent une Ch_{Opt} très faible (*i.e.*, 0 – 25 % de 1RM) [*e.g.*, [Stone et al., 2003](#) ; [Cormie et al., 2008](#) ; [Sheppard et al., 2008](#) ; [Bevan et al., 2010](#)] sont celles qui utilisent dans leur protocole des variantes du Squat avec saut (*i.e.*, SJ et CMJ). De plus, ces études rapportent des valeurs de puissance maximale plus importantes comparées aux études utilisant des variantes de Squat sans sauts [*e.g.*, [Cormie et al., 2007b](#) ; [2007e](#) ; [Siegel et al., 2002](#)].

Premièrement, cela peut s'expliquer par la nature balistique du mouvement de saut [[Newton et Kraemer, 1994](#) ; [Cronin et al., 2005](#)], celui-ci est accéléré sur toute la phase concentrique jusqu'au décollage des pieds du sol. Lorsque le squat n'est pas suivi d'un saut, donc d'une projection verticale vers le haut du corps et de la charge, l'accélération est plus courte, et une phase de décélération est plus longue puisque le sujet doit ralentir plus tôt dans le mouvement [[Newton et al., 1996](#)]. Selon [Cronin et al. \[2001\]](#), cette plus grande décélération dans les mouvements sans saut pourrait être due à une plus courte activation des muscles agonistes et à une plus grande co-activation des muscles antagonistes, particulièrement lorsque des faibles charges sont utilisées.

Deuxièmement, des adaptations neuro-musculaires liées à l'entraînement (*e.g.*, 1RM plus élevé ou vitesse de contraction plus élevée) des sujets peuvent influencer P_{MAX} [[Cronin et al., 2005](#)]. Il est d'ailleurs possible d'observer une P_{MAX} plus importante lors d'un CMJ que lors d'un SJ, chez des sujets effectuant les deux types de saut [[Stone et al., 2003](#)]. Cette différence est en partie due à la composante élastique série du muscle qui intervient lors d'un cycle étirement-détente [[Newton et Kraemer, 1994](#) ; [Goubel et Lensel-Corbeil, 2003](#)]. Lors du contre mouvement préparatoire, les muscles subissent un étirement forcé qui va entraîner une production de force supérieure à la force isométrique maximale du muscle. Cette énergie potentielle supplémentaire est stockée dans la composante élastique série du muscle, et elle peut être restituée et participer à la phase concentrique du mouvement si celle-ci intervient immédiatement après [[Goubel et Lensel-Corbeil, 2003](#)].

Les études dont le protocole est basé sur des variantes du squat sans saut (*i.e.*, Squat, ½ Squat Concentrique) présentent des Ch_{Opt} entre 40 et 70 % de 1RM [Izquierdo et al., 1999 ; 2002 ; Siegel et al., 2002 ; Zink et al., 2006 ; Cormie et al. 2007b ; 2007e]. Comme expliqué plus tôt, la vitesse générée lors de ce type de mouvement est moins importante que lors d'un squat avec saut. La puissance maximale produite est donc plus dépendante de la production de force. C'est pourquoi les valeurs de Ch_{Opt} sont plus élevées.

1.3.2.2. Puissance maximale : Pic et moyenne

Concernant les valeurs des puissances, toutes les études rapportées ne fournissent pas des données comparables. En effet, en plus des valeurs pics (P_{MAX}), des valeurs moyennes (P_{moy}) sont données [Baker et al., 2001 ; Izquierdo et al., 1999 ; 2002 ; Harris et al., 2007 ; Patterson et al., 2009]. Les valeurs de P_{moy} sont une moyenne de la puissance produite sur toute la durée du mouvement. Les valeurs de P_{moy} sont donc nettement inférieures à celles de P_{MAX} . De plus, il apparaît que les valeurs de Ch_{Opt} sont plus faibles pour P_{moy} [Sleivert et Tainghue, 2004 ; Cronin et Sleivert, 2005 ; Harris et al., 2007].

Dans les deux cas, il est correct de rapporter soit la valeur moyenne, soit la valeur pic. Néanmoins, la comparaison des résultats obtenus avec ceux de la littérature est difficile [Dugan et al., 2004]. Selon Harman et al. [1990], cité par Dugan et al. [2004], P_{MAX} est très corrélée avec la performance en saut vertical ($r = 0,88$) tandis que P_{moy} montre une corrélation plus faible ($r = 0,54$), néanmoins, la significativité de cette relation n'a pas été précisée par Dugan et al. [2004].

1.3.2.3. Influence de la masse corporelle

Les valeurs des puissances rapportées pour un même mouvement peuvent grandement différer selon les études. Cette différence peut s'expliquer par la méthode de détermination de P_{MAX} . [Sleivert et Taingahue \[2004\]](#) ont mis en évidence une Ch_{Opt} située entre 50 et 70% de 1RM lors d'un exercice de SJ et une P_{MAX} de $17,6 \pm 2,9 \text{ Wkg}^{-1}$. La différence avec les études travaillant sur le même exercice réside dans l'omission de la masse corporelle (m_c , kg) dans le calcul de P_{MAX} . En excluant la masse corporelle, cela diminue la force produite et donc cela diminue la valeur de P_{MAX} .

De plus, le fait d'inclure ou d'exclure m_c change la Ch_{Opt} . En excluant m_c , la Ch_{Opt} est plus élevée ([Figure III-4](#)) [[Sleivert et Taingahue, 2004](#) ; [Cronin et Sleivert, 2005](#)]. Or il apparaît plus logique d'inclure la masse corporelle dans le calcul de la puissance produite, puisque dans tous les mouvements de Squat, le sujet doit déplacer la charge mais il doit également déplacer sa propre masse. De plus, si la masse corporelle est exclue du calcul de la puissance, Ch_{Opt} sera plus élevée, et une charge inappropriée pourrait être utilisée lors de l'entraînement [[Dugan et al., 2004](#) ; [Cronin et Sleivert, 2005](#)].

Enfin, [Dugan et al. \[2004\]](#) propose d'inclure la masse corporelle dans le calcul de la puissance, mais d'exclure la masse des pieds et des jambes ($\sim 12\%$ de m_c). Selon ces auteurs, les jambes et les pieds participent peu au mouvement de squat, et sont relativement statiques durant la phase concentrique. Néanmoins, cette précision n'engendre que peu de différence sur le résultat final.

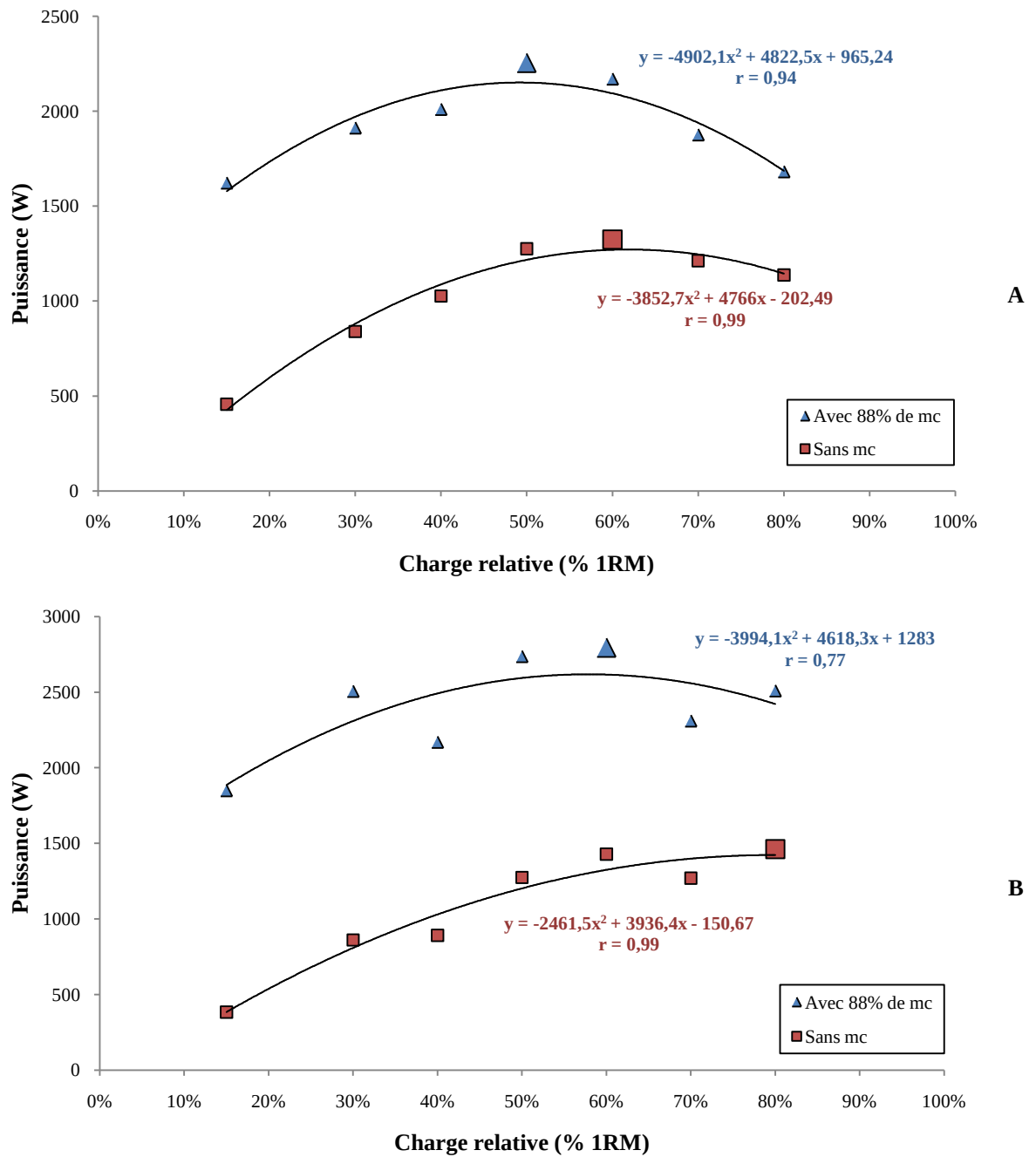


Figure III-4 – Exemple de relations « Charge – Puissance » pour 2 sujets (A et B) en ½ Squat Concentrique avec la masse corporelle incluse (Avec 88% de m_c) et exclue (Sans m_c) du calcul de la puissance maximale pour les même essais [Données personnelles].

1.4. EVALUATION DE LA PUISSANCE DES MEMBRES INFÉRIEURS EN CYCLISME

Une forte production de puissance en cyclisme est un paramètre déterminant dans la plupart des disciplines de compétition (*e.g.*, Piste, BMX, Contre La Montre) [Faria et al., 2005 ; Bertucci et al., 2005a ; 2007 ; Martin et al., 2007]. Comme décrit plus tôt, la capacité de produire une puissance musculaire élevée dépend fortement de la relation « Force – Vitesse » musculaire et de l'entraînement [Vandewalle et al., 1987]. S'il est possible d'améliorer les qualités musculaires de force et de vitesse, il est toutefois important de tester le transfert de ces qualités dans l'activité sportive spécifique à optimiser [Zatsiorsky et Kraemer, 2006]. Pour cela, des tests standardisés en condition de laboratoire sont réalisés sur cyclo-wattmètre et permettent d'obtenir une évaluation de la puissance mécanique produite.

1.4.1. TESTS SUR CYCLO-ERGOMETRE

L'évaluation de la production de puissance musculaire des membres inférieurs peut se faire de manière spécifique en cyclisme à l'aide de deux tests principaux : le test de « Wingate » et le test de « Force – Vitesse ».

1.4.1.1. Test de « Wingate »

Le test de « Wingate » est un des tests les plus largement utilisé pour quantifier la puissance mécanique [Reiser et al., 2002]. Il consiste à réaliser un sprint en pédalant le plus rapidement possible sur un cyclo-wattmètre pendant 30 secondes contre une résistance donnée (*e.g.*, 8,5% m_c [Reiser II et al., 2002]) avec un départ arrêté ou un départ lancé (*e.g.*, cadence de 60 rpm sans génération de force motrice) [Reiser II et al., 2002 ; Mendez-Villanueva et al., 2007].

Le test de Wingate permet de déterminer la capacité d'un athlète à produire une puissance élevée sur 30s. Grâce à ce test, il est possible de déterminer la puissance maximale produite (P_{MAX} , W), la puissance moyenne produite (P_{moy} , W) et un index d'endurance (IE , %) qui permet d'estimer la capacité d'un athlète à maintenir un pourcentage élevé de sa puissance maximale le plus longtemps possible sur la durée du test (Figure III-5).

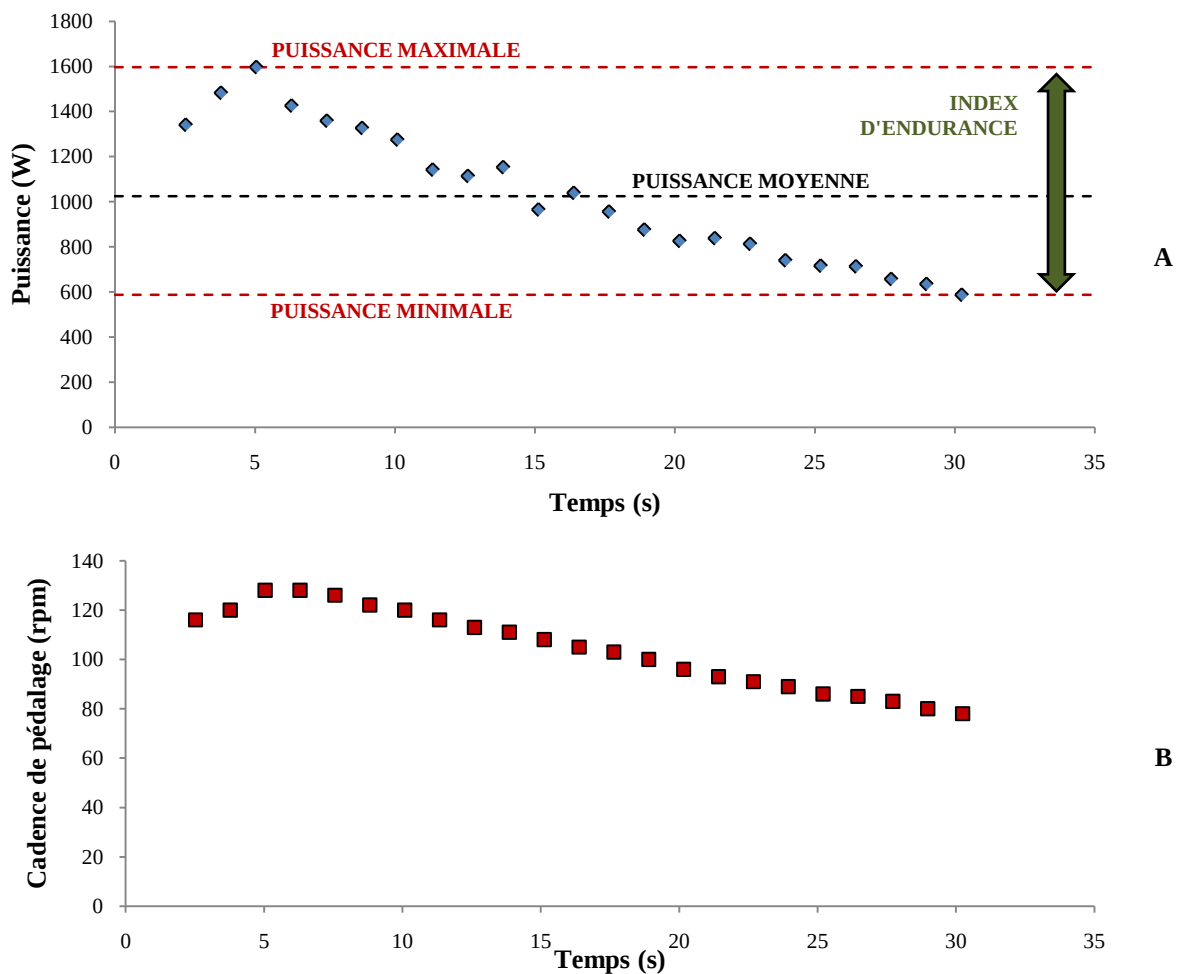


Figure III-5 – Exemple d'un profil de la puissance produite (A) et d'un profil de la cadence de pédalage (B) en fonction du temps lors d'un test de Wingate de 30s chez un pilote de BMX.

L'index d'endurance (IE , %) est déterminé comme le pourcentage de la différence entre la puissance maximale produite et la puissance minimale produite (P_{MIN} , W) lors du test [Reiser II et al., 2002] :

$$IE = \frac{P_{\text{MAX}} - P_{\text{MIN}}}{P_{\text{MAX}}} 100 \quad (25)$$

Plus la valeur de l'index d'endurance sera faible, meilleure sera la capacité de l'athlète à maintenir un niveau élevé de puissance. L'index d'endurance peut également être déterminé à partir de la pente de la droite de régression linéaire de la relation Cadence – Puissance. Dans ce cas, plus la pente sera grande, meilleur sera IE .

1.4.1.2. Test « force – vitesse »

Le test de « Force – Vitesse » sur cyclo-wattmètre consiste en plusieurs sprints d'une durée de 6 à 8s environ contre 3 résistances relatives à la masse corporelle du sujet (*e.g.*, 0,4, 0,6 et 0,8 Nkg⁻¹). Ces charges de friction ont été déterminées car il a été montré par Morin et al. [2002], par exemple, qu'elles permettaient aux sujets de développer des valeurs optimales de force et de vitesse, ainsi que de développer des puissances maximales sur cyclo-wattmètre. Vandewalle et al. [1987] ont montré que ces tests de 6s permettaient de déterminer de manière indirecte les propriétés mécaniques musculaires (*i.e.*, force de contraction et vitesse de raccourcissement) des membres inférieurs en déterminant les relations force – vitesse et puissance – vitesse.

A partir de la relation Cadence – Puissance des 3 tests combinés, la puissance maximale (P_{MAX} , W) et la cadence optimale de pédalage (Cad_{Opt} , rpm) correspondante sont obtenues (Figure III-6). Cette relation peut être représentée graphiquement comme une relation parabolique [Ravier et al., 2004].

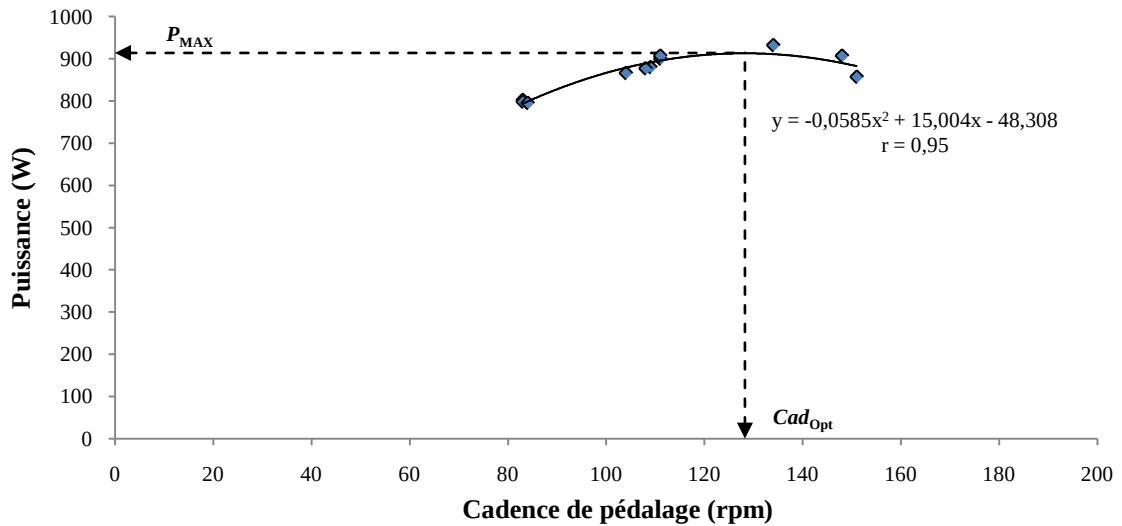


Figure III-6 – Relation typique Cadence – Puissance pour un cycliste sur route lors d’un test de « Force – Vitesse » sur cyclo-wattmètre contre 3 résistances de friction 0,4, 0,6 et 0,8 Nkg⁻¹. Cette relation permet de déterminer P_{MAX} (W) et Cad_{Opt} (rpm).

A partir de la cadence de pédalage (Cad , rpm), la vitesse angulaire de pédalage (ω , rad s⁻¹) est obtenue à l’aide de l’équation suivante :

$$\omega = \frac{Cad \cdot 2\pi}{60} \quad (26)$$

Puisque la puissance est le produit de la force normale à la pédale développée et de la vitesse linéaire, et que la vitesse linéaire de la pédale est égale au produit de la vitesse angulaire de la pédale et de la longueur de la manivelle (l , m), alors la force normale à la pédale développée est égale à :

$$F = \frac{P}{l \omega} \quad (27)$$

A l’aide de la relation Cadence – Force, il est possible d’extrapoler les valeurs maximales théoriques de Force (F_0 , N) et de vitesse (v_0 , rpm) à partir de la droite de régression linéaire (Figure III-7). Cette relation peut être représentée graphiquement comme une relation linéaire [Ravier et al., 2004]. F_0 correspond à la force maximale théorique que pourrait développer un athlète si la vitesse de pédalage était nulle. Et v_0 correspond à la vitesse maximale théorique que pourrait atteindre un athlète si la force était nulle.

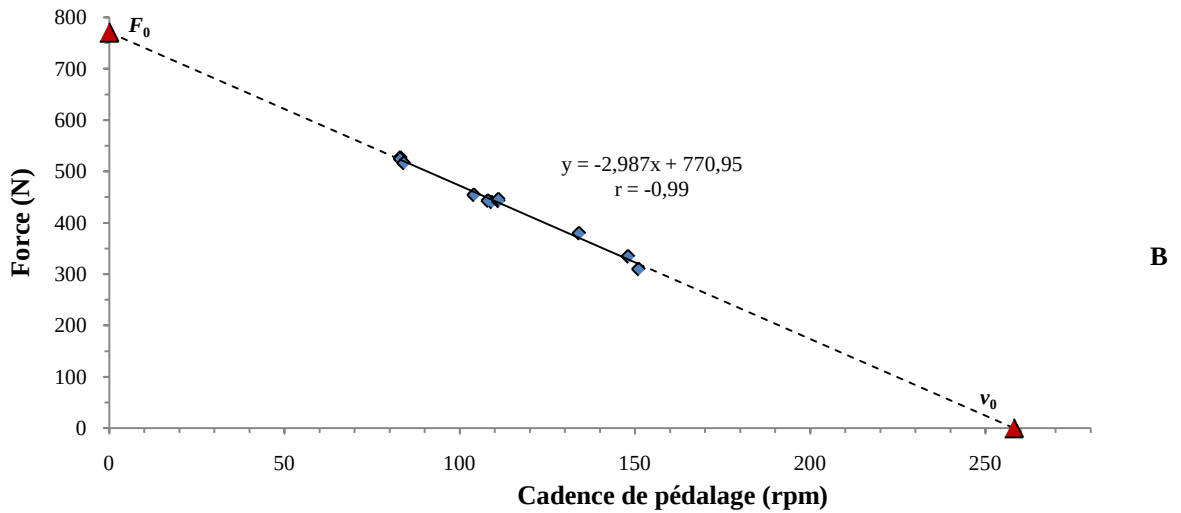


Figure III-7 – Relation typique Cadence – Force pour un cycliste sur route lors d’un test de « Force – Vitesse » sur cyclo-wattmètre contre 3 résistances de friction 0,4, 0,6 et 0,8 Nkg⁻¹. Cette relation permet de déterminer v_0 (rpm) et F_0 (N).

Les valeurs extrapolées de F_0 et de v_0 sont utiles pour caractériser indirectement les caractéristiques musculaires des membres inférieurs d’un athlète. [Vandewalle et al. \[1987\]](#) ont montré que la puissance maximale était atteinte avec une cadence de pédalage et une force développée de $0,5v_0$ et $0,5F_0$, respectivement.

Ces auteurs ont montré qu’à partir de la relation entre la force de friction et la vitesse de pédalage était linéaire et qu’elle pouvait s’exprimer en fonction de v_0 et F_0 , comme :

$$v = v_0 \left(\frac{1 - F}{F_0} \right) \quad (28)$$

$$F = F_0 \left(\frac{1 - v}{v_0} \right) \quad (29)$$

1.4.2. PARAMETRES INFLUENÇANT LA PUISSANCE MUSCULAIRE EN CYCLISME

D’après les équations 26 et 27, la puissance mécanique produite lors du pédalage est le produit de la longueur de manivelle, de la cadence de pédalage, et de la force normale appliquée sur la pédale :

$$P = l \frac{\text{Cad } 2\pi}{60} F \quad (30)$$

1.4.2.1. La longueur de manivelle

Martin et Spirduso [2001] ont montré que la longueur de la manivelle possède une influence sur la puissance maximale produite. Ils ont testé 5 longueurs de manivelle (*i.e.*, 120, 145, 170, 195 et 220 mm) lors de sprints à vitesse maximale sur cyclo-wattmètre d'une durée de 3-4s. Les puissances produites avec les manivelles de 145 et 170 mm étaient significativement supérieures ($p < 0,05$) à celles produites à l'aide des manivelles de 120 et 220 mm. Bien que la puissance produite avec la manivelle de 195 mm était légèrement inférieure à celles produites avec 145 et 170 mm, il n'existait aucune différence significative. De plus ces auteurs ont constaté que la longueur de la manivelle affectait la vitesse optimale de pédalage ainsi que la vitesse optimale de la pédale. En augmentant l , la vitesse optimale de pédalage diminuait, et en augmentant l , la vitesse optimale linéaire de la pédale augmentait.

D'après Martin et Spirduso [2001], la vitesse optimale de pédalage et la vitesse optimale linéaire de la pédale pourraient représenter des phénomènes physiologiques distincts et qu'elles influeraient sur les conditions optimales de production de la puissance maximale. La vitesse optimale linéaire de la pédale serait liée à la vitesse de raccourcissement musculaire et la vitesse optimale de pédalage serait liée à l'état d'excitation musculaire.

Ces auteurs ont également démontré une relation entre la longueur de la manivelle et la longueur du tibia et la longueur de la cuisse (*i.e.*, différence de hauteur entre la position debout et la position assise d'un athlète). La longueur optimale de la manivelle pour une puissance maximale correspondrait à 20% de la longueur de la cuisse ou 41% de la longueur du tibia.

1.4.2.2. Optimisation du cycle de pédalage

Lors du cycle de pédalage, la force appliquée sur la pédale n'est pas constante tout au long de la révolution de la manivelle, et le pédalage peut être divisé en 2 phases principales [Kautz et Hull, 1993] : la phase de descente ou motrice (*i.e.*, de 0 à 180°) où la force est la plus grande et la phase de remontée ou de récupération (*i.e.*, de 180 à 360°). De plus, la force effective est minimale aux environs de 0° (*i.e.*, « point mort haut ») et de 180° (*i.e.*, « Point mort bas »), il est possible alors de décrire 4 phases (Figure III-8) [Henke 1998].

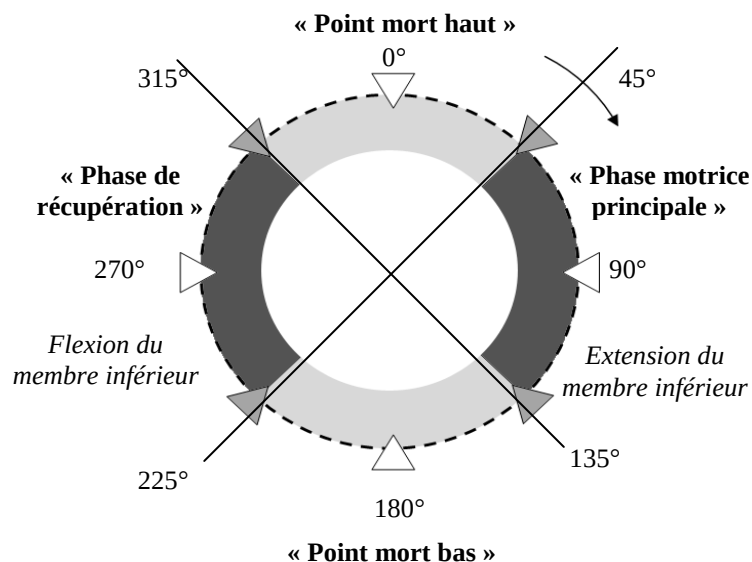


Figure III-8 – Les différentes phases du cycle de pédalage : 1) la phase motrice principale (45 – 135°), 2) le point mort bas (135 – 225°), 3) la phase de récupération (225 – 315°), et 4) le point mort haut (315 – 45°) [D'après Henke 1998].

Pour optimiser le développement de la force au cours d'un cycle de pédalage, des systèmes de pédales spécifiques ont été mis au point afin d'améliorer la performance en cyclisme [e.g., Hull et al., 1992 ; Hintzy et al., 1999 ; Ratel et al., 2004 ; Hue et al., 2007 ; 2008 ; Rankin et Neptune, 2008 ; Rodriguez-Marroyo et al., 2009]. Les bénéfices théoriques de ces systèmes sont d'éliminer les points morts [Rodriguez-Marroyo et al.,

2009], d'augmenter la longueur de la manivelle lors de la phase motrice [Hue et al., 2007 ; 2008] et de ralentir la phase motrice [Rankin et Neptune, 2008].

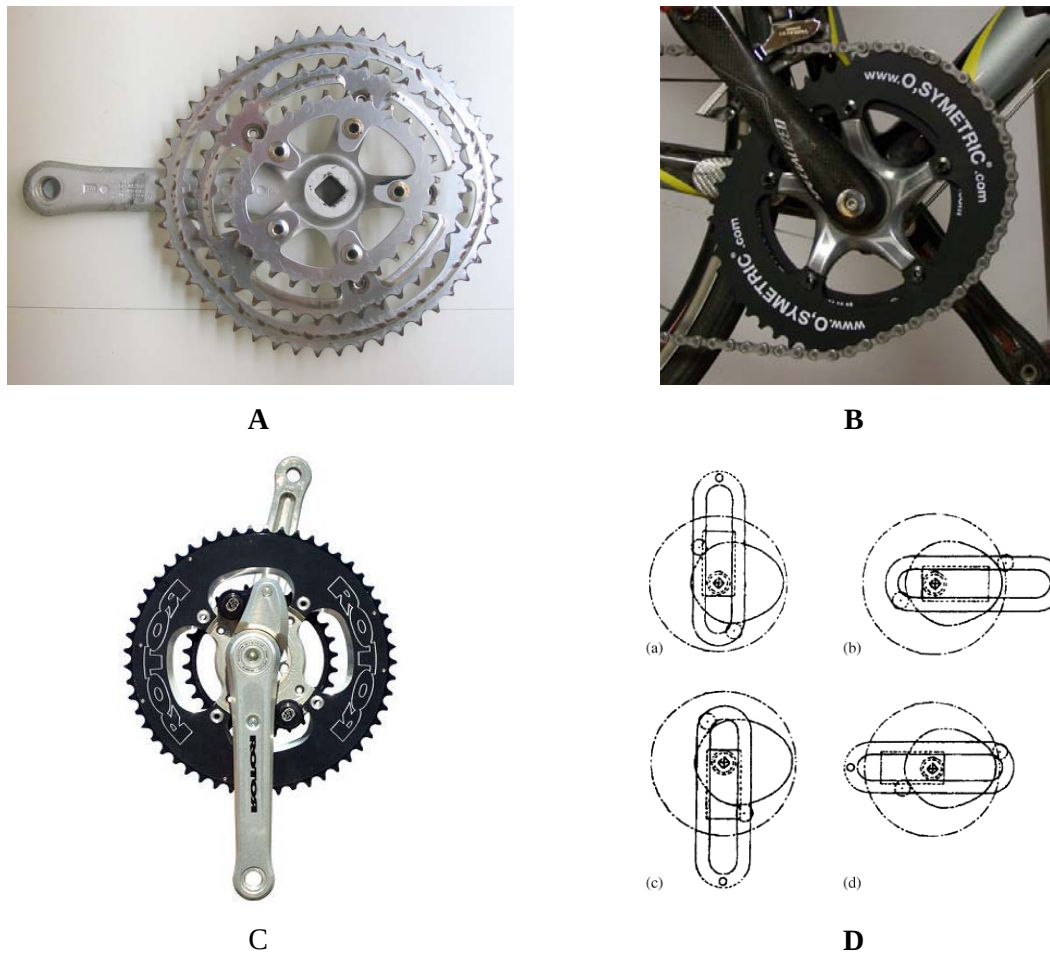


Figure III-9 – Exemples de systèmes de pédaliers conçus pour améliorer le cycle de pédalage : le pédaalier « Biopace » (Shimano) (A), le pédaalier non-circulaire « Harmonic » (O.Symetry, France) (B), le système Rotor (Rotor Bike Components, Madrid, Espagne) (C) et le système « Pro-Race » (D) d'après Hue et al. [2007].

Le système « Biopace » de Shimano (Figure III-9A) est un pédaalier non-circulaire conçu pour accélérer la phase motrice principale et la phase de récupération lors du pédalage [Ratel et al., 2004]. Hull et al. [1992] ont comparé ce système à un pédaalier circulaire classique lors de tests de pédalage à intensité constante, mais ils n'ont démontré aucun bénéfice physiologique avec ce système. De plus, Ratel et al. [2004] rapportent que le « Biopace » rend plus difficile le passage des « points morts ».

Le pédalier non-circulaire asymétrique « Harmonic » (O.Symetry, France) ([Figure III-9B](#)) a, quant à lui, pour principe de ralentir la phase motrice principale, et d'accélérer la phase de récupération tout en facilitant les passages aux « points morts ». La différence avec le système « Biopace » réside dans l'angle de la manivelle relativement aux axes du plateau [[Ratel et al., 2004](#)]. Néanmoins ces auteurs n'ont pas constaté d'améliorations des réponses physiologiques dues à ce système en comparaison à un pédalier circulaire classique lors de tests de pédalage avec augmentation de l'intensité par incrémentation.

Au contraire, lors d'une comparaison entre un plateau « Harmonic » et un plateau circulaire classique, [Hintzy et al. \[1999\]](#) ont observé lors de tests de « Force – Vitesse » une augmentation significative ($p < 0,01$) de la production de la puissance maximale ($797,8 \pm 24,1$ vs. $733,7 \pm 19,3$ W) et une augmentation significative ($p < 0,05$) de la vitesse maximale théorique ($287,7 \pm 6,6$ vs. $266,6 \pm 3,2$ rpm) en faveur du plateau « Harmonic ».

Le système Rotor (Rotor Bike Components, Madrid, Espagne) ([Figure III-9C](#)) est un système qui permet d'éliminer les phases de « point mort ». [Rodriguez-Marroyo et al. \[2009\]](#) ont testé ce système et un plateau circulaire standard lors de différentes tests : un test incrémental, un test sous-maximal qui caractérisaient la performance aérobie des sujets, des tests de Wingate qui caractérisaient la performance anaérobie des sujets.

Ces auteurs n'ont trouvé aucune différence significative entre les puissances produites avec les deux types de pédaliers pour les tests incrémental et sous-maximal. Au contraire, lors des tests de Wingate, ils ont observé une différence significative ($p < 0,05$) entre les deux types de pédalier. Le système Rotor a permis une production de puissance maximale supérieure d'un peu plus de 11%. Ils ont également montré une cadence de pédalage maximale significativement supérieure ($p < 0,05$) avec le système Rotor. Ces résultats peuvent s'expliquer par l'élimination des points morts, la variation de la vitesse angulaire de la manivelle et par l'individualisation des réglages du système Rotor.

Hue et al. [2007] n'ont observé aucune différence significative entre un système à longueur de manivelles variable « Pro-Race » (Figure III-9D) et un pédalier circulaire standard sur un sprint de 1000m sur piste effectué par 12 cyclistes. Néanmoins, pour les cyclistes dont la performance était meilleure avec le système Pro-Race, ils ont rapporté des corrélations significatives ($p < 0,05$) entre des paramètres anthropométriques des membres inférieurs (*e.g.*, volume musculaire, aire musculaire de section, circonférence) et la performance sur 1000m. Ces auteurs ont conclu qu'un système tel que le « Pro-Race » semblerait convenir d'avantage à des cyclistes entraînés sur un tel système et dont la masse musculaire des membres inférieurs serait importante.

Hue et al. [2008] ont comparé le système « Pro-Race » à un pédalier circulaire standard lors d'un test de « Force – Vitesse ». A l'instar de Hintzy et al. [1999] et Rodriguez-Marroyo et al. [2009], ils ont observé une augmentation significative de la production de puissance maximale avec le système « Pro-Race ». De plus, le gain de puissance était significativement ($p < 0,05$) corrélé avec la force optimale (F_{Opt} , N) (*i.e.*, la force à laquelle la puissance maximale est produite) générée sur le pédalier « Pro-Race » et le volume sec des membres inférieurs.

Ces études montrent que la puissance maximale produite à l'aide de ces pédaliers est significativement supérieure pour des efforts maximaux dont la durée ne dépasse pas 30s. Cette augmentation de production de puissance serait due à l'élimination des « points morts » et à l'allongement du temps de la phase motrice principale [Hintzy et al., 1999]. Néanmoins, il semblerait que l'amélioration du pattern de pédalage par l'utilisation de pédaliers non-circulaires implique une plus grande force des membres inférieurs et donc une masse musculaire plus importante. L'usage de ce type de matériel est à réserver à certains cyclistes et il nécessite un entraînement spécifique pour optimiser son utilisation. Il serait intéressant de tester ces systèmes lors du départ en BMX.

1.4.2.3. La cadence optimale de pédalage

La cadence optimale (Cad_{Opt} , rpm) est la cadence de pédalage à laquelle est produite la puissance maximale. La relation Puissance – Cadence est représentée graphiquement par une parabole, les cadences inférieures et supérieures à Cad_{Opt} entraînent une production de puissance inférieure à P_{MAX} .

Lors d'une étude sur la relation entre la composition musculaire en fibres et les performances lors de tests de « Force – Vitesse » et de Squat Jump, [Hautier et al. \[1996\]](#) ont montré que Cad_{Opt} apparaissait significativement corrélée ($r = 0,88$, $p < 0,01$) avec la composition en fibres rapides d'un muscle extenseur du genou, le vaste latéral du quadriceps. Les auteurs ont conclu que la vitesse optimale était l'expression directe de la contribution relative des fibres de type I et II à la puissance maximale. D'après ces auteurs, quand la puissance maximale est produite dans un muscle possédant un grand pourcentage de fibres rapides, Cad_{Opt} est élevée, et inversement. [Dorel et al. \[2005\]](#) ont montré que la vitesse de déplacement lors d'un sprint maximal sur 200 m lancé en cyclisme sur piste était significativement corrélée ($p < 0,01$) à Cad_{Opt} . Ces auteurs ont également observé que la cadence de pédalage moyenne sur 200 m était supérieure à Cad_{Opt} . Il en a été conclu qu'il était nécessaire de réduire la cadence moyenne en augmentant par exemple le braquet utilisé. Ces résultats suggèrent donc qu'il existe pour une cadence de pédalage donnée, un braquet optimal.

1.4.2.4. Les pédales à fixation automatique

Les pédales à fixation automatique ont été autorisées depuis quelques années dans les compétitions internationales de BMX [[UCI](#)]. [Capmal et Vandewalle \[1997\]](#) ont montré que

la production de puissance maximale était significativement plus élevée ($p < 0,05$) grâce à l'utilisation de pédales à fixation automatique en comparaison à des pédales ordinaires (782 vs. 668 W, respectivement) lors d'un sprint sur cyclo-wattmètre contre une résistance faible. [Hintzy et al. \[1999\]](#) ont observé également une production de puissance maximale significativement plus forte ($p < 0,001$) lors de sprints sur cyclo-wattmètre contre des charges de $0,5 \text{ Nkg}^{-1}$ ($685 \pm 76 \text{ W}$ vs. $629 \pm 71 \text{ W}$) et $1,1 \text{ Nkg}^{-1}$ ($923 \pm 122 \text{ W}$ vs. $747 \pm 105 \text{ W}$) en utilisant des pédales à fixation automatique en comparaison à des pédales ordinaires. Ces auteurs ont rapporté également une augmentation significative ($p < 0,01$) de la force optimale à $0,5 \text{ Nkg}^{-1}$ avec les pédales à fixation automatique, et une augmentation significative ($p < 0,001$) de la vitesse optimale de pédalage à $1,1 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$ avec les pédales à fixation automatique, en comparaison aux pédales ordinaires. D'après [Hintzy et al. \[1999\]](#), cette augmentation dans la production de puissance maximale est due également à une amélioration de la force optimale à charge légère ou de la vitesse optimale à charge élevée.

[Capmal et Vandewalle \[1997\]](#) concluent que l'augmentation de puissance est due à une plus forte action musculaire de tirage dans la phase de récupération, ce qui permettrait d'appliquer un couple plus important lors de la phase motrice principale. Et l'utilisation des pédales à fixation automatique permettraient une meilleure coordination neuromusculaire [[Hintzy et al., 1999](#)].

RESUME – LA PUISSANCE MUSCULAIRE

- La puissance musculaire (P , W) est le produit de la force de contraction (F , N) et de la vitesse de raccourcissement d'un muscle (v , ms^{-1}). Elle est un paramètre déterminant dans de nombreuses disciplines sportives.
- Lors d'un mouvement, la production de puissance totale est influencée principalement par la relation Force – Vitesse. Pour un muscle isolé, la relation Force – Vitesse est hyperbolique mais pour un système poly-articulaire, cette relation est généralement linéaire, tandis que la relation Force – Puissance est parabolique.
- Pour connaître la puissance maximale produite pour un groupe musculaire ou pour un mouvement, il convient d'étudier la relation Charge – Puissance. Il existe une charge optimale (Ch_{Opt} , % 1RM) qui permet de produire la puissance maximale. Pour les membres inférieurs, Ch_{Opt} est comprise entre 0 et 70 % de 1RM.
- La puissance musculaire produite peut être déterminée à l'aide de différentes méthodes de mesure (*e.g.*, mesure du déplacement, accélérométrie, mesure des forces de réaction au sol) et selon différentes méthodes de calcul.
- La puissance musculaire produite peut également être évaluée sur cyclo-wattmètre lors de tests standardisés. La production de puissance musculaire est dépendante de la longueur de manivelle, de la vitesse de pédalage et de la force appliquée sur la pédale.

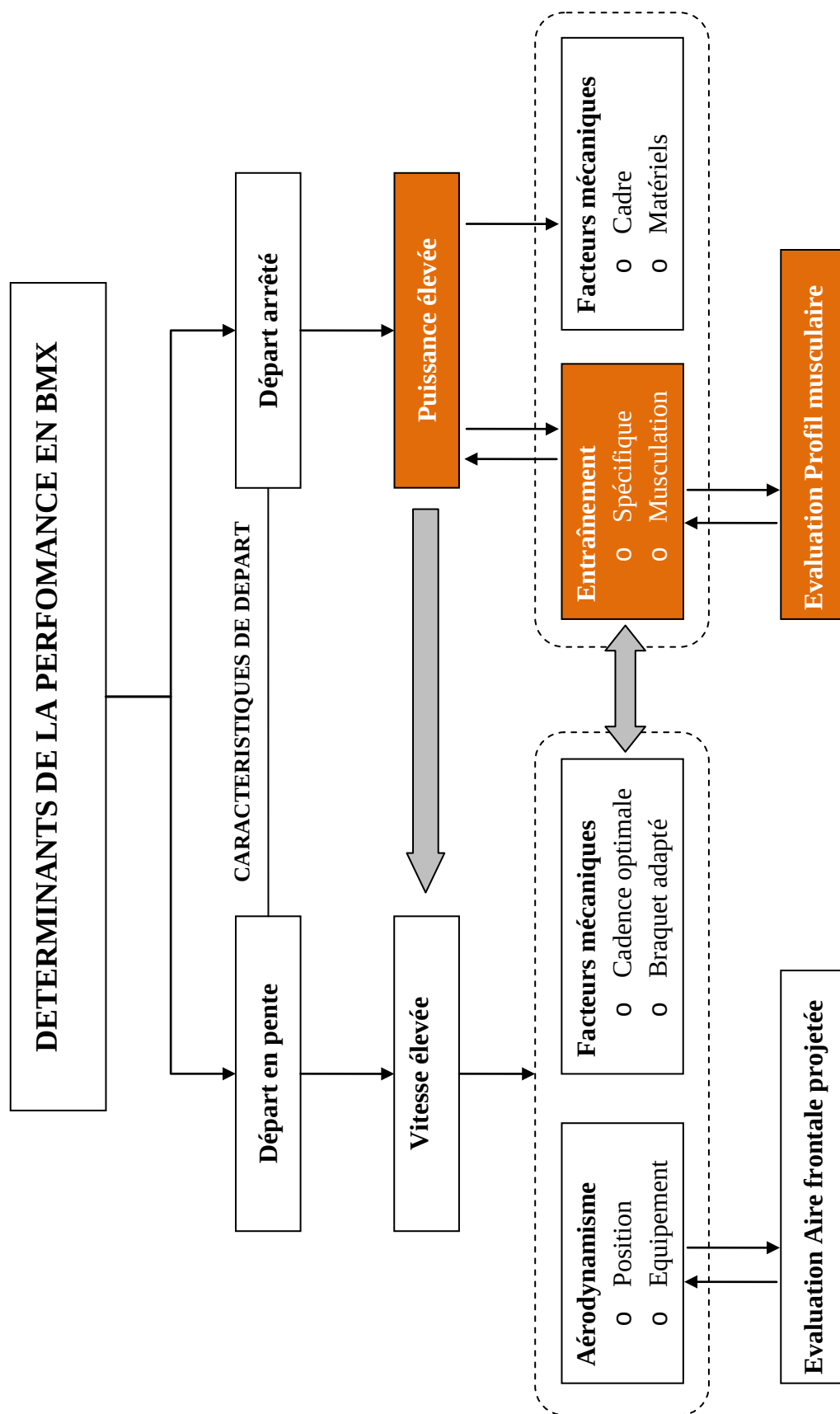


Figure III-10 – Présentation schématique des déterminants de la performance en BMX.

2. ETUDE DES DETERMINANTS MUSCULAIRES DE LA PERFORMANCE EN CYCLISME SUR ROUTE ET EN BMX LORS D'EXERCICES A INTENSITES MAXIMALES

La puissance maximale mécanique est un paramètre déterminant dans la performance en cyclisme [Faria et al., 2005 ; Martin et al., 2007]. Pour évaluer la performance maximale en cyclisme lors de sprints, de nombreux scientifiques ont utilisé les tests standardisés de « Force – Vitesse » [Vandewalle et al., 1987 ; Hautier et al., 1996 ; Morin et al., 2002 ; Ravier et al., 2004] et de Wingate [Reiser II et al., 2002 ; Mendez-Villanueva et al., 2007]. Ces tests permettent d'estimer indirectement les qualités musculaires de force et de vitesse. Ils sont de bons indicateurs des performances maximales de pédalage sur des sprints courts (< 6s) et des sprints plus longs (~ 30s).

En plus de l'entraînement spécifique sur bicyclette, l'entraînement de musculation est devenu une partie fondamentale de l'entraînement des athlètes impliqués dans une discipline nécessitant des efforts brefs et intenses [Minahan et Wood, 2008]. Les caractéristiques musculaires comme la puissance et la force de contraction peuvent être améliorées à l'aide d'une préparation physique ciblée. Sleivert et Taingahue [2004] ont montré une corrélation significative entre la puissance maximale produite lors d'un Squat Jump et la performance sur les 5 premiers mètres en sprint. Et Harris et al. [2008] ont montré une amélioration des performances en sprint (athlétisme) après des sessions d'entraînements basées sur le travail de la force maximale et de la puissance maximale en Squat.

Néanmoins l'appréciation des charges d'entraînement spécifiques pour optimiser une qualité physique est généralement théorique et se base sur la force maximale dynamique (1RM) des athlètes sur un mouvement de musculation [Jidovtseff et al., 2008b].

L'évaluation du profil musculaire inertiel pour un mouvement de musculation donné permet d'identifier les valeurs de vitesse, de force et de puissance à différentes charges relatives au 1RM. Cette procédure permet d'obtenir les relations Charge – Vitesse et Charge – Puissance et de connaître la charge qui maximise la production de puissance musculaire dans un mouvement. La finalité d'une telle évaluation est d'individualiser les charges d'entraînements dans le but d'améliorer des qualités physiques définies [Jidovtseff et al., 2009].

Vandewalle et al. [1987] et Hautier et al. [1996] ont étudié la relation entre des tests « Force – Vitesse » et la puissance développée en Squat Jump, mais **à notre connaissance aucune étude n'a encore étudié la relation entre les performances sur cyclo-wattmètre lors de sprints courts et longs à effort maximal et le profil inertiel d'un mouvement de musculation.**

Le but de cette étude sera d'analyser les déterminants musculaires de la performance à partir notamment de l'évaluation inertielle dynamométrique lors d'un exercice de ½ Squat concentrique, d'un saut vertical et de tests de sur cyclo-wattmètre (« Force – Vitesse » et Wingate). L'objectif sera de déterminer les corrélations existantes entre les tests sur cyclo-wattmètres et ceux réalisés durant une évaluation musculaire inertielle au travers des mouvements de ½ Squat et de saut vertical, et d'étudier les liens avec les paramètres anthropométriques. Cette étude se déroulera en deux parties distinctes, la première sur un échantillon de cyclistes sur route de niveau régional à national et la seconde sur un échantillon de pilotes de BMX de niveau régional à national.

2.1. DETERMINANTS MUSCULAIRE DE LA PERFORMANCE EN CYCLISME SUR ROUTE LORS D'EXERCICES A INTENSITE MAXIMALES

2.1.1. METHODES EXPERIMENTALES

2.1.1.1. Sujets

Dix cyclistes sur route masculins de niveau régional à national ont participé à cette étude. Les valeurs moyennes ($\pm$ Ecart-Type) de l'âge, la hauteur corporelle (h_c , m), de la masse corporelle (m_c , kg) et de la masse grasse exprimée en pourcentage de la masse corporelle totale (MG, %) sont 21 ($\pm$ 6) ans, 1,79 ($\pm$ 0,05) m, 65,8 ($\pm$ 5,5) kg et 10,7 ($\pm$ 4,0) %, respectivement.

2.1.1.1.1. Données anthropométriques et composition corporelle

La hauteur corporelle (h_c) et la masse corporelle (m_c) des sujets ont été mesurées sans chaussures et avec uniquement un short d'entraînement, à l'aide d'un stadiomètre (modèle 220, Seca, Allemagne), et à l'aide d'un pèse-personne électronique à affichage digital (modèle BF-350, Tanita, Japon), respectivement. Les longueurs de la cuisse (L_{Cuisse} , m), du point le plus supérieur (et non latéral) du grand trochanter au point le plus latéral et proximal du plateau tibial, et de la jambe (L_{Jambe} , m), du point le plus médial et proximal du plateau tibial au point le plus distal de la malléole interne de la cheville, sont mesurées à l'aide d'un mètre-ruban [Cuerrier et al., 2007].

En s'appuyant sur le protocole de Durnin et Womersley [1974], la densité corporelle (D_c , sans unité) a été déterminée en utilisant la méthode des 4 plis cutanés (plis bicipital, tricipital, sous-scapulaire et supra-iliaque). Les plis cutanés ont été mesurés à l'aide d'une pince Harpenden[®] (British Indicators, Royaume-Uni).

Les mesures ont été effectuées sur le côté droit du corps. La procédure de mesure a consisté à prendre le pli cutané entre le pouce et l'index pour placer la pince perpendiculairement à la surface cutanée. La pression de la pince a été appliquée approximativement 2 secondes. L'épaisseur du pli était ensuite lue et notée en millimètres. Cinq mesures ont été réalisées pour chaque pli, et la valeur retenue correspond à la moyenne des 5 mesures.

A partir des 4 mesures, l'équation de [Durnin et Womersley \[1974\]](#) est utilisée pour déterminée D_c :

$$D_c = C - [M(\log 10 (\Sigma 4 \text{ plis}))] \quad (31)$$

Où C et M sont des constantes dépendantes du sexe et de l'âge. Les constantes utilisées pour les sujets de cette étude sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau III-3 – Constantes dépendantes du sexe et de l'âge (C et M) dans le calcul de la densité corporelle (D_c). D'après [Durnin et Womersley \[1974\]](#).

Hommes	17 – 19 ans	20 – 29 ans	30 – 39 ans
C	1,1620	1,1631	1,1422
M	0,0678	0,0632	0,0544

La valeur de D_c a été ensuite convertie en pourcentage de masse grasse (MG, %) en utilisant l'équation de [Siri \[1961\]](#) :

$$MG = \frac{495}{D_c} - 450 \quad (32)$$

2.1.1.1.2. Détermination de l'aire de section musculaire de la cuisse

D'après [Challis \[2004\]](#), l'aire de section musculaire est liée à la force musculaire. Pour étudier l'influence de l'aire de section musculaire dans la performance chez les cyclistes sur route, l'aire de section musculaire de la cuisse (AM_{Cuisse} , cm²) est déterminée à l'aide de l'équation de [Knapik et al. \[1996\]](#) :

$$AM_{Cuisse} = 0,649 \left[\left(\frac{C_{TC}}{\pi} - P_{Cuisse} \right)^2 - (0,3 d_E)^2 \right] \quad (33)$$

Où C_{TC} (cm) est la circonférence totale de la cuisse mesurée avec un mètre-ruban, P_{Cuisse} (cm) est le pli cutané quadricipital mesuré à l'aide de la pince Harpenden, et d_E (cm) est la distance entre l'épicondyle fémoral latéral et médial mesurée à l'aide d'un pied à coulisse. Le site de mesure de la cuisse était situé à mi-distance entre le grand trochanter et l'épicondyle latéral.

2.1.1.2. Protocole

Pour chaque sujet, cette étude s'est conduite en deux sessions. Durant la première session, les données anthropométriques et la force dynamique maximale (1RM) en demi-squat ($\frac{1}{2}$ Squat) ont été mesurées.

Durant la seconde session, un profil inertiel musculaire de la production de puissance avec incrémentation de la charge lors d'un exercice de $\frac{1}{2}$ Squat lors de la phase concentrique [Jidovtseff et al., 2008b ; 2009], un test de détente verticale et un test de « Force – Vitesse » sur watt-ergomètre sont effectués dans un ordre randomisé pour chaque sujet. Un échauffement général et spécifique a été réalisé avant chaque test et 15 minutes de repos ont été accordées entre les tests.

2.1.1.2.1. Détermination du 1RM en $\frac{1}{2}$ Squat concentrique

Avant le test, les sujets ont été familiarisés avec la technique correcte d'exécution du mouvement pour réduire les risques de blessures et les forts gains en force dus à l'apprentissage moteur [Fatouros et al., 2005]. La force dynamique maximale des membres inférieurs lors d'un $\frac{1}{2}$ Squat a été déterminée à l'aide d'un test du 1RM. Le 1RM

représente la charge maximale spécifique à un exercice pouvant être déplacée une seule et unique fois.

Le $\frac{1}{2}$ Squat est un mouvement de flexion et d'extension des membres inférieurs mobilisant de façon incomplète l'articulation du genou (l'angle fémur – tibia est environ égal à 90°). Une barre chargée repose sur l'arrière des épaules. Les pieds sont écartés de la largeur des épaules, et une cale peut être placée sous les talons pour éviter les problèmes d'équilibre en position basse dus à un manque de souplesse au niveau des membres inférieurs.

La détermination du 1RM a été basée sur le protocole de [Winchester et al. \[2005\]](#). Les sujets ont exécuté différents essais en guise d'échauffement, basés sur un pourcentage estimé de leur 1RM. Le pourcentage et le nombre de répétitions (reps) ont été réalisés de la manière suivante : 4-6 répétitions à 30 % du 1RM estimé, 3-4 répétitions à 50 % du 1RM estimé, 2-3 répétitions à 70 % du 1RM estimé, 1 répétition à 90 % du 1RM estimé ou 1RM. Ensuite, les sujets avaient la possibilité d'exécuter 3-4 essais maximum pour établir leur réel 1RM. Entre chaque tentative, les sujets se sont reposés 5 minutes.

2.1.1.2.2. Profil musculaire inertiel avec incrémentation de la charge en $\frac{1}{2}$ Squat concentrique

Lors d'un exercice de $\frac{1}{2}$ Squat, les sujets ont réalisé, dans un ordre randomisé, une répétition à différentes charges relatives (Ch_{rel} , % 1RM) de leur 1RM (*i.e.*, 15, 30, 40, 50, 60, 70 et 80%) avec un repos de 5 minutes entre chaque essai.

Avec une barre sur les épaules, les sujets ont eu pour instruction de fléchir les membres jusqu'à un angle de genou d'environ 90° entre le fémur et le tibia ([Figure III-11](#)). Dans cette position, une instruction est donnée de rester immobile jusqu'à un signal sonore. A ce signal, les sujets doivent exécuter le mouvement le plus rapidement possible

sur toute la phase concentrique. Il n'était pas permis de sauter avec la barre à la fin de la phase concentrique.



Figure III-11 – Position de départ (Angle cuisse – jambe à environ 90°) de la phase concentrique en ½ Squat.

Durant tous les tests, l'accélération de la barre a été mesurée à l'aide d'un accéléromètre 3 axes sans fil (Myotest SA, Suisse) (Figure III-12) fixée sur la barre. La validité du Myotest® a auparavant été démontrée par Kraemer [2010]. La fréquence d'échantillonnage est de 500 Hz.



Figure III-12 – Accéléromètre 3 axes sans fil Myotest® (Myotest SA, Suisse).

A chaque intervalle de 2 ms, la vitesse de déplacement instantanée ($Myo\ v, ms^{-1}$) est obtenue par intégration de l'accélération verticale (a, ms^{-2}) enregistrée par le Myotest® dans cet intervalle de temps. Ces vitesses instantanées sont ensuite additionnées consécutivement pour obtenir $Myo\ v$ lors de la phase concentrique du mouvement [Sleivert et Taingahue, 2004 ; Thompson et Bemben, 1999] :

$$Myo\ v_{t_2} = Myo\ v_{t_1} + \int_{t_1}^{t_2} a\ dt \quad (34)$$

La force ($Myo\ F, N$) exercée par le sujet est calculée en multipliant la somme de la masse de la barre chargée (m_{ch}, kg) et de la masse corporelle sans la masse des jambes et des pieds ($88\% m_c, kg$) par la somme de a et de l'accélération gravitationnelle (g, ms^{-2}) [Dugan et al., 2004] :

$$Myo\ F = (m_{ch} + 88\%m_c)(g + a) \quad (35)$$

Lors de la phase concentrique du mouvement en ½ Squat, les jambes et les pieds ont une position statique, et ce mouvement ne requière pas de saut. Certains auteurs [Dugan et al., 2004 ; Cormie et al., 2007d] ont considéré que la détermination de la puissance serait plus juste en ôtant la masse des jambes et des pieds ($\sim 12\%$) du calcul de la puissance. La puissance ($Myo\ P, W$) produite est obtenue en multipliant $Myo\ v$ et $Myo\ F$:

$$Myo\ P = Myo\ v \cdot Myo\ F \quad (36)$$

A partir de ces mesures, le profil de puissance musculaire en fonction des charges relatives au 1RM est établi pour chaque sujet. A partir de la relation Charge – Puissance, les valeurs de puissances maximale ($Myo\ P_{MAX}, W$) et moyenne ($Myo\ P_{moy}, W$), de puissances maximale ($Myo\ P_{MAX}m_c^{-1}, Wkg^{-1}$) et moyenne ($Myo\ P_{moy}m_c^{-1}, Wkg^{-1}$) relatives à la masse corporelle et la charge optimale (*i.e.*, charge à laquelle la puissance maximale est produite) ($Ch_{Opt}, \% 1RM$) ont été déterminées. Les vitesses ($Myo\ v, ms^{-1}$) et les forces ($Myo\ F, N$) maximales et moyennes étudiées correspondent aux vitesses et forces optimales (*i.e.*, qui correspondent à la production maximale de puissance).

A partir de la relation Force – Vitesse moyenne, la force maximale théorique moyenne (Myo F_0 , N) et la vitesse maximale théorique moyenne (Myo v_0 , ms^{-1}) ont été calculées.

2.1.1.2.3. Test de détente verticale (« Squat Jump »)

Les sujets ont réalisé deux « Squat Jump » (SJ), le temps de récupération entre chaque saut était de 3 min environ. Le départ du saut s'effectue en position genoux fléchis à 90° , avec les mains placées sur les hanches pour éviter tout mouvement de balancier avec les bras. Un accéléromètre Myotest[®] est fixé sur les sujets au niveau de la hanche. Les sujets ont pour consigne de sauter le plus haut possible dès le retentissement du signal de départ produit par le Myotest[®].

Lors de ces sauts, la hauteur de saut maximale (SJ h_{MAX} , m), la puissance maximale produite (SJ P_{MAX} , W) ainsi que la puissance moyenne (SJ P_{moy} , W) produites lors de la phase concentrique ont été déterminées à l'aide du Myotest[®]. La hauteur de saut maximale a été calculée à partir du temps de suspension en l'air (t_s , s) mesuré à l'aide de l'accéléromètre selon les lois fondamentales de la dynamique [Samozino et al., 2008] :

$$\text{SJ } h_{\text{MAX}} = \frac{1}{8} g t_s^2 \quad (37)$$

Les puissances maximale et moyenne produites lors des sauts sont obtenues de la même manière que lors du profil de puissance musculaire avec incrémentation de la charge en $\frac{1}{2}$ Squat concentrique. La masse corporelle utilisée dans le calcul de la force développée est égale à 88% de la masse corporelle totale [Cormie et al., 2007].

2.1.1.2.4. Tests de « Force – Vitesse » sur watt-ergomètre

Les tests ont été réalisés sur un home-trainer SRM-Indoor Basic (Schoberer Rad Messtechnik, Allemagne) (Figure III-13A) équipé d'un capteur de puissance SRM

(Modèle scientifique, Schoberer Rad Messtechnik, Allemagne) (Figure III-13B), de pédales automatiques, d'une selle de course et d'un guidon classique. La résistance sur ce home-trainer a été obtenue par frein magnétique. Avant le début du test, chaque sujet a ajusté la bicyclette à leur position de cyclisme habituelle.



Figure III-13 – Home-trainer SRM-Basic (A) équipé d'un capteur de puissance SRM modèle Scientifique (B).

La validité du SRM a été précédemment démontrée par [Martin et al. \[2007\]](#). Le SRM possède une fréquence d'échantillonnage de 10 Hz et il mesure la puissance mécanique produite (SRM P , W) et la cadence de pédalage (SRM Cad , rpm).

La procédure de calibration du SRM a été réalisée avant chaque test en accord avec les recommandations du fabricant. A partir de la méthode de [Ravier et al. \[2004\]](#) et [Bertucci et al. \[2005b\]](#), la détermination du braquet a été réalisée lors d'un court exercice (< 15 s) à une cadence de pédalage de 50 rpm pour atteindre une puissance calculée au préalable en fonction de la masse du sujet.

Après un échauffement standardisé, les sujets ont exécuté dans un ordre randomisé 3 sprints (~7s) sur le home-trainer SRM contre 3 résistances : 0,4, 0,6 et 0,8 Nkg⁻¹. La position de départ était standardisée, les sujets étaient en position assise, et ils ont commencé leurs sprints avec le même membre inférieur. La manivelle était placée à environ 45° vers l'avant [[Martin et al., 1998](#)].

Chaque résistance de pédalage représente une force propulsive (SRM F , N) appliquée sur la pédale en fonction de la cadence de pédalage qui est calculée à partir de l'équation suivante :

$$\text{SRM } F = \frac{\text{SRM } P}{l \omega} \quad (38)$$

Où l (m) est la longueur de la manivelle (0,175 m), et ω (rads⁻¹) est la vitesse angulaire de la manivelle. La force maximale théorique (SRM F_0 , N) et la cadence maximale théorique (SRM v_0 , rpm) ont été déterminées pour les 3 résistances, à partir de la relation Force – Cadence [e.g., [Ravier et al., 2004](#) ; [Bertucci et al., 2005b](#)]. La puissance maximale (SRM P_{MAX} , W) et la cadence optimale de pédalage (SRM v_{Opt} , rpm) sont enregistrées.

2.1.1.3. Analyses statistiques

Pour l'analyse des données, une matrice de corrélation de Bravais – Pearson est réalisée entre des données anthropométriques (i.e., m_c , AM_{Cuisse} , 1RM et $1RMm_c^{-1}$), les données maximales individuelles issues du Myotest lors du test en ½ Squat concentrique (i.e., $\text{Myo } P_{\text{MAX}}$, $\text{Myo } P_{\text{MAX}}m_c^{-1}$, $\text{Myo } P_{\text{moy}}$, $\text{Myo } P_{\text{moy}}m_c^{-1}$, $\text{Myo } v_0$, $\text{Myo } F_0$ et $\text{Myo } F_0m_c^{-1}$), les données issues du Myotest pour le Squat Jump ($h_{\text{SJ MAX}}$, $\text{SJ } P_{\text{MAX}}$, $\text{SJ } P_{\text{MAX}}m_c^{-1}$, $\text{SJ } P_{\text{moy}}$ et $\text{SJ } P_{\text{moy}}m_c^{-1}$) et les données issues des tests de « Force – Vitesse » avec SRM (i.e., $\text{SRM } P_{\text{MAX}}$, $\text{SRM } P_{\text{MAX}}m_c^{-1}$, $\text{SRM } v_0$, $\text{SRM } F_0$ et $\text{SRM } F_0m_c^{-1}$). Cette matrice de corrélation est réalisée à l'aide du logiciel Statistica 7.1 (StatSoft, France). Le niveau de significativité est fixé à $p < 0,05$. Les données sont présentées comme Valeur moyenne $\pm$ Ecart-Type.

2.1.2. RÉSULTATS

2.1.2.1. Données anthropométriques et 1RM

Les données anthropométriques des sujets et les valeurs moyennes du 1RM en ½ Squat ainsi que le ratio moyen du 1RM sur la masse corporelle sont indiqués dans le [Tableau III-4](#).

Tableau III-4 – Données anthropométriques et 1RM en ½ Squat d'un échantillon de cyclistes sur route (n=10). Valeurs moyennes $\pm$ Ecart-Type.

h_c (m)	1,79	$\pm$	0,05
m_c (kg)	65,8	$\pm$	5,5
% MG	10,7	$\pm$	4,0
AM_{Cuisse} (cm ²)	124,3	$\pm$	15,3
1RM (kg)	92,0	$\pm$	14,6
$1RMm_c^{-1}$	1,4	$\pm$	0,2

h_c : Hauteur corporelle ; m_c : masse corporelle ; MG : Masse grasse corporelle ; AM_{Cuisse} : Aire de section musculaire de la cuisse ; 1RM : Charge maximale dynamique.

2.1.2.2. Profil musculaire inertiel avec incrémentation de la charge en ½ squat concentrique

Pour cet échantillon de cyclistes sur route, les vitesses optimales maximales en phase concentrique lors du ½ Squat ($Myo v_{\text{MAX}}$, ms⁻¹) sont comprises entre $1,69 \pm 0,23$ ms⁻¹ à 15% de 1RM et $1,15 \pm 0,18$ ms⁻¹ à 80% de 1RM. $Myo v_{\text{MAX}}$ à 15% du 1RM est significativement plus grande ($p < 0,05$) que les vitesses atteintes avec les charges relatives 40, 50, 60, 70 et 80 % de 1RM. La relation $Ch_{\text{rel}} - Myo v_{\text{MAX}}$ montre une linéarité significative ($p < 0,01$) d'équation ($r = 0,99$) :

$$Myo v_{\text{MAX}} = -0,7968 Ch_{\text{rel}} + 1,7845 \quad (39)$$

Les vitesses optimales moyennes lors de la phase concentrique du ½ Squat ($Myo v_{\text{moy}}$, ms⁻¹) sont comprises entre $0,83 \pm 0,13$ ms⁻¹ à 15% de 1RM et $0,50 \pm 0,09$ ms⁻¹ à 80% de 1RM ([Figure III-14](#)). $Myo v_{\text{moy}}$ à 15% du 1RM est significativement plus grande ($p < 0,05$) que les vitesses atteintes avec les autres charges relatives au 1RM. La relation $Ch_{\text{rel}} - Myo v_{\text{moy}}$ montre une linéarité significative ($p < 0,01$) d'équation ($r = 0,98$) :

$$\text{Myo } v_{\text{moy}} = -0,4871 Ch_{\text{rel}} + 0,9122 \quad (40)$$

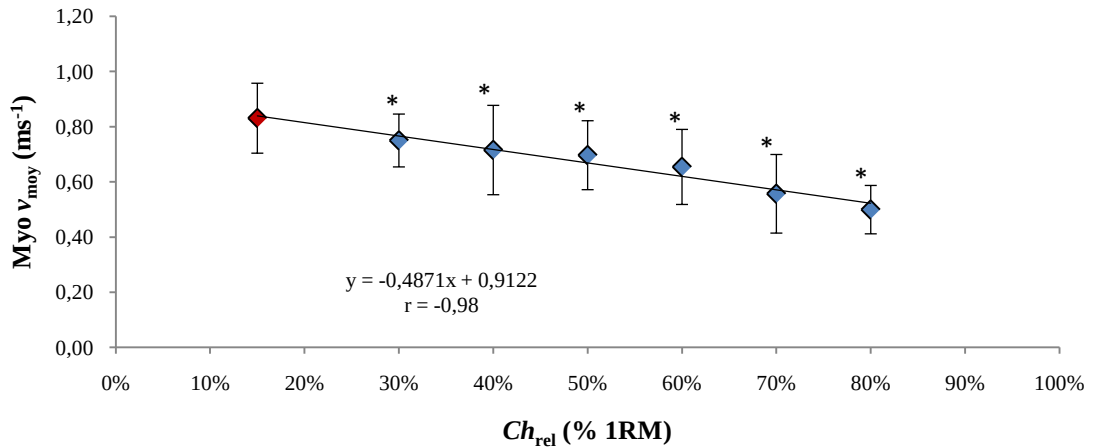


Figure III-14 – Vitesses moyennes ($\text{Myo } v_{\text{moy}}$, ms^{-1}) en fonction des différentes charges relatives au 1RM en $\frac{1}{2}$ Squat lors de la phase concentrique (Ch_{rel} , % 1RM). *Différence significative ($p < 0,05$) avec la Ch_{rel} 15% de 1RM.

Pour cet échantillon de cyclistes sur route, les forces optimales maximales en phase concentrique lors du $\frac{1}{2}$ Squat ($\text{Myo } F_{\text{MAX}}$, N) sont comprises entre 1099 ± 87 N à 15% de 1RM et 1666 ± 149 N à 80% de 1RM. $\text{Myo } F_{\text{MAX}}$ à 80% du 1RM est significativement plus grande ($p < 0,01$) que les forces développées avec les autres charges relatives au 1RM. La relation $Ch_{\text{rel}} - \text{Myo } F_{\text{MAX}}$ montre une linéarité significative ($p < 0,01$) d'équation ($r = 0,99$) :

$$\text{Myo } F_{\text{MAX}} = 883,83 Ch_{\text{rel}} + 963,33 \quad (41)$$

Les forces moyennes lors de la phase concentrique du $\frac{1}{2}$ Squat ($\text{Myo } F_{\text{moy}}$, N) sont comprises entre 700 ± 51 N à 15% de 1RM et 1274 ± 102 N à 80% de 1RM (Figure III-15). $\text{Myo } F_{\text{moy}}$ à 80% du 1RM est significativement plus grande ($p < 0,01$) que les forces développées avec les autres charges relatives au 1RM. La relation $Ch_{\text{rel}} - \text{Myo } F_{\text{moy}}$ montre une linéarité significative ($p < 0,01$) d'équation ($r = 1$) :

$$\text{Myo } F_{\text{moy}} = 882,39 Ch_{\text{rel}} + 567,78 \quad (42)$$

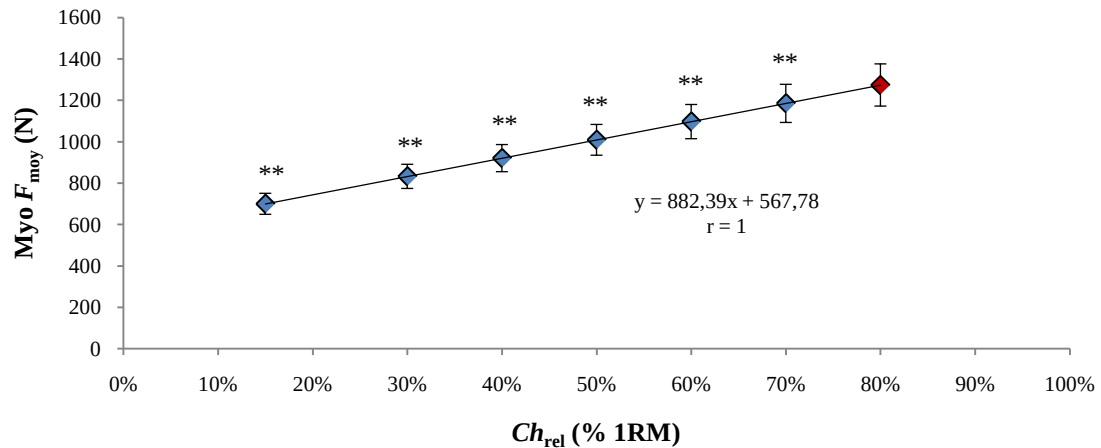


Figure III-15 – Forces moyennes (Myo F_{moy} , N) en fonction des différentes charges relatives au 1RM en $\frac{1}{2}$ Squat lors de la phase concentrique (Ch_{rel} , % 1RM). **Différence significative ($p < 0,01$) avec la Ch_{rel} 80% de 1RM.

Pour cet échantillon de cycliste, les puissances maximales produites lors de la phase concentrique du $\frac{1}{2}$ Squat (Myo P_{MAX} , W) sont comprises entre 1849 ± 255 W à 15% de 1RM et 1931 ± 423 W à 80% de 1RM, avec une Ch_{Opt} d'une valeur de 2018 ± 467 W à 60% de 1RM. Néanmoins, il n'existe pas de différence significative avec les autres Ch_{rel} . La relation $Ch_{\text{rel}} - \text{Myo } P_{\text{MAX}}$ peut être décrite selon une équation polynomiale du second degré ($r = 0,75$) :

$$\text{Myo } P_{\text{MAX}} = -410,81 Ch_{\text{rel}}^2 + 566,54 Ch_{\text{rel}} + 1756,5 \quad (43)$$

Pour chaque cycliste, les Ch_{Opt} maximales individuelles sont assez différentes, et elles se répartissent comme suit : 15% (2 sujets), 30% (1 sujet), 60% (3 sujets), 70% (2 sujets) et 80% (2 sujets), soit une Ch_{Opt} de $54,0 \pm 24,9$ % du 1RM pour une puissance maximale produite (Myo P_{MAX} , W) de 2270 ± 325 W.

Les puissances moyennes produites lors de la phase concentrique du $\frac{1}{2}$ Squat (Myo P_{moy} , W) sont comprises entre 582 ± 102 W à 15% de 1RM et 640 ± 139 W à 80% de 1RM, avec une Ch_{Opt} d'une valeur de 716 ± 153 W à 60% de 1RM (Figure III-16). Il existe une différence significative ($p < 0,05$) avec la Ch_{rel} 15% de 1RM. La relation $Ch_{\text{rel}} - \text{Myo } P_{\text{moy}}$

P_{moy} peut être décrite selon une équation polynomiale du second degré ($r = 0,92$) [Rahmani et al., 2001 ; Jidovtseff et al., 2009] :

$$\text{Myo } P_{\text{moy}} = -765,92 Ch_{\text{rel}}^2 + 843,04 Ch_{\text{rel}} + 460,17 \quad (44)$$

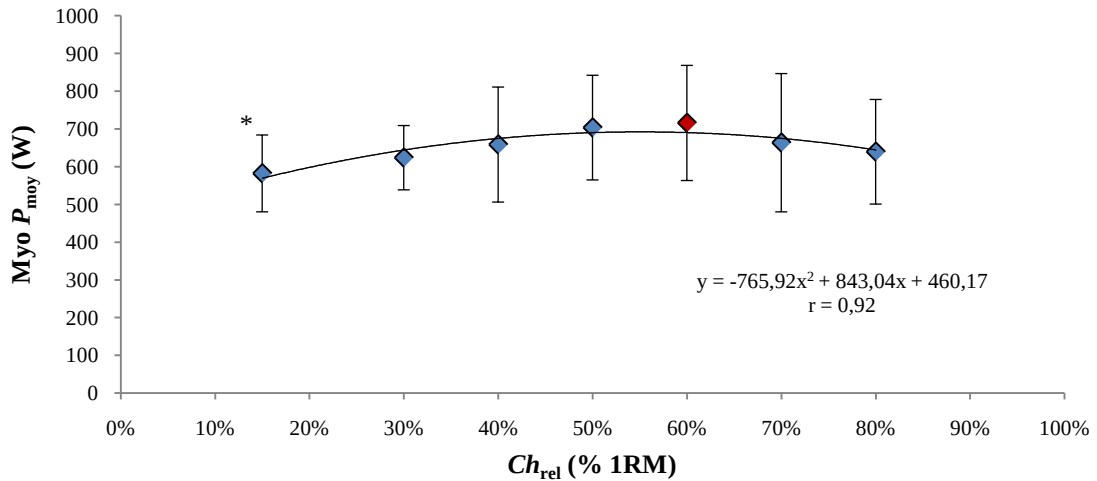


Figure III-16 – Puissances moyennes produites ($\text{Myo } P_{\text{moy}}$, W) en fonction des différentes charges relatives au 1RM en $\frac{1}{2}$ Squat lors de la phase concentrique (Ch_{rel} , % 1RM). *Différence significative ($p < 0,05$) avec la Ch_{rel} 60% de 1RM.

Pour chaque cycliste, les Ch_{Opt} moyennes individuelles sont assez différentes, et elles se répartissent comme suit : 30% (1 sujet), 40% (2 sujets), 50% (2 sujets), 60% (3 sujets), 70% (1 sujets) et 80% (1 sujets), soit une Ch_{Opt} de $54,0 \pm 15,1$ % du 1RM pour une puissance moyenne produite ($\text{Myo } P_{\text{moy}}$) de 805 ± 99 W.

La vitesse maximale théorique moyenne ($\text{Myo } v_0$, ms^{-1}) et la force maximale théorique moyenne ($\text{Myo } F_0$, N) sont égales à $1,25 \pm 0,30$ ms^{-1} et 2406 ± 812 N, respectivement. Les rapports $\text{Myo } v_{\text{Opt}} \text{ Myo } v_0^{-1}$ et $\text{Myo } F_{\text{Opt}} \text{ Myo } F_0^{-1}$ sont égales à $0,65 \pm 0,17$ et $0,46 \pm 0,09$, respectivement.

La Figure III-17 présente un exemple de relations $Ch_{\text{rel}} - \text{Myo } v$ et $Ch_{\text{rel}} - \text{Myo } P$ définies à l'aide d'un profil musculaire inertiel pour un cycliste sur route lors d'un mouvement de $\frac{1}{2}$ Squat concentrique. A partir de ce profil, il est possible d'obtenir pour un athlète, P_{MAX} , v_{Opt} et Ch_{Opt} et v_0 . En considérant qu'une qualité musculaire se

développe à partir d'un entraînement à 80% de sa valeur maximale [Jidovtseff et al., 2009], ces auteurs définissent 4 zones principales d'entraînements à partir de la valeur de puissance correspondant à 80% de P_{MAX} : 1) la vitesse ; 2) la puissance – vitesse ; 3) la puissance – force ; et 4) la force. Chaque zone d'entraînement est définie par des valeurs de Ch_{rel} propres à l'athlète testé.

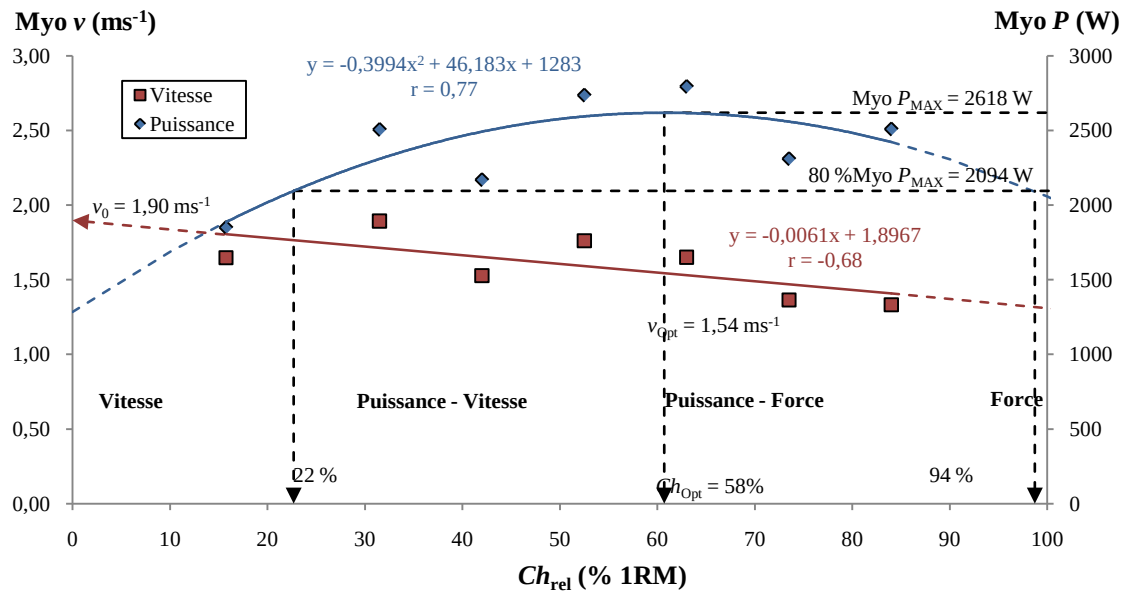


Figure III-17 – Exemple de relations Charge relative – Vitesse et Charge relative – Puissance définies à partir du profil musculaire inertiel lors d'un mouvement de ½ Squat concentrique d'un cycliste sur route. Myo : Myotest ; v : Vitesse ; P : Puissance ; Ch_{rel} : Charge relative au 1RM ; v_0 : Vitesse maximale théorique ; Ch_{Opt} : Charge optimale ; v_{Opt} : Vitesse optimale.

2.1.2.3. Saut vertical

Lors du test de saut vertical (SJ), la hauteur maximale de saut (SJ h_{MAX}) moyenne atteinte par les sujets est égale à $0,33 \pm 0,05$ m. Lors de la phase concentrique de poussée, la vitesse optimale (SJ v_{Opt}) moyenne atteinte est $2,33 \pm 0,21$ ms⁻¹, la force optimale (SJ F_{Opt}) moyenne développée est 1299 ± 170 N, la force maximale relative à la masse corporelle (SJ $F_{MAX}m_c^{-1}$) est $19,9 \pm 3,2$ Nkg⁻¹. La puissance maximale produite (SJ P_{MAX}) est 3052 ± 502 W et la puissance maximale relative à la masse corporelle (SJ $P_{MAX}m_c^{-1}$) est

$46,7 \pm 8,6 \text{ Wkg}^{-1}$. La puissance moyenne produite ($\text{SJ } P_{\text{moy}}$) est $703 \pm 86 \text{ W}$ et la puissance moyenne relative à la masse corporelle ($\text{SJ } P_{\text{moy}} m_c^{-1}$) est $10,7 \pm 1,1 \text{ Wkg}^{-1}$.

2.1.2.4. Tests de « Force – Vitesse » sur cyclo-wattmètre

Pour chaque sujet, $\text{SRM } P_{\text{MAX}}$ et $\text{SRM } v_{\text{Opt}}$ (Figure III-18A) ainsi que $\text{SRM } F_0$ et $\text{SRM } v_0$ (Figure III-18B) sont déterminées à partir de la relation $\text{SRM } v - \text{SRM } P$ et de la relation $\text{SRM } v - \text{SRM } F$, respectivement.

Pour cet échantillon de cycliste, la force maximale ($\text{SRM } F_{\text{MAX}}$) moyenne développée au cours de ces tests de « Force – Vitesse » sur bicyclette ergométrique est égale à $524 \pm 50 \text{ N}$. La force maximale relative à la masse corporelle ($\text{SRM } F_{\text{MAX}} m_c^{-1}$) est égale à $8,0 \pm 0,6 \text{ Nkg}^{-1}$. La vitesse maximale de pédalage ($\text{SRM } v_{\text{MAX}}$) atteinte au cours de ces tests est égale à $146 \pm 9 \text{ rpm}$. La puissance maximale ($\text{SRM } P_{\text{MAX}}$) moyenne est égale à $1004 \pm 106 \text{ W}$. La puissance maximale relative à la masse corporelle ($\text{SRM } P_{\text{MAX}} m_c^{-1}$) moyenne est égale à $15,3 \pm 1,9 \text{ Wkg}^{-1}$. La vitesse de pédalage optimale ($\text{SRM } v_{\text{Opt}}$) moyenne est égale à $121 \pm 16 \text{ rpm}$.

La vitesse maximale théorique ($\text{SRM } v_0$) et la force maximale théorique ($\text{SRM } F_0$) moyennes ont été déterminées à partir de la relation $\text{SRM } v - \text{SRM } F$ (Figure III-18B), et les valeurs moyennes ($\pm$ Ecart-Type) sont égales à $264 \pm 32 \text{ rpm}$ et $824 \pm 115 \text{ N}$, respectivement.

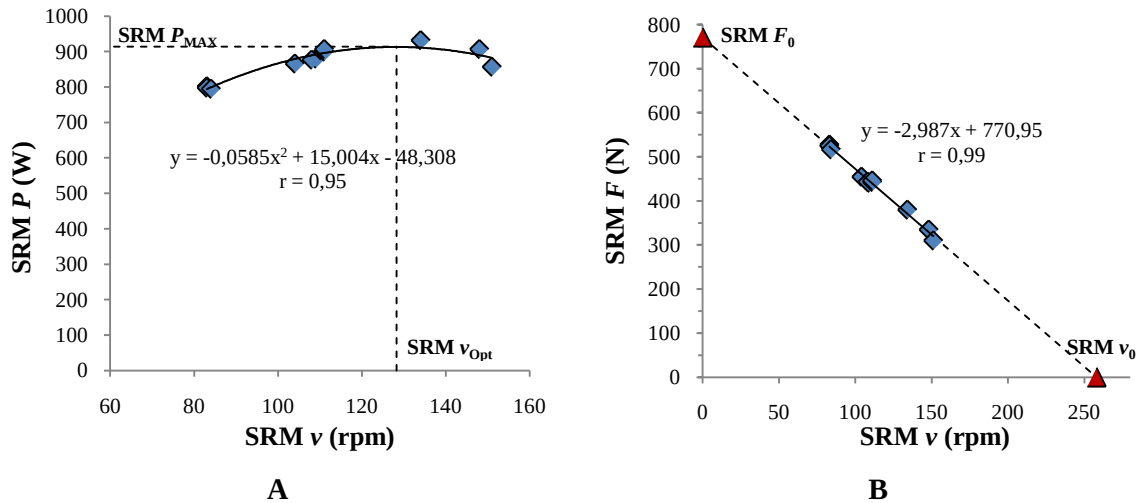


Figure III-18 – Relation typique entre la vitesse de pédalage (SRM v , rpm) et la puissance (SRM P , W) produite au cours de trois sprints contre des résistances de 0,4, 0,6 et 0,8 Nkg⁻¹ sur bicyclette ergométrique.

Les données individuelles maximales moyennes obtenues lors de ces 3 tests (*i.e.*, P_{MAX} , $P_{MAX}m_c^{-1}$, P_{moy} , $P_{moy}m_c^{-1}$, F_0 , $F_0m_c^{-1}$, v_0 et h_{MAX}) sont regroupées dans le [Tableau III-5](#).

Tableau III-5 – Valeurs individuelles maximales $\pm$ Ecart-Type des variables principales mesurées lors de tests sur un échantillon de cyclistes sur route ($n = 10$).

	Myo	SRM	SJ
P_{MAX} (W)	2270 $\pm$ 325	1004 $\pm$ 106	3052 $\pm$ 502
$P_{MAX}m_c^{-1}$ (Wkg ⁻¹)	34,9 $\pm$ 6,4	15,4 $\pm$ 2,0	46,7 $\pm$ 8,6
P_{moy} (W)	805 $\pm$ 99	-	703 $\pm$ 86
$P_{moy}m_c^{-1}$ (Wkg ⁻¹)	12,3 $\pm$ 1,9	-	10,7 $\pm$ 1,1
F_0 (N)	2406 $\pm$ 812	824 $\pm$ 115	-
$F_0m_c^{-1}$ (Nkg ⁻¹)	36,7 $\pm$ 12,2	12,6 $\pm$ 1,9	-
v_0 (ms ⁻¹ ou rpm)	1,25 $\pm$ 0,30 ms ⁻¹	264 $\pm$ 32 rpm	-
h_{MAX} (m)	-	-	0,33 $\pm$ 0,05

Myo : 1/2 Squat réalisé mesuré à l'aide d'un Myotest® ; SRM : Tests de « Force – Vitesse » mesurés à l'aide d'un SRM ; SJ : Squat Jump ; P_{MAX} : Puissance maximale produite ; $P_{MAX}m_c^{-1}$: Puissance maximale relative à la masse corporelle ; P_{moy} : Pic de Puissance moyenne produite ; $P_{moy}m_c^{-1}$: Pic de puissance moyenne relative à la masse corporelle ; F_0 : Force maximale moyenne théorique ; $F_0m_c^{-1}$: Force maximale moyenne théorique relative à la masse corporelle ; v_0 : Vitesse maximale moyenne théorique ; h_{MAX} : Hauteur de saut maximale.

2.1.2.5. Corrélations

Les corrélations entre les données anthropométriques (*i.e.*, m_c , 1RM, $1RMm_c^{-1}$ et AM_{Cuisse}) et les données issues du Myotest lors du test en ½ Squat avec incrémentation de la charge (*i.e.*, Myo P_{MAX} , Myo $P_{MAX}m_c^{-1}$, Myo P_{moy} , Myo $P_{moy}m_c^{-1}$, Myo v_0 , Myo F_0 et Myo $F_0m_c^{-1}$), les données issues du Myotest pour le Squat Jump (SJ h_{MAX} , SJ P_{MAX} , SJ $P_{MAX}m_c^{-1}$, SJ P_{moy} et SJ $P_{moy}m_c^{-1}$) et les données issues des tests de « Force – Vitesse » avec SRM (*i.e.*, SRM P_{MAX} , SRM $P_{MAX}m_c^{-1}$, SRM v_0 , SRM F_0 , SRM $F_0m_c^{-1}$) sont présentées dans le [Tableau III-6](#).

La matrice de corrélation montre des fortes corrélations significatives ($p < 0,05$) entre m_c et Myo $P_{MAX}m_c^{-1}$ ($r = -0,72$), entre 1RM et Myo P_{moy} ($r = -0,88$) et Myo $P_{moy}m_c^{-1}$ ($r = 0,66$), entre $1RMm_c^{-1}$ et Myo $P_{moy}m_c^{-1}$ ($r = 0,92$), Myo v_0 ($r = 0,71$) et SRM P_{MAX} ($r = -0,72$) et entre AM_{Cuisse} et SRM $P_{MAX}m_c^{-1}$ ($r = 0,73$) et SRM v_0 ($r = 0,69$).

Tableau III-6 – Matrice de corrélations des données anthropométriques et des données issues du Myotest pour les tests du profil musculaire inertiel et de Squat Jump, et du SRM pour les tests de « Force – Vitesse ».

	m_c (kg)	1RM (kg)	$1RMm_c^{-1}$	AM_{Cuisse} (cm ²)
Myo P_{MAX} (W)	-0,35	-0,09	0,09	0,36
Myo P_{moy} (W)	0,49	0,88*	0,59	0,24
Myo $P_{MAX}m_c^{-1}$ (Wkg⁻¹)	-0,72*	-0,15	0,23	0,12
Myo $P_{moy}m_c^{-1}$ (Wkg⁻¹)	-0,54	0,66*	0,92*	-0,02
Myo F_0 (N)	0,09	0,33	0,28	0,12
Myo $F_0m_c^{-1}$ (Nkg⁻¹)	-0,15	0,30	0,38	0,08
Myo v_0 (ms⁻¹)	0,06	-0,31	-0,35	0,13
SRM P_{MAX} (W)	0,06	0,02	0,01	0,73*
SRM $P_{MAX}m_c^{-1}$ (Wkg⁻¹)	-0,60	-0,08	0,26	0,39
SRM F_0 (N)	0,20	0,32	0,24	0,69*
SRM $F_0m_c^{-1}$ (Nkg⁻¹)	-0,36	0,22	0,43	0,47
SRM v_0 (rpm)	-0,32	-0,49	-0,32	-0,23
SJ h_{MAX} (m)	-0,33	0,03	0,20	0,28
SJ P_{MAX} (W)	0,03	0,32	0,27	0,17
SJ P_{moy} (W)	0,56	0,57	0,25	-0,06
SJ $P_{MAX}m_c^{-1}$ (Wkg⁻¹)	-0,43	0,18	0,38	0,01
SJ $P_{moy}m_c^{-1}$ (Wkg⁻¹)	-0,16	0,52	0,58	-0,26

*Seuil de significativité : $p < 0,05$. m_c (kg) : masse corporelle ; 1RM (kg) : Charge maximale pour 1 unique répétition ; AM_{Cuisse} (cm²) : Aire de section musculaire de la cuisse ; P_{MAX} (W) : Puissance maximale ; P_{moy} (W) : Puissance moyenne maximale ; F_0 (N) : Force maximale moyenne théorique ; v_0 (ms⁻¹ ou rpm) : Vitesse maximale moyenne théorique ; SJ : Squat Jump ; h_{MAX} (m) : Hauteur de saut maximale.

Les corrélations entre les variables mesurées lors d'un ½ Squat à l'aide du Myotest® et celles mesurées lors des tests de « Force – Vitesse » avec SRM sont présentées dans le [Tableau III-7](#). La matrice de corrélation montre des fortes corrélations significatives ($p < 0,05$) entre $Myo P_{MAX}m_c^{-1}$ et $SRM P_{MAX}m_c^{-1}$ ($r = 0,68$) et entre $Myo P_{moy}m_c^{-1}$ et $SRM F_0m_c^{-1}$ ($r = 0,64$). Aucune corrélation significative n'a été observée entre $Myo F_0$, $Myo F_0m_c^{-1}$ et $Myo v_0$ et les variables issues des mesures SRM.

Tableau III-7 – Matrice de corrélations des données issues du Myotest pour les tests du profil musculaire inertiel et du SRM pour les tests de « Force – Vitesse ».

	SRM P_{MAX} (W)	SRM $P_{MAX}m_c^{-1}$ (Wkg ⁻¹)	SRM F_0 (N)	SRM $F_0m_c^{-1}$ (Nkg ⁻¹)	SRM v_0 (rpm)
Myo P_{MAX} (W)	0,49	0,58	0,19	0,31	0,36
Myo P_{moy} (W)	0,28	-0,08	0,56	0,27	-0,59
Myo $P_{MAX}m_c^{-1}$ (Wkg⁻¹)	0,31	0,68*	0,01	0,37	0,45
Myo $P_{moy}m_c^{-1}$ (Wkg⁻¹)	0,22	0,54	0,36	0,64*	-0,27
Myo F_0 (N)	0,46	0,31	0,22	0,17	0,05
Myo $F_0m_c^{-1}$ (Nkg⁻¹)	0,45	0,46	0,20	0,29	0,09
Myo v_0 (ms⁻¹)	-0,25	-0,28	-0,24	-0,31	0,23

*Seuil de significativité : $p < 0,05$. m_c (kg) : masse corporelle ; P_{MAX} (W) : Puissance maximale ; P_{moy} (W) : Puissance moyenne maximale ; F_0 (N) : Force maximale moyenne théorique ; v_0 (ms⁻¹ ou rpm) : Vitesse maximale moyenne théorique.

Les corrélations entre les variables mesurées lors d'un ½ Squat et celles mesurées lors de Squat Jump à l'aide du Myotest[®] sont présentées dans le [Tableau III-8](#). La matrice de corrélation montre une forte corrélation significative ($p < 0,05$) entre Myo $P_{MAX}m_c^{-1}$ et SJ $P_{MAX}m_c^{-1}$ ($r = 0,68$). Il n'existe aucune corrélation significative parmi toutes les variables mesurées en ½ Squat et en Squat Jump lors de la phase concentrique.

Tableau III-8 – Matrice de corrélations des données issues du Myotest (Myo) pour les tests du profil musculaire inertiel et du Squat Jump (SJ).

	SJ h_{MAX} (m)	SJ P_{MAX} (W)	SJ P_{moy} (W)	SJ $P_{MAX}m_c^{-1}$ (Wkg ⁻¹)	SJ $P_{moy}m_c^{-1}$ (Wkg ⁻¹)
Myo P_{MAX} (W)	0,56	0,51	-0,48	0,62	-0,28
Myo P_{moy} (W)	0,00	0,28	0,53	0,00	0,24
Myo $P_{MAX}m_c^{-1}$ (Wkg⁻¹)	0,57	0,39	-0,61	0,68*	-0,13
Myo $P_{moy}m_c^{-1}$ (Wkg⁻¹)	0,32	0,22	-0,05	0,42	0,40
Myo F_0 (N)	-0,18	0,24	-0,01	0,14	-0,07
Myo $F_0m_c^{-1}$ (Nkg⁻¹)	-0,09	0,21	-0,13	0,23	-0,01
Myo v_0 (m·s⁻¹)	0,13	0,14	-0,18	0,12	-0,31

*Seuil de significativité : $p < 0,05$. m_c (kg) : masse corporelle ; P_{MAX} (W) : Puissance maximale ; P_{moy} (W) : Puissance moyenne maximale ; F_0 (N) : Force maximale moyenne théorique ; v_0 (ms⁻¹) : Vitesse maximale moyenne théorique ; h_{MAX} (m) : Hauteur de saut maximale.

Les corrélations entre les variables mesurées lors des tests de « Force – Vitesse » avec SRM et celles mesurées lors de Squat Jump à l'aide d'un Myotest[®] sont présentées dans le [Tableau III-9](#). La matrice de corrélation montre une forte corrélation significative ($p <$

0,05) entre SRM $P_{MAX}m_c^{-1}$ et SJ h_{MAX} ($r = 0,71$). Aucune autre corrélation significative n'a été observée entre les variables issues des tests « Force – Vitesse » et les variables issues des mesures en Squat Jump.

Tableau III-9 – Matrice de corrélations des données issues du SRM pour les tests de « Force – Vitesse » (SRM) et du Myotest pour le Squat Jump (SJ).

	SRM P_{MAX} (W)	SRM $P_{MAX}m_c^{-1}$ (Wkg ⁻¹)	SRM F_0 (N)	SRM $F_0m_c^{-1}$ (Nkg ⁻¹)	SRM v_0 (rpm)
SJ h_{MAX} (m)	0,59	0,71*	0,46	0,60	0,06
SJ P_{MAX} (W)	0,33	0,24	0,03	-0,02	0,44
SJ P_{moy} (W)	-0,14	-0,42	0,16	-0,11	-0,49
SJ $P_{MAX}m_c^{-1}$ (Wkg ⁻¹)	0,25	0,47	-0,10	0,12	0,58
SJ $P_{moy}m_c^{-1}$ (Wkg ⁻¹)	-0,16	0,04	0,09	0,23	-0,35

*Seuil de significativité : $p < 0,05$. m_c (kg) : masse corporelle ; P_{MAX} (W) : Puissance maximale ; P_{moy} : Puissance moyenne maximale ; F_0 (N) : Force maximale moyenne théorique ; v_0 (ms⁻¹) : Vitesse maximale moyenne théorique ; Cad_0 (rpm) : Cadence maximale théorique ; h_{MAX} (m) : Hauteur de saut maximale.

2.1.3. DISCUSSIONS

De nombreuses études se sont intéressées à la puissance produite lors de mouvement poly-articulaires tels que le ½ Squat [e.g., Izquierdo et al., 1999 ; 2001 ; 2002 ; Rahmani et al., 2001 ; Siegel et al., 2002 ; Cormie et al. 2007b] et le SJ [Bosco et al., 1995 ; Dauty et al., 2002 ; Morin et Belli, 2003 ; Markovic et al., 2004 ; Bouhrel et al., 2006 ; Cormie et al., 2007a], et à la relation entre les performances lors de tests « Force – Vitesse » et lors de SJ [Vandewalle et al., 1987 ; Hautier et al., 1996] mais aucune étude ne s'est encore intéressée à la relation entre des tests de « Force – Vitesse » et un profil musculaire inertiel.

Les corrélations

Les résultats principaux de cette étude concernant les corrélations entre les données anthropométriques et les données des différents tests réalisés (Tableau III-6) montrent que le 1RM est positivement et significativement corrélé à Myo P_{moy} ($r = 0,88$) et Myo $P_{moy}m_c^{-1}$ ($r = 0,66$). Cette corrélation montre que plus les sujets auront un 1RM élevé, plus la

puissance moyenne produite sera grande. Un 1RM élevé suppose une force développée plus importante et une vitesse plus importante à des charges relatives plus faibles [Zatsiorsky et Kraemer, 2006]. Jidovstev et al. [2010] ont montré qu'il existait une relation significative entre le 1RM sur un exercice et la relation Force – Vitesse moyenne sur cet exercice. Et les résultats de cette étude tendent à montrer que cet échantillon de cycliste a développé une puissance moyenne avec une composante de vitesse plus importante que la composante de force :

$$Myo P_{\text{moy}} = 0,65v_0 \ 0,46F_0 \quad (45)$$

Vandewalle et al. [1987] ont trouvé que la puissance maximale en pédalage lors de tests « Force – Vitesse » était produite avec une force de friction et une vitesse correspondant à $0,5F_0$ et $0,5v_0$, respectivement. La différence de résultats peut s'expliquer par le faible niveau des cyclistes sur route en ½ Squat ($1RM = 92,0 \pm 14,6$ kg), le manque d'entraînement sur cet exercice a pu influencer les performances. Le fait que $Myo F_0$, $SRM F_0$, $SRM P_{MAX}$ et $SRM P_{MAX}m_c^{-1}$ ne soient pas corrélées avec le 1RM démontrent également la faible expérience dans l'entraînement de musculation, et le manque de transfert dans l'activité de cyclisme. De même AM_{Cuisse} est positivement et significativement corrélée avec $SRM P_{MAX}$ et $SRM F_0$ mais pas avec $Myo P_{MAX}$, $Myo P_{\text{moy}}$ et $Myo F_0$. Newton [1997] a rapporté que la production de puissance musculaire était dépendante de l'aire de section musculaire puisque la concentration d'actine et de myosine par aire de section musculaire est constante, et donc que le nombre de pont d'union par unité d'aire musculaire est constant. Le fait qu'il n'y ait pas de corrélations montre clairement que les cyclistes n'ont pas pu exploiter optimalement la production de puissance musculaire des membres inférieurs dans un mouvement tel que le ½ Squat.

Puisque la force musculaire, l'aire de section musculaire de la cuisse et la masse corporelle élevée à la puissance 0,67 sont proportionnelles [Challis, 2004], la relation entre

AM_{Cuisse} et $m_c^{0,67}$ de cet échantillon de cyclistes sur route est présentée en Figure III-19.

Elle montre une relation linéaire significative ($p < 0,05$) de corrélation $r = 0,68$.

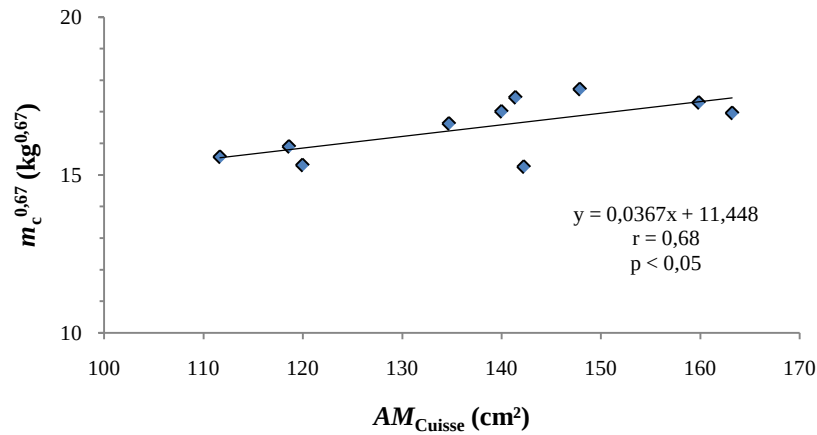


Figure III-19 – Relation entre l’aire de section musculaire de la cuisse (AM_{Cuisse} , cm^2) et la masse corporelle élevée à la puissance 0,67 ($m_c^{0,67}$, $\text{kg}^{0,67}$) chez des cyclistes sur route ($n = 10$).

Et puisque l’aire de section musculaire de la cuisse et la puissance maximale développée lors d’un test « Force – Vitesse » sont significativement ($p < 0,05$) et positivement corrélées ($r = 0,73$) (Figure III-20).

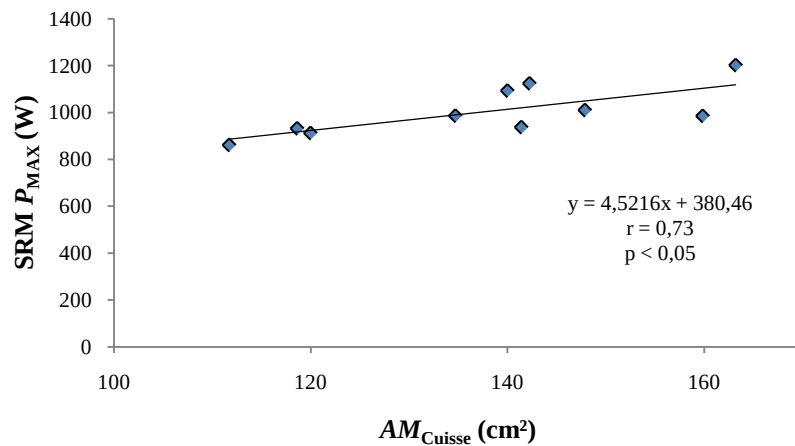


Figure III-20 – Relation entre l’aire de section musculaire des cuisses (AM_{Cuisse} , cm^2) et la puissance maximale produite lors d’un test « Force – Vitesse » ($SRM P_{\text{MAX}}$, W) chez des cyclistes sur route ($n = 10$).

En utilisant ces deux relations pour cet échantillon de cyclistes sur route, il est possible d’estimer le gain en puissance maximale lors du pédalage pour un gain d’aire de section musculaire et donc de masse corporelle selon les deux équations suivantes :

$$m_c^{0,67} = 0,0367 AM_{\text{Cuisse}} + 11,448 \quad (46)$$

$$SRM P_{\text{MAX}} = 4,5216 AM_{\text{Cuisse}} + 380,46 \quad (47)$$

Pour un cycliste de m_c égale à 68,4 kg et avec une AM_{Cuisse} de 150 cm², un gain de 10% d' AM_{Cuisse} engendrerait un gain de m_c de 3,3 kg. Ce gain d' AM_{Cuisse} se traduirait par un gain de 6,4 % de $SRM P_{\text{MAX}}$. [Kraemer et Ratamess \[2004\]](#) ont rapporté que les gains en hypertrophie musculaire, et donc de section musculaire, étaient optimums à des charges de 70-80% de 1RM comparé à des pourcentages travaillant essentiellement la force. La zone du profil musculaire inertiel représentant la « Puissance – Force » permettrait un travail en hypertrophie musculaire.

Concernant les corrélations entre les données mesurées en ½ Squat et les données mesurées lors des tests de « Force – Vitesse » ([Tableau III-7](#)), la corrélation significative entre $Myo P_{\text{MAX}} m_c^{-1}$ et $SRM P_{\text{MAX}} m_c^{-1}$ signifie qu'une amélioration de la puissance moyenne relative à la masse corporelle grâce à un entraînement de musculation en ½ Squat permettrait un gain de puissance maximale lors du pédalage :

$$SRM P_{\text{MAX}} m_c^{-1} = 0,2115 Myo P_{\text{MAX}} m_c^{-1} + 7,9836 \quad (48)$$

[Sleivert et Taingahue \[2004\]](#) ont observé une corrélation significative entre la puissance moyenne relative à la masse corporelle en ½ Squat concentrique avec saut et le temps sur les 5 premiers mètres d'un sprint. Et [Bertucci et al. \[2007\]](#) ont montré une corrélation significative entre la puissance moyenne en Squat Jump et la performance chronométrique sur les 5 premiers mètres lors d'un départ sur une piste de BMX. Ces corrélations avec la puissance produite lors de variantes du Squat concentrique sont dues à la nécessité de produire une grande puissance lors de sprints avec départ arrêté et la similarité entre l'amplitude du mouvement et les groupes musculaires impliqués. De plus, la corrélation significative entre $Myo P_{\text{moy}} m_c^{-1}$ et $SRM F_0 m_c^{-1}$ indique que l'amélioration de la production de puissance grâce à un entraînement en Squat permettrait de développer

SRM $F_0 m_c^{-1}$, cela permettrait ainsi d'effectuer de meilleurs départs arrêté ou des accélérations plus fortes en cyclisme.

Concernant les corrélations entre les données du ½ Squat et les données issues du Squat Jump ([Tableau III-8](#)), la corrélation significative entre Myo $P_{MAX} m_c^{-1}$ et SJ $P_{MAX} m_c^{-1}$ indique la possibilité d'utiliser le saut vertical comme un indicateur du niveau de puissance des athlètes. Les corrélations entre les données de Squat Jump et les données issues du test « Force – Vitesse » avec SRM ([Tableau III-9](#)), montrent qu'une corrélation positive et significative existe entre SJ h_{MAX} et SRM $P_{MAX} m_c^{-1}$. [Vandewalle et al. \[1987\]](#) ont rapporté également une corrélation ($r = 0,84$) entre la hauteur de saut et la puissance maximale relative produite à la masse corporelle sur cyclo-wattmètre. Ainsi que [Hautier et al. \[1996\]](#) qui ont trouvé une corrélation significative ($p < 0,01$) entre la hauteur de saut verticale et la puissance maximale produite relative à la masse corporelle sur cyclo-wattmètre ($r = 0,87$) et la cadence optimale de pédalage ($r = 0,86$). La hauteur maximale de saut est liée principalement à l'impulsion, et celle-ci est fortement corrélée à la puissance musculaire [[Knudson, 2009](#)]. Ces résultats suggèrent que l'amélioration de performance due à l'entraînement de musculation et à l'entraînement spécifique en cyclisme pourrait être observée et quantifiée à l'aide de la performance en saut vertical. Le test de Squat Jump est standardisé, et il est facilement réalisable sur le terrain. De plus, il ne nécessite que peu de matériels puisque des équations existent pour déterminer la hauteur de saut et la puissance moyenne développée [[Samozino et al., 2009](#)].

Le profil musculaire inertiel en ½ Squat concentrique

Les Ch_{Opt} permettant de générer les puissances maximale et moyenne pour cet échantillon de cyclistes sur route sont $54,0 \pm 24,9$ % du 1RM et $54,0 \pm 15,1$ % du 1RM, respectivement, pour une P_{MAX} et une P_{moy} égales à 2270 ± 325 W et à 805 ± 99 W, respectivement. [Izquierdo et al. \[2002\]](#) ont établi que Ch_{Opt} était 45% du 1RM chez des

cyclistes sur route pour une P_{moy} égale à 498 ± 110 W. Cette différence de valeur de puissance moyenne peut s'expliquer par la méthode de calcul. [Izquierdo et al. \[2002\]](#) ne précisent pas dans leur étude si la masse corporelle des sujets est incluse dans la détermination de la puissance moyenne, cela expliquerait les valeurs plus faibles de P_{moy} [[Dugan et al., 2004](#)]. [Cormie et al. \[2007b\]](#) ont déterminé pour le ½ Squat une Ch_{Opt} de 56% du 1RM, avec aucune différence significative pour les charges relatives de 42 et 71% du 1RM chez des sujets footballeurs (US), sprinters et sauteurs en longueurs pour une P_{MAX} de 3235 ± 453 W. Dans cette étude, la méthode de détermination de P_{MAX} est identique à celle utilisée pour les cyclistes sur route. Le ½ Squat était effectué avec un contre mouvement, et les sujets dans l'étude de [Cormie et al. \[2007b\]](#) avaient un 1RM et un $1RMm_c^{-1}$ moyens en ½ Squat supérieurs comparé aux cyclistes de cette étude, $170,38 \pm 21,72$ vs. $92,0 \pm 14,6$ kg et $1,91 \pm 0,22$ vs. $1,4 \pm 0,2$, respectivement. Pour [Zink et al. \[2006\]](#), la plus grande valeur de puissance a été associée à 40 et 50% du 1RM pour une P_{MAX} , néanmoins aucune différence significative entre les puissances aux différentes charges relatives n'a été démontrée. De même, [Siegel et al. \[2002\]](#) ont rapporté, pour un ½ Squat avec contre-mouvement, que la Ch_{Opt} était 60% du 1RM, sans différences significatives avec des valeurs élevées de puissance entre 50 et 80% du 1RM pour une P_{MAX} d'environ 1000 W (extrapolée selon une figure de cette étude). Néanmoins ces auteurs ne précisent pas distinctement comment la puissance est déterminée, si elle est moyenne ou maximale, et si la masse des sujets est incluse dans le calcul. Enfin, [Izquierdo et al. \[1999\]](#) ont étudié la puissance produite en ½ Squat dans deux groupes de sujets d'âge différent (40 et 65 ans). Ces auteurs ont constaté que les Ch_{Opt} étaient 60 et 70% du 1RM dans les groupes de sujets âgés de 40 ans et 65 ans, respectivement pour une P_{moy} de 486 ± 20 W et 391 ± 28 W, respectivement. Comme pour [Izquierdo et al. \[2002\]](#), la méthode de

détermination de la puissance manque de précisions. Concernant le ½ Squat, les résultats de cette étude sont en accord avec les résultats issus de la littérature.

Le test de détente verticale

Concernant le Squat Jump, la hauteur de saut atteinte par les cyclistes sur route est $0,33 \pm 0,05$ m. [Hautier et al. \[1996\]](#) ont trouvé une valeur moyenne similaire (SJ $h_{MAX} = 31,7 \pm 6,6$ cm) chez des athlètes entraînés pour le cyclisme et le sprint. La puissance maximale produite lors de ces sauts verticaux est supérieure à la puissance maximale produite lors du ½ Squat (3052 ± 502 W vs. 2270 ± 325 W, respectivement). Ce résultat est en accord avec les résultats de la littérature, le SJ sans charge additionnelle maximise la production de puissance [[McBride et al., 1999](#) ; [Markovic et al., 2004](#) ; [Cormie et al., 2007a](#) ; [Samozino et al., 2008](#) ; [Dayne et al., 2010](#)]. Cela est dû au fait que lors d'un SJ, la capacité d'accélération du corps de l'athlète est améliorée [[Cormie et al., 2007b](#)]. [Newton et al. \[1996\]](#) expliquent ce phénomène en ayant comparé au développé couché, deux modes d'exécutions explosives : avec lancer de barre et sans. Ils ont montré que la plus faible production de puissance lors d'un développé couché sans lancer de barre en fin de mouvement résultait d'une plus importante phase de décélération avant que la barre stoppe à la fin de la phase concentrique. Cette action a engendré une force et une vitesse plus faibles accompagnées par une diminution de l'activation musculaire des agonistes comparée à la condition avec lancer de barre, dans laquelle la barre est accélérée sur toute la phase concentrique jusqu'à la projection de la barre.

Les tests « Force – Vitesse »

Concernant les tests « Force – Vitesse » réalisés sur cyclo-wattmètre, ils permettent de déterminer de manière directe les propriétés mécaniques musculaires des membres inférieurs lors d'efforts de très courtes durées (< 7 s) [[Morin et al., 2002](#)]. Les résistances

de friction choisies permettent aux sujets de développer des valeurs optimales de force et de vitesse, ainsi que de développer des puissances maximales sur cyclo-wattmètre [Vandewalle et al., 1987 ; Morin et al., 2002]. Les résultats obtenus lors de ces tests sont en accord avec ceux de Ravier et al. [2004] sur un échantillon de karatéka, compétiteurs de haut-niveau. Concernant $P_{MAX}m_c^{-1}$, les cyclistes sur route de cette étude ont développé $15,4 \pm 2,0 \text{ Wkg}^{-1}$ contre $11,6 \pm 1,6 \text{ Wkg}^{-1}$ pour les karatékas, à une v_{Opt} égale à $121 \pm 16 \text{ rpm}$ vs. $126,5 \pm 11,7 \text{ rpm}$, respectivement. Cette légère différence peut être due à la spécificité de la pratique sportive des cyclistes, et à leur maîtrise du pédalage. Morin et al. [2002] et Hautier et al. [1996] ont montré des résultats similaires lors d'un test de « Force – Vitesse » chez des sujets spécialistes de disciplines de sprint et de cyclisme, respectivement. Morin et al. [2002] ont rapporté une $P_{MAX}m_c^{-1}$ égale à $11 \pm 1 \text{ Wkg}^{-1}$ pour une v_{Opt} de $119 \pm 2 \text{ rpm}$. Et Hautier et al. [1996] ont rapporté une $P_{MAX}m_c^{-1}$ égale $14,36 \pm 2,37 \text{ Wkg}^{-1}$ pour une v_{Opt} de $120 \pm 8 \text{ rpm}$.

Optimisation des performances par l'entraînement

Les résultats principaux de cette étude ont montré les liens entre le 1RM en ½ Squat et Myo P_{moy} , entre AM_{Cuisse} et SRM F_0 , SRM P_{MAX} et entre Myo $P_{MAX}m_c^{-1}$ et SRM $P_{MAX}m_c^{-1}$. Ces corrélations montrent qu'un gain en force musculaire et en hypertrophie des membres inférieurs permettraient d'améliorer la performance en cyclisme.

Un entraînement orienté vers ses objectifs pourrait être réalisé en musculation. En s'appuyant sur le profil musculaire inertiel obtenu pour chacun des sujets (Figure III-21), il est possible de définir des zones d'entraînements personnalisées pour augmenter la performance en force des cyclistes : i) une zone « Vitesse » qui permet de développer essentiellement la vitesse de contraction des muscles sollicités ; ii) une zone « Puissance – Vitesse » qui permet d'augmenter la puissance maximale à une résistance relativement

faible ; iii) une zone « Puissance – Force » qui permet d’augmenter la puissance maximale à une résistance relativement élevée ; et iv) une zone « Force » qui permet d’augmenter la force maximale.

Dans l’exemple en [Figure III-21](#), pour développer sa production de puissance musculaire en ½ Squat concentrique, ce cycliste sur route pourra travailler avec des charges relatives allant de 22 à 94 % de son 1RM actuel. Néanmoins, entre 22 et 58 % de 1RM, il développera essentiellement une puissance avec une prédominance de la vitesse, et entre 58 et 94 % une puissance avec une prédominance de la force. Et au-delà de 94% du 1RM, le travail musculaire portera essentiellement sur la force maximale.

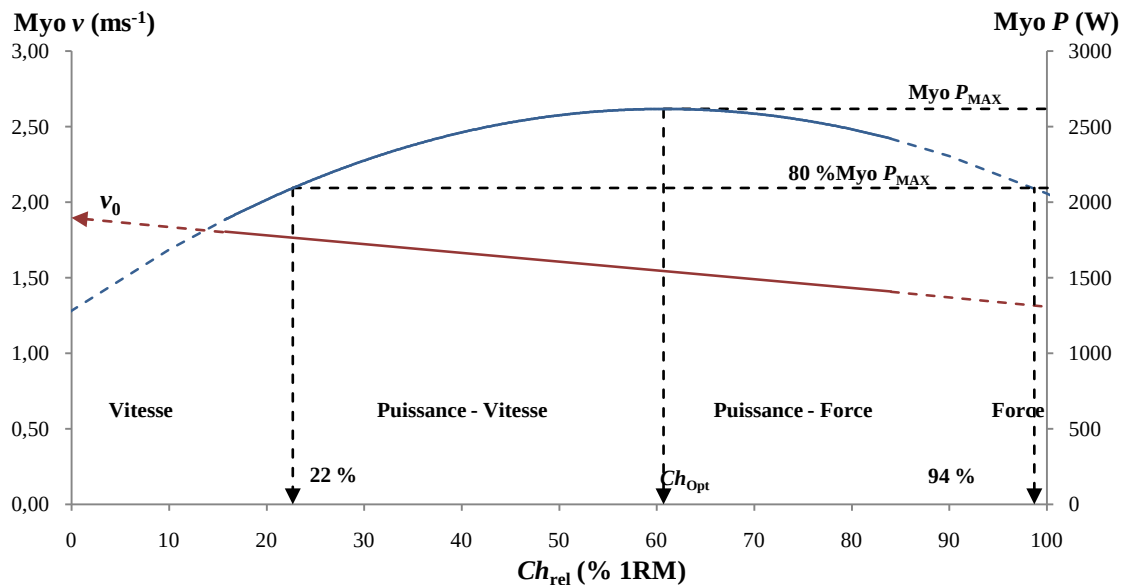


Figure III-21 – Exemple de zones d’entraînements selon un profil inertiel musculaire pour un cycliste sur route.

Pour améliorer la force musculaire maximale dynamique en ½ Squat, le travail en musculation devra se baser sur des charges lourdes en multiples séries de 1-6 répétitions [[Kraemer et Ratamess, 2004](#)]. [Campos et al. \[2002\]](#) ont montré qu’un groupe exécutant 4 séries de 3-5 répétitions maximales avec 3 minutes de repos inter-séries obtenait des gains en force maximale significativement ($p < 0,05$) plus grands en Squat comparé à un groupe

exécutant 3 séries de 6-11 répétitions maximales avec 2 minutes de repos inter-séries, sur une période de 4 semaines avec 3 entraînements par semaine.

Pour hypertrophier les muscles, [Kraemer et Ratamess \[2004\]](#) indiquent que l'entraînement optimal pour une hypertrophie musculaire est composé de multiples séries de 10-12 répétitions avec un repos entre les séries faibles (*e.g.*, 60s). Néanmoins [Campos et al. \[2002\]](#) ont montré un gain en hypertrophie des fibres musculaires de type I, IIA et IIB chez deux groupes qui s'entraînaient selon deux manières différentes, 4 séries de 3-5 répétitions avec 3 minutes de repos pour le premier et 3 séries de 9-11 répétitions avec 2 minutes de repos pour le second. Cette zone d'entraînement de 10-12 répétitions correspond à la zone de « Puissance – Force ».

Pour des gains de force et d'hypertrophie musculaire des membres inférieurs chez des cyclistes sur route, un entraînement de force devrait être combiné à un entraînement visant l'hypertrophie musculaire. Cette combinaison pourrait se réaliser dans la séance, en commençant par un travail à charge élevée sur un exercice poly-articulaire, comme le Squat (*e.g.*, 5 séries de 5 répétitions avec 3 minutes de repos inter-séries) et en complétant la séance avec 2 autres exercices pour les membres inférieurs à des charges plus modérées (*e.g.*, 4 séries de 10-12 répétitions avec 1 minute 30 secondes de repos inter-séries).

De plus, le pédalage étant action unilatérale, il serait intéressant d'intégrer des exercices unilatéraux pour éviter un déficit bilatéral de force. Même si celui-ci n'est pas totalement démontré chez des cyclistes [[Rønnestad et al., 2010](#)].

2.1.4. CONCLUSION

Le principal résultat de cette étude est le lien significatif entre la production de puissance musculaire lors de sprints courts sur cyclo-wattmètre et lors d'un mouvement de musculation. Les corrélations significatives montrent qu'un entraînement en musculation

régulier pourrait permettre une amélioration de la performance en cyclisme pour les efforts maximaux de courte durée ($< 6s$). Les corrélations ont montré également qu'un gain en masse musculaire au niveau des cuisses permettrait un gain de puissance maximale lors du pédalage.

L'évaluation inertielle de la production de puissance musculaire lors d'un mouvement de Squat nécessite un entraînement régulier au préalable. Car la technique et la coordination musculaire dans les mouvements de type Squat sont des facteurs qui influenceront les performances. Pour des sujets qui n'auraient pas l'habitude de tels exercices, des tests sur machine à charge guidée serait peut-être préférable.

Il serait toutefois utile d'étudier longitudinalement l'effet d'un entraînement de musculation régulier en puissance maximale pour les membres inférieurs en se basant sur les profils musculaires inertiels individuels pour choisir les charges d'entraînement en fonction de l'objectif.

2.2. DETERMINANTS MUSCULAIRE DE LA PERFORMANCE EN BMX

2.2.1. METHODES EXPERIMENTALES

2.2.1.1. Sujets

Dix pilotes de BMX masculins de niveau régional à national ont participé à cette étude. Les valeurs moyennes ($\pm$ Ecart-Type) de l'âge, la hauteur corporelle (h_c , m), de la masse corporelle (m_c , kg) et de la masse grasse exprimée en pourcentage de la masse corporelle totale (MG, %) sont 17 ($\pm$ 3) ans, 1,76 ($\pm$ 0,05) m, 66,5 ($\pm$ 8,1) kg et 13,8 ($\pm$ 2,9) %, respectivement.

2.2.1.1.1. Données anthropométriques et composition corporelle

La hauteur corporelle (h_c) et la masse corporelle (m_c) des sujets ont été mesurées sans chaussures et avec uniquement un short d'entraînement, à l'aide d'un stadiomètre (modèle 220, Seca, Allemagne), et à l'aide d'un pèse-personne électronique à affichage digital (modèle BF-350, Tanita, Japon), respectivement. Le pourcentage de masse grasse corporelle est déterminé selon la méthode décrite dans le Chapitre [III.2.1](#).

2.2.1.2. Protocole

Pour chaque sujet, cette étude s'est conduite en deux sessions. Durant la première session, un profil inertiel musculaire de la production de puissance avec incrémentation de la charge lors d'un exercice de ½ Squat concentrique [[Jidovtseff et al., 2008b](#) ; [2009](#)] et un test de détente verticale ont été réalisés.

Durant la seconde session, un test de « Force – Vitesse » et un test de Wingate sur cyclo-wattmètre sont effectués dans un ordre randomisé pour chaque sujet. Un

échauffement général et spécifique a été réalisé avant chaque test et 15 minutes de repos ont été accordées entre les tests.

2.2.1.2.1. Profil musculaire inertiel avec incrémentation de la charge en ½ Squat concentrique

Lors d'un exercice de ½ Squat concentrique, les sujets ont réalisé, dans un ordre randomisé, une répétition à différentes charges absolues (Ch_{abs} , kg) (*i.e.*, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 et 100 kg) avec un repos de 5 minutes entre chaque essai.

Avec une barre sur les épaules, les sujets ont eu pour instruction de fléchir les membres jusqu'à un angle de genou d'environ 90° entre le fémur et le tibia. Dans cette position, une instruction est donnée de rester immobile jusqu'à un signal sonore. A ce signal, les sujets doivent exécuter le mouvement le plus rapidement possible sur toute la phase concentrique. Il était permis de sauter avec la barre à la fin de la phase concentrique.

Durant tous les tests, l'accélération de la barre a été mesurée à l'aide d'un accéléromètre 2 axes (Myotest SA, Suisse) (Figure III-12) fixée sur la barre. La validité du Myotest® a auparavant été démontrée par Jidovtseff et al. [2008a]. La fréquence d'échantillonnage est de 500 Hz.

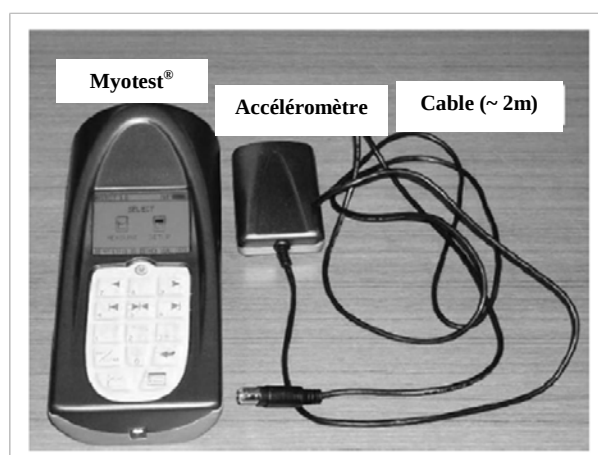


Figure III-22 – Accéléromètre 2 axes Myotest® (Myotest SA, Suisse).

Avant chaque test, l'orientation des axes de l'accéléromètre est étalonnée en posant l'accéléromètre verticalement sur une surface plane nivelée. $Myo\ v$, $Myo\ F$ et $Myo\ P$ sont déterminées selon la méthode décrite dans le Chapitre III.2.1.

2.2.1.2.2. Test de détente verticale (« Squat Jump »)

Les sujets ont réalisé deux « Squat Jump » (SJ), le temps de récupération entre chaque saut était de 3 min environ. Le départ du saut s'effectue en position genoux fléchis à 90° , avec les mains placées sur les hanches pour éviter tout mouvement de balancier avec les bras.

Lors de ces sauts, la hauteur de saut maximale (SJ h_{MAX} , m), la puissance moyenne produite (SJ P_{moy} , W) et la puissance moyenne produite relative à la masse corporelle (SJ $P_{moy}m_c^{-1}$, Wkg^{-1}) ont été calculées à partir du temps de suspension en l'air (t_s , s) mesurée à l'aide de du système Optojump (Microgate SLR, Italie) (Figure III-23). 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 III-23 – Le système Optojump (Microgate SLR, Italie)

Selon les lois fondamentales de la dynamique [Samozino et al., 2008], il est possible d'obtenir la hauteur maximale de saut à partir de t_s :

$$SJ h_{MAX} = \frac{1}{8} g t_s^2 \quad (49)$$

A partir de $SJ h_{MAX}$ et en utilisant la formule de Lewis [Harman et al., 1991], il est possible d'estimer $SJ P_{moy}$:

$$SJ P_{moy} = \sqrt{\frac{g}{2}} m_c g \sqrt{SJ h_{MAX}} \quad (50)$$

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

2.2.1.2.3. Tests de « Force – Vitesse » et de Wingate sur cyclo-wattmètre

Pour les tests de « Force – Vitesse » et de Wingate, un système PowerTap (modèle Professional, CycleOps, Etats-Unis) (Figure III-24), valide et reproductible [Gardner et al. 2004 ; Bertucci et al. 2005a], a été utilisé pour mesurer la production de puissance mécanique maximale durant les tests de « Force – Vitesse » ($FV P_{MAX}$, W) et la production de puissance mécanique moyenne durant le test de Wingate ($WIN P_{moy}$, W).



Figure III-24 – PowerTap , modèle Professional, CycleOps, Etats-Unis

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 est alors obtenue par le produit du couple moteur (C , Nm) et de la vitesse angulaire (ω , rads^{-1}) de la roue arrière. Une calibration a été effectuée avant chaque test.

Lors des tests de « Force – Vitesse », les sujets ont réalisé 1 sprint contre une charge légère de $0,4 \text{ Nkg}^{-1}$ de masse corporelle et 1 sprint contre une charge élevée de $0,8 \text{ Nkg}^{-1}$ de masse corporelle. Pour le test de Wingate, les sujets ont réalisé 1 sprint contre une charge lourde de $0,8 \text{ Nkg}^{-1}$.

Après un échauffement standardisé, les sujets ont exécuté dans un ordre randomisé les 2 sprints de « Force – Vitesse » ($\sim 6\text{s}$). Après un repos de 15 minutes, ils ont ensuite réalisé le test de Wingate ($\sim 30\text{s}$). Les tests ont été réalisés en position assise sur le cyclo-wattmètre. La position de départ était standardisée, et ils ont commencé leurs sprints avec le même membre inférieur. La manivelle était placée à environ 45° vers l'avant [Martin et al., 1998].

2.2.1.3. Analyses statistiques

Pour l'analyse des données, une matrice de corrélation de Bravais – Pearson est réalisée entre les données maximales individuelles issues du Myotest lors du test en $\frac{1}{2}$ Squat concentrique (*i.e.*, $\text{Myo } P_{\text{MAX}}$, $\text{Myo } P_{\text{MAX}}m_c^{-1}$, $\text{Myo } P_{\text{moy}}$, $\text{Myo } P_{\text{moy}}m_c^{-1}$, $\text{Myo } v_0$, $\text{Myo } F_0$ et $\text{Myo } F_0m_c^{-1}$), les données calculées à partir du Squat Jump ($h_{\text{SJ MAX}}$, $\text{SJ } P_{\text{moy}}$, $\text{SJ } P_{\text{moy}}m_c^{-1}$) et les données issues des tests de « Force – Vitesse » et de Wingate avec PowerTap (*i.e.*, $\text{FV } P_{\text{MAX}}$, $\text{FV } P_{\text{MAX}}m_c^{-1}$, $\text{WIN } P_{\text{moy}}$, $\text{WIN } P_{\text{moy}}m_c^{-1}$). Cette matrice de corrélation est réalisée à l'aide du logiciel Statistica 7.1 (StatSoft, France). Les relations significatives entre les variables sont examinées par analyses de régression linéaire et multiple. Le niveau de significativité est fixé à $p < 0,05$. Les données sont présentées comme Valeurs moyennes $\pm$ Ecart-Type.

2.2.2. RESULTATS

2.2.2.1. Profil musculaire inertiel avec incrémentation de la charge en ½ Squat concentrique

Pour cet échantillon de pilotes de BMX, les vitesses optimales maximales en phase concentrique lors du ½ Squat ($Myo v_{MAX}$, ms^{-1}) sont comprises entre $1,45 \pm 0,28 ms^{-1}$ à 10 kg et $0,63 \pm 0,20 ms^{-1}$ à 100 kg. $Myo v_{MAX}$ à 10 kg est significativement plus grande ($p < 0,05$) que les vitesses atteintes avec les charges absolues 40, 50, 60, 70, 80 et 90 kg. La relation $Ch_{abs} - Myo v_{MAX}$ montre une linéarité significative ($p < 0,01$) d'équation ($r = 0,99$) :

$$Myo v_{MAX} = -0,0116 Ch_{abs} + 2,5449 \quad (51)$$

Les vitesses optimales moyennes lors de la phase concentrique du ½ Squat ($Myo v_{moy}$, ms^{-1}) sont comprises entre $1,45 \pm 0,28 ms^{-1}$ à 10 kg et $0,63 \pm 0,20 ms^{-1}$ à 100 kg (Figure III-25). $Myo v_{moy}$ à 15% du 1RM est significativement plus grande ($p < 0,05$) que les vitesses atteintes avec les autres charges absolues. La relation $Ch_{abs} - Myo v_{moy}$ montre une linéarité significative ($p < 0,01$) d'équation ($r = 0,92$) :

$$Myo v_{moy} = -0,0076 Ch_{abs} + 1,3237 \quad (52)$$

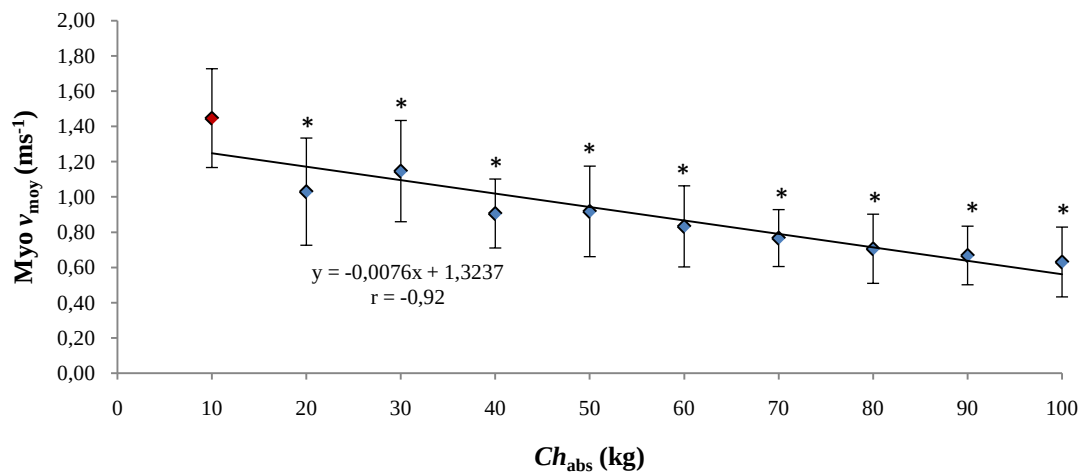


Figure III-25 – Vitesses moyennes ($Myo v_{moy}$, ms^{-1}) en fonction des différentes charges absolues en ½ Squat lors de la phase concentrique (Ch_{abs} , kg). *Différence significative ($p < 0,05$) avec la Ch_{abs} 10 kg.

Pour cet échantillon de pilotes de BMX, les forces optimales maximales en phase concentrique lors du ½ Squat ($Myo F_{MAX}$, N) sont comprises entre 1474 ± 227 N à 10 kg et 2293 ± 155 N à 100 kg. $Myo F_{MAX}$ à 100 kg est significativement plus grande ($p < 0,05$) que les forces développées avec les autres charges absolues exceptée 90 kg. La relation $Ch_{rel} - Myo F_{MAX}$ montre une linéarité significative ($p < 0,01$) d'équation ($r = 0,99$) :

$$Myo F_{MAX} = 9,1988 Ch_{abs} + 1316,1 \quad (53)$$

Les forces moyennes lors de la phase concentrique du ½ Squat ($Myo F_{moy}$, N) sont comprises entre 1413 ± 1731 N à 10 kg et 2136 ± 157 N à 100 kg (Figure III-26). $Myo F_{moy}$ à 100 kg du 1RM est significativement plus grande ($p < 0,05$) que les forces développées avec les autres charges relatives au 1RM exceptées 80 et 90 kg. La relation $Ch_{rel} - Myo F_{moy}$ montre une linéarité significative ($p < 0,01$) d'équation ($r = 0,97$) :

$$Myo F_{moy} = 8,1648 Ch_{rel} + 1210,4 \quad (54)$$

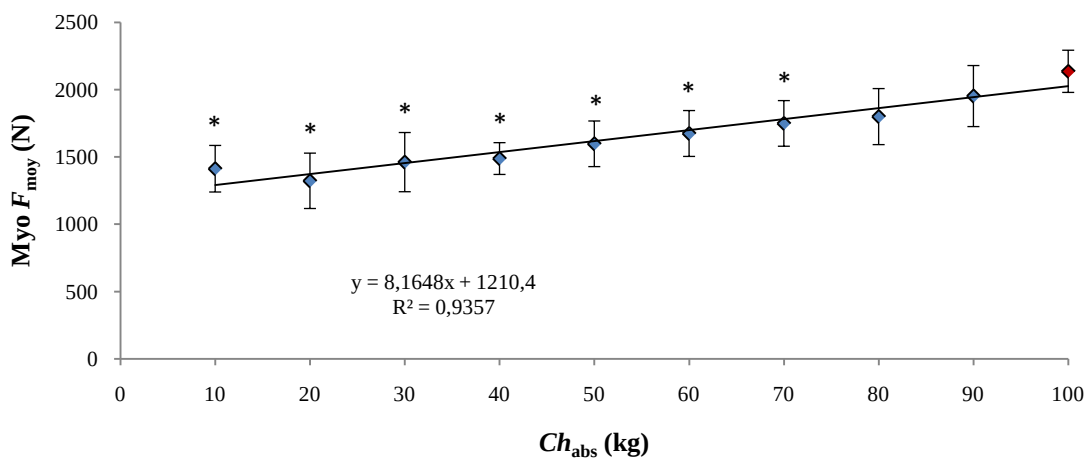


Figure III-26 – Forces moyennes ($Myo F_{moy}$, N) en fonction des différentes charges absolues en ½ Squat lors de la phase concentrique (Ch_{abs} , kg). *Différence significative ($p < 0,05$) avec la Ch_{abs} 100 kg.

Pour cet échantillon de pilotes de BMX, les puissances maximales produites lors de la phase concentrique du ½ Squat ($Myo P_{MAX}$, W) sont comprises entre 3564 ± 690 W à 10 kg et 3096 ± 121 W à 100 kg, avec une Ch_{Opt} d'une valeur de 3717 ± 1329 W à 30 kg. Néanmoins, il n'existe pas de différence significative avec les autres Ch_{abs} . La relation

Ch_{abs} – $Myo P_{MAX}$ peut être décrite selon une équation polynomiale du second degré ($r = 0,70$) :

$$Myo P_{MAX} = -0,0735 Ch_{abs}^2 + 4,0539 Ch_{abs} + 3474,5 \quad (55)$$

Pour chaque pilote, les Ch_{Opt} maximales individuelles sont assez différentes, et elles se répartissent comme suit : 30 kg (4 sujets), 40 kg (2 sujets), 50 kg (2 sujets), 60 kg (1 sujet) et 70 kg (1 sujet), soit une Ch_{Opt} de 43 ± 14 kg pour une puissance maximale produite ($Myo P_{MAX}$, W) de 4110 ± 1289 W.

Les puissances moyennes produites lors de la phase concentrique du $\frac{1}{2}$ Squat ($Myo P_{moy}$, W) sont comprises entre 2074 ± 577 W à 10 kg et 1361 ± 522 W à 100 kg, avec une Ch_{Opt} d'une valeur de 2074 ± 577 W à 10 kg (Figure III-27). Il existe une différence significative ($p < 0,05$) avec les autres Ch_{abs} excepté 30 et 100kg.

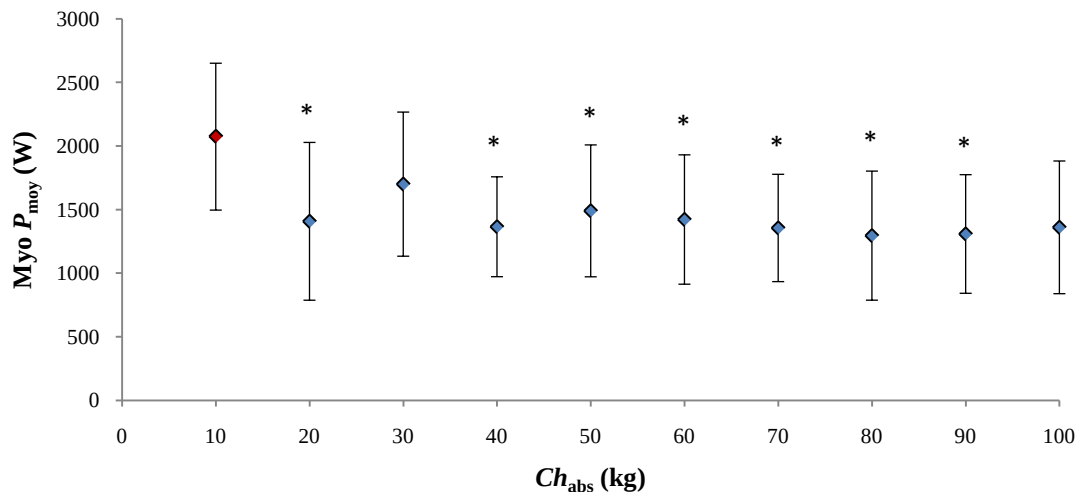


Figure III-27 – Puissances moyennes produites ($Myo P_{moy}$, W) en fonction des différentes charges absolues en $\frac{1}{2}$ Squat lors de la phase concentrique (Ch_{abs} , kg). *Différence significative ($p < 0,05$) avec la Ch_{abs} 10 kg.

Pour chaque pilote, les Ch_{Opt} moyennes individuelles sont assez différentes, et elles se répartissent comme suit : 10 kg (6 sujets), 20 kg (2 sujets), 40 kg (1 sujet) et 50 kg (1 sujet), soit une Ch_{Opt} de 19 ± 14 kg pour une puissance moyenne produite ($Myo P_{moy}$) de 2087 ± 567 W.

La vitesse maximale théorique moyenne ($\text{Myo } v_0, \text{ ms}^{-1}$) et la force maximale théorique moyenne ($\text{Myo } F_0, \text{ N}$) sont égales à $3,24 \pm 1,04 \text{ ms}^{-1}$ et $2387 \pm 320 \text{ N}$, respectivement. Les rapports $\text{Myo } v_{\text{Opt}} \text{ Myo } v_0^{-1}$ et $\text{Myo } F_{\text{Opt}} \text{ Myo } F_0^{-1}$ sont égales à $0,46 \pm 0,14$ et $0,62 \pm 0,07$, respectivement.

La Figure III-28 présente un exemple de relations $Ch_{\text{rel}} - \text{Myo } v$ et $Ch_{\text{rel}} - \text{Myo } P$ définies à l'aide d'un profil musculaire inertiel pour un pilote de BMX lors d'un mouvement de $\frac{1}{2}$ Squat concentrique.

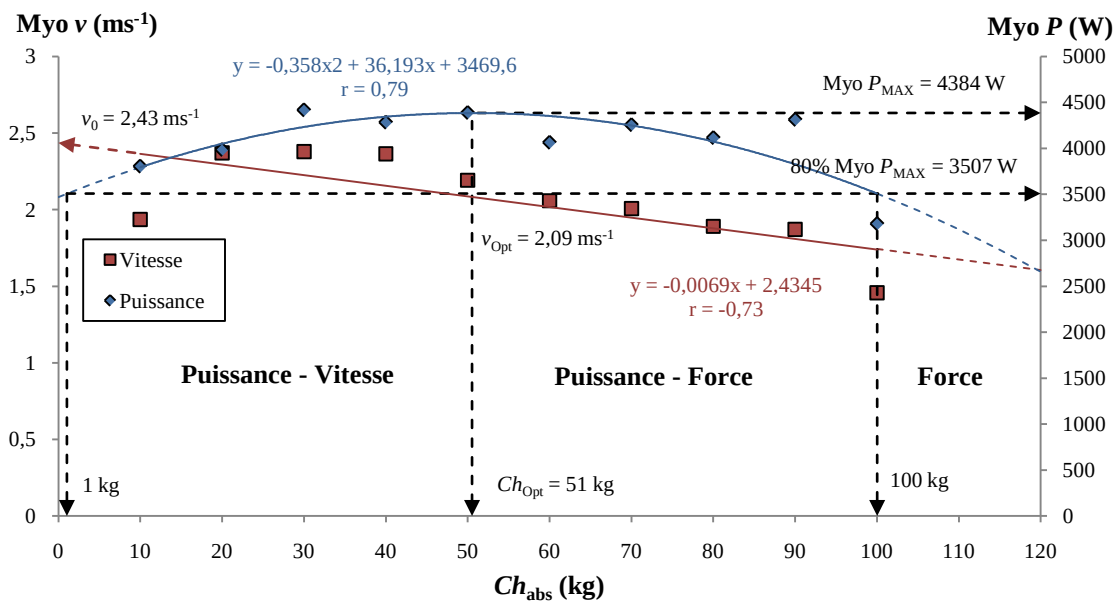


Figure III-28 - Exemple de relations Charge absolue – Vitesse et Charge absolue – Puissance définies à partir du profil musculaire inertiel lors d'un mouvement de $\frac{1}{2}$ Squat concentrique d'un pilote de BMX. Myo : Myotest ; v : Vitesse ; P : Puissance ; Ch_{abs} : Charge absolue ; v_0 : Vitesse maximale théorique ; Ch_{Opt} : Charge optimale ; v_{Opt} : Vitesse optimale.

2.2.2.2. Saut vertical

Lors du test de saut vertical (SJ), le temps de vol (t_s) est égal à $0,49 \pm 0,04 \text{ s}$, la hauteur maximale de saut ($\text{SJ } h_{\text{MAX}}$) moyenne atteinte par les sujets est égale à $0,30 \pm 0,04 \text{ m}$. La puissance moyenne produite ($\text{SJ } P_{\text{moy}}$) est $792 \pm 138 \text{ W}$ et la puissance moyenne relative à la masse corporelle ($\text{SJ } P_{\text{moy}} m_c^{-1}$) est $11,9 \pm 0,9 \text{ Wkg}^{-1}$.

2.2.2.3. Tests de « Force – Vitesse » et de Wingate sur cyclo-wattmètre

Lors des tests sur cyclo-wattmètre, la puissance maximale produite lors des tests « Force – Vitesse » (FV P_{MAX}) est égale à 1214 ± 304 W, la puissance maximale produite relative à la masse corporelle (FV $P_{MAX}m_c^{-1}$) est égale à $18,1 \pm 2,9$ Wkg⁻¹. Lors du test Wingate, la puissance moyenne produite (WIN P_{moy}) est égale à 820 ± 223 W, et la puissance moyenne produite relative à la masse corporelle (WIN $P_{moy}m_c^{-1}$) $12,2 \pm 2,2$ Wkg⁻¹.

Les données individuelles maximales moyennes obtenues lors de ces 3 tests (*i.e.*, P_{MAX} , $P_{MAX}m_c^{-1}$, P_{moy} , $P_{moy}m_c^{-1}$, F_0 , $F_0m_c^{-1}$, v_0 et h_{MAX}) sont regroupées dans le [Tableau III-5](#).

Tableau III-10 – Valeurs individuelles maximales $\pm$ Ecart-Type des variables principales mesurées lors de tests sur un échantillon de pilotes de BMX (n = 10).

	Myo	FV	WIN	SJ
P_{MAX} (W)	4110 $\pm$ 1289	1214 $\pm$ 304	-	-
$P_{MAX}m_c^{-1}$ (Wkg ⁻¹)	62,3 $\pm$ 21,2	18,1 $\pm$ 2,9	-	-
P_{moy} (W)	2087 $\pm$ 567	-	820 $\pm$ 223	792 $\pm$ 138
$P_{moy}m_c^{-1}$ (Wkg ⁻¹)	31,1 $\pm$ 6,8	-	12,2 $\pm$ 2,2	11,9 $\pm$ 0,9
F_0 (N)	2387 $\pm$ 320	-	-	-
$F_0m_c^{-1}$ (Nkg ⁻¹)	36,0 $\pm$ 3,4	-	-	-
v_0 (ms ⁻¹)	3,24 $\pm$ 1,04 m·s ⁻¹	-	-	-
h_{MAX} (m)	-	-	-	0,30 $\pm$ 0,04

Myo : 1/2 Squat réalisé mesuré à l'aide d'un Myotest® ; FV : Tests de « Force – Vitesse » mesurés à l'aide d'un PowerTap ; WIN : Test Wingate mesuré à l'aide d'un PowerTap ; SJ : Squat Jump ; P_{MAX} : Puissance maximale produite ; $P_{MAX}m_c^{-1}$: Puissance maximale relative à la masse corporelle ; P_{moy} : Puissance moyenne produite ; $P_{moy}m_c^{-1}$: Puissance moyenne relative à la masse corporelle ; F_0 : Force maximale moyenne théorique ; $F_0m_c^{-1}$: Force maximale moyenne théorique relative à la masse corporelle ; v_0 : Vitesse maximale moyenne théorique ; h_{MAX} : Hauteur de saut maximale.

2.2.2.4. Corrélations

Les corrélations entre les variables mesurées lors d'un ½ Squat en phase concentrique à l'aide du Myotest[®] et celles mesurées lors des tests de « Force – Vitesse » et de Wingate avec PowerTap sont présentées dans le [Tableau III-11](#). La matrice de corrélation montre des fortes corrélations significatives ($p < 0,05$) entre Myo F_0 et FV P_{MAX} ($r = 0,65$) et entre Myo F_0 et WIN P_{moy} ($r = 0,64$).

Tableau III-11 – Matrice de corrélations des données issues du Myotest (Myo) pour les tests du profil musculaire inertiel et du PowerTap pour les tests de « Force – Vitesse » (FV) et de Wingate (WIN).

	FV P_{MAX} (W)	FV $P_{MAX}m_c^{-1}$ (Wkg ⁻¹)	WIN P_{moy} (W)	WIN $P_{moy}m_c^{-1}$ (Wkg ⁻¹)
Myo P_{MAX} (W)	0,14	0,13	0,07	0,03
Myo P_{moy} (W)	0,45	0,14	0,39	0,08
Myo $P_{MAX}m_c^{-1}$ (Wkg ⁻¹)	-0,15	-0,05	-0,21	-0,15
Myo $P_{moy}m_c^{-1}$ (Wkg ⁻¹)	0,09	-0,12	0,02	-0,20
Myo F_0 (N)	0,65*	0,42	0,64*	0,43
Myo $F_0m_c^{-1}$ (Nkg ⁻¹)	-0,20	-0,09	-0,18	-0,08
Myo v_0 (ms ⁻¹)	0,15	0,03	0,12	-0,02

*Seuil de significativité : $p < 0,05$. m_c (kg) : masse corporelle ; P_{MAX} (W) : Puissance maximale ; P_{moy} (W) : Puissance moyenne maximale ; F_0 (N) : Force maximale moyenne théorique ; v_0 (m·s⁻¹ ou rpm) : Vitesse maximale moyenne théorique.

Les corrélations entre les variables mesurées lors d'un ½ Squat concentrique à l'aide du Myotest[®] et celles calculées pour le Squat Jump sont présentées dans le [Tableau III-12](#). La matrice de corrélation montre une forte corrélation significative ($p < 0,05$) entre Myo P_{MAX} et SJ h_{MAX} ($r = 0,65$), entre Myo P_{MAX} et SJ $P_{moy}m_c^{-1}$ ($r = 0,65$), entre Myo P_{moy} et SJ h_{MAX} ($r = 0,72$), entre Myo P_{moy} et SJ P_{moy} ($r = 0,82$), entre Myo P_{moy} et SJ $P_{moy}m_c^{-1}$ ($r = 0,73$), entre Myo $P_{moy}m_c^{-1}$ et SJ $P_{moy}m_c^{-1}$ ($r = 0,64$) et entre Myo F_0 et SJ P_{moy} ($r = 0,64$).

Tableau III-12 – Matrice de corrélations des données issues du Myotest (Myo) pour les tests du profil musculaire inertiel et du Squat Jump (SJ).

	SJ h_{MAX} (m)	SJ P_{moy} (W)	SJ $P_{moy}m_c^{-1}$ (Wkg ⁻¹)
Myo P_{MAX} (W)	0,65*	0,37	0,65*
Myo P_{moy} (W)	0,72*	0,82*	0,73*
Myo $P_{MAX}m_c^{-1}$ (Wkg⁻¹)	0,44	0,02	0,45
Myo $P_{moy}m_c^{-1}$ (Wkg⁻¹)	0,63	0,50	0,64*
Myo F_0 (N)	0,26	0,64*	0,25
Myo $F_0m_c^{-1}$ (Nkg⁻¹)	-0,34	-0,35	-0,36
Myo v_0 (ms⁻¹)	0,43	0,35	0,45

*Seuil de significativité : $p < 0,05$. m_c (kg) : masse corporelle ; P_{MAX} (W) : Puissance maximale ; P_{moy} (W) : Puissance moyenne maximale ; F_0 (N) : Force maximale moyenne théorique ; v_0 (m·s⁻¹) : Vitesse maximale moyenne théorique ; h_{MAX} (m) : Hauteur de saut maximale.

Les corrélations entre les variables mesurées lors d'un Squat Jump et lors de tests de « Force – Vitesse » et de Wingate sont présentées dans le [Tableau III-13](#). La matrice de corrélation montre une forte corrélation significative ($p < 0,05$) entre SJ P_{moy} et FV P_{MAX} ($r = 0,69$) et entre SJ P_{moy} et WIN P_{moy} ($r = 0,66$).

Tableau III-13 – Matrice de corrélations des données issues du PowerTap pour les tests de « Force – Vitesse » (FV) et de Wingate (WIN) et du Myotest pour le Squat Jump (SJ).

	FV P_{MAX} (W)	FV $P_{MAX}m_c^{-1}$ (Wkg ⁻¹)	WIN P_{moy} (W)	WIN $P_{moy}m_c^{-1}$ (Wkg ⁻¹)
SJ h_{MAX} (m)	0,23	-0,04	0,20	-0,06
SJ P_{moy} (W)	0,69*	0,35	0,66*	0,34
SJ $P_{moy}m_c^{-1}$ (Wkg⁻¹)	0,22	-0,05	0,19	-0,07

*Seuil de significativité : $p < 0,05$. m_c (kg) : masse corporelle ; P_{MAX} (W) : Puissance maximale ; P_{moy} : Puissance moyenne maximale ; F_0 (N) : Force maximale moyenne théorique ; v_0 (m·s⁻¹) : Vitesse maximale moyenne théorique ; Cad_0 (rpm) : Cadence maximale théorique ; h_{MAX} (m) : Hauteur de saut maximale.

2.2.3. DISCUSSIONS

Les corrélations

Concernant les corrélations entre données mesurées en ½ Squat lors de la phase concentrique et les données mesurées lors des tests de « Force – Vitesse » et de Wingate

sur cyclo-wattmètre, l'absence de corrélation entre Myo P_{MAX} , Myo P_{moy} et FV P_{MAX} et WIN P_{moy} pourrait s'expliquer par un manque d'expériences et d'entraînement en musculation, notamment dans l'exercice du ½ Squat concentrique.

Le [Tableau III-11](#) montrent que Myo F_0 est positivement et significativement corrélé ($p < 0,05$) à FV P_{MAX} ($r = 0,65$) et WIN P_{moy} ($r = 0,64$). Cette corrélation montre que plus la force maximale théorique moyenne développée lors d'une phase concentrique de ½ Squat est grande et plus les puissances maximales et moyennes produites, respectivement, lors des tests de « Force – Vitesse » et de Wingate seront importantes :

$$FV P_{MAX} = 0,6177 \text{ Myo } F_0 - 260,37 \quad (r = 0,65, p < 0,05) \quad (56)$$

$$WIN P_{moy} = 0,4458 \text{ Myo } F_0 - 244,34 \quad (r = 0,64, p < 0,05) \quad (57)$$

Ces résultats sont confirmés par le profil Force-Vitesse de cet échantillon de pilotes de BMX en ½ Squat, qui tend à montrer que ces athlètes ont développé une puissance moyenne avec une composante de force plus importante que la composante de vitesse :

$$\text{Myo } P_{moy} = 0,46v_0 + 0,62F_0 \quad (58)$$

Lors des tests « Force – Vitesse » et de Wingate sur cyclo-wattmètres, les départs sont réalisés à l'arrêt. Les pilotes doivent développer une force plus importante lors des premiers coups de pédales pour vaincre l'inertie. Cela correspond exactement au départ de compétition en BMX. Or [Bertucci et al. \[2007\]](#) ont montré que les puissances maximales produites lors de tests de « Force – Vitesse » étaient significativement corrélées à la performance chronométrique lors d'un départ de type compétition en BMX. Il semble donc important d'améliorer la force maximale des pilotes de BMX afin de développer une plus grande puissance maximale et moyenne lors des tests de « Force – Vitesse » et de Wingate, afin d'améliorer les départs en compétition de BMX.

De plus, une analyse par régression multiple a permis de créer deux modèles simples qui permettent d'estimer FV P_{MAX} et WIN P_{moy} en fonction de Myo F_0 ($r = 0,98$, $p < 0,05$ et $r = 0,98$, $p < 0,05$, respectivement) :

$$FV P_{MAX} = 0,51 \text{ Myo } F_0 \text{ (} r = 0,98, p < 0,05 \text{)} \quad (59)$$

$$WIN P_{moy} = 0,34 \text{ Myo } F_0 \text{ (} r = 0,99, p < 0,05 \text{)} \quad (60)$$

Un entraînement régulier en musculation pourrait améliorer Myo F_0 en travaillant essentiellement à développer la force maximale des membres inférieurs.

Concernant les corrélations entre les données du ½ Squat et les données issues du Squat Jump (Tableau III-12), les corrélations significatives ($p < 0,05$) entre Myo P_{moy} et SJ h_{MAX} ($r = 0,65$), SJ P_{moy} ($r = 0,82$) et SJ $P_{moy} m_c^{-1}$ ($r = 0,65$) et entre Myo P_{MAX} et SJ h_{MAX} ($r = 0,65$) et SJ $P_{moy} m_c^{-1}$ ($r = 0,65$) indiquent que la hauteur de saut vertical est un bon indicateur du niveau de puissance maximale ou moyenne des athlètes :

$$\text{Myo } P_{MAX} = 19380 \text{ SJ } h_{MAX} - 1703,6 \text{ (} r = 0,65, p < 0,05 \text{)} \quad (61)$$

$$\text{MYo } P_{moy} = 9424,8 \text{ SJ } h_{MAX} - 740,09 \text{ (} r = 0,65, p < 0,05 \text{)} \quad (62)$$

De plus, la meilleure corrélation ($r = 0,82$) est obtenue entre SJ P_{moy} et Myo P_{moy} :

$$\text{Myo } P_{moy} = 3,3865 \text{ SJ } P_{moy} - 593,19 \text{ (} r = 0,82, p < 0,05 \text{)} \quad (63)$$

La puissance moyenne produite lors d'un Squat Jump est facilement quantifiable sur le terrain, ce test de détente verticale pourrait donc être un bon indicateur des progrès réalisés suite à un cycle d'entraînement de musculation [Haff et al., 2005]. Le Squat Jump pourrait aussi servir de tests de détection chez de jeunes athlètes (~ 14 ans) qui ne sont pas encore prêts pour des entraînements de musculation à charge lourde.

Les corrélations entre les données de Squat Jump et les données issues des tests de « Force – Vitesse » et de Wingate (Tableau III-13) montrent une corrélation positive et significative ($p < 0,05$) existe entre SJ P_{moy} et FV P_{MAX} ($r = 0,69$) et WIN P_{moy} ($r = 0,66$). Contrairement à Vandewalle et al. [1987] et Hautier et al. [1996], aucune corrélation n'est observée entre SJ h_{MAX} et les puissances produites lors des tests sur cyclo-wattmètres.

Comme pour l'entraînement de musculation, la puissance musculaire des membres inférieurs produite lors d'un Squat Jump peut servir d'indicateur à la performance (Puissance) lors de tests sur cyclo-wattmètre. Ces résultats suggèrent que l'amélioration de performance due à l'entraînement de musculation et à l'entraînement spécifique en cyclisme pourrait être observée et quantifiée à l'aide du niveau de production de puissance moyenne en saut vertical.

Le profil musculaire inertiel en ½ Squat concentrique

Les Ch_{Opt} absolues permettant de générer les pics de puissances maximale et moyenne pour cet échantillon de pilotes de BMX sont 43 ± 14 kg et 19 ± 14 kg, respectivement, pour une P_{MAX} et une P_{moy} égales à 4110 ± 1289 W et à 2087 ± 567 W, respectivement. A notre connaissance, seules deux études ont étudié des profils musculaires inertiels lors d'exercice de Squat à l'aide de charges absolues [Rahmani et al., 2001 ; Cormie et al., 2007d].

Rahmani et al. [2001] ont étudié le ½ Squat concentrique chez des skieurs alpins de niveau international avec des charges absolues de 60 à 180 kg avec une incrémentation de 20 kg. Et Cormie et al. [2007d] ont étudié le CMJ chez des athlètes de spécialités diverses avec des charges absolues de 0 à 80 kg avec une incrémentation de 20 kg. Comparé à ces études, $Myo F_0 m_c^{-1}$ chez les pilotes de BMX est plus faible ($36,0 \pm 3,4$ vs. $40,9 \pm 3,3$ Nkg⁻¹ [Rahmani et al., 2001]), et $Myo v_0$ est un peu inférieure ($3,24 \pm 6,8$ vs. $3,31 \pm 0,75$ ms⁻¹ [Rahmani et al., 2001]). $Myo P_{moy} m_c^{-1}$ est légèrement supérieure chez les pilotes de BMX en comparaison aux skieurs de l'étude de Rahmani et al. [2001] ($31,1 \pm 6,8$ vs. $30,4 \pm 4,5$ Wkg⁻¹) pour une $Myo v_{moy}$ environ 1,5 fois supérieure chez les pilotes de BMX ($2,37 \pm 0,68$ vs. $1,51 \pm 0,41$ ms⁻¹). La production de puissance similaire peut alors s'expliquer par la force développée supérieure chez les skieurs internationaux. Cela peut être expliqué en

partie par le niveau de compétition des skieurs et leur préparation physique spécifique en musculation.

Myo $P_{MAX}m_c^{-1}$ est inférieure chez les pilotes de BMX en comparaison aux athlètes de l'étude de [Cormie et al. \[2007d\]](#) ($62,3 \pm 21,2$ vs. $\sim 67-69$ Wkg $^{-1}$) pour une Ch_{Opt} de 43 ± 14 kg comparé à 0 kg dans l'étude de [Cormie et al. \[2007d\]](#), pour une Myo v_{MAX} inférieure pour les pilotes de BMX ($2,42 \pm 0,66$ vs. $\sim 3,5$ ms $^{-1}$) et une Myo $F_{MAX}m_c^{-1}$ similaire ($30,7 \pm 2,4$ vs. $\sim 28-30$ Nkg $^{-1}$). Pour des charges plus faibles, les sujets de l'étude de [Cormie et al. \[2007\]](#) sont plus rapides et produisent ainsi une puissance supérieure, cela est dû en majeure partie au programme axé sur le développement de la puissance maximale qu'ils ont suivi pendant 12 semaines.

En tenant compte des différences de niveaux des athlètes de ces 3 études et des différences dans les charges absolues utilisées, les résultats de cette étude sont en accord avec la littérature. Il serait néanmoins plus pratique d'utiliser des charges relatives au 1RM, afin de mieux quantifier les charges d'entraînement.

Le test de détente verticale

Concernant le Squat Jump, la hauteur de saut atteinte par les pilotes de BMX de niveau régional est $0,30 \pm 0,04$ m. [Hautier et al. \[1996\]](#) ont trouvé une valeur similaire (SJ $h_{MAX} = 31,7 \pm 6,6$ cm) chez des athlètes entraînés pour le cyclisme et le sprint. La puissance moyenne produite lors de ces sauts verticaux est inférieure à la puissance maximale produite lors du ½ Squat (792 ± 138 W vs. 2087 ± 567 W, respectivement) pour une Ch_{Opt} de 0 kg contre 19 ± 14 kg, respectivement.

Ce résultat est en désaccord avec les résultats de la littérature, le SJ sans charge additionnelle maximise généralement la production de puissance [[McBride et al., 1999](#) ; [Markovic et al., 2004](#) ; [Cormie et al., 2007a](#) ; [Samozino et al., 2008](#) ; [Dayne et al., 2010](#)].

Cela est dû au fait que lors d'un SJ, la capacité d'accélération du corps de l'athlète est améliorée [Cormie et al., 2007b]. Cette différence peut être due à la méthode de calcul de la puissance moyenne lors du Squat Jump qui pourrait la sous-estimer.

Les tests de « Force – Vitesse » et de Wingate

Concernant les résultats lors des tests de « Force – Vitesse », les résultats obtenus lors de cette étude sont en accord avec ceux de Ravier et al. [2004] sur un échantillon de karatéka, compétiteurs de haut-niveau. Concernant $P_{MAX}m_c^{-1}$, les pilotes de BMX ont développé $18,1 \pm 2,9 \text{ Wkg}^{-1}$ contre $11,6 \pm 1,6 \text{ Wkg}^{-1}$ pour les karatékas. Morin et al. [2002] et Hautier et al. [1996] ont montré des résultats similaires à ceux de Ravier et al. [2004] lors d'un test de « Force – Vitesse » chez des sujets spécialistes de disciplines de sprint et de cyclisme, respectivement. Morin et al. [2002] ont rapporté une $P_{MAX}m_c^{-1}$ égale à $11 \pm 1 \text{ Wkg}^{-1}$. Et Hautier et al. [1996] ont rapporté une $P_{MAX}m_c^{-1}$ égale $14,36 \pm 2,37 \text{ Wkg}^{-1}$. Vandewalle et al. [1987] ont trouvé la valeur de puissance maximale relative à la masse corporelle chez cyclistes sur piste junior de niveau national égale à $16,80 \pm 1,23 \text{ Wkg}^{-1}$. Ce niveau de production élevée de puissance maximale par les pilotes de BMX de cette étude peut s'expliquer par des qualités musculaires de force assez élevées.

Concernant les tests de Wingate, les pilotes de BMX ont produit une puissance moyenne et une puissance moyenne relative à la masse corporelle égale à $820 \pm 223 \text{ W}$ et $12,2 \pm 2,2 \text{ Wkg}^{-1}$, respectivement. Lors d'une étude sur l'effet de la chaleur sur la production de puissance, Ball et al. [1999] ont observé lors d'un test de Wingate une puissance moyenne en condition de température normale inférieure et égale à $496 \pm 53 \text{ W}$ sur 7 sujets, et il n'était pas précisé leur niveau de compétition. Reiser II et al. [2002] ont également observé chez des cyclistes de niveau universitaire une production de puissance moyenne relative à la masse corporelle lors d'un test de Wingate inférieure à celle obtenue

par les pilotes de BMX ($10,4 \pm 0,6$ vs. $12,2 \pm 2,2$ Wkg^{-1} , respectivement). Les pics de puissance lors d'un test de Wingate sont généralement observés dès le départ du test (Figure III-5). Ce test d'environ 30 s correspond très bien à l'effort musculaire réalisé par les pilotes de BMX lors d'une course. Le départ arrêté nécessite une production élevée de puissance musculaire, et les pilotes doivent ensuite maintenir une vitesse élevée jusqu'à la ligne d'arrivée 30-45 s après le départ, selon les pistes.

Optimisation des performances par l'entraînement

Le résultat principal de cette étude montre le lien entre le Myo F_0 en $\frac{1}{2}$ Squat concentrique et FV P_{MAX} et WIN P_{moy} . Ces corrélations montrent qu'un gain en force musculaire maximale permettrait d'améliorer la performance en sprint court ($\sim 6-30$ s), et donc la performance lors d'une course de BMX.

Dans l'exemple en Figure III-29, pour développer sa force musculaire maximale en $\frac{1}{2}$ Squat concentrique, ce pilote de BMX pourra travailler avec une charge égale ou supérieure à 100 kg.

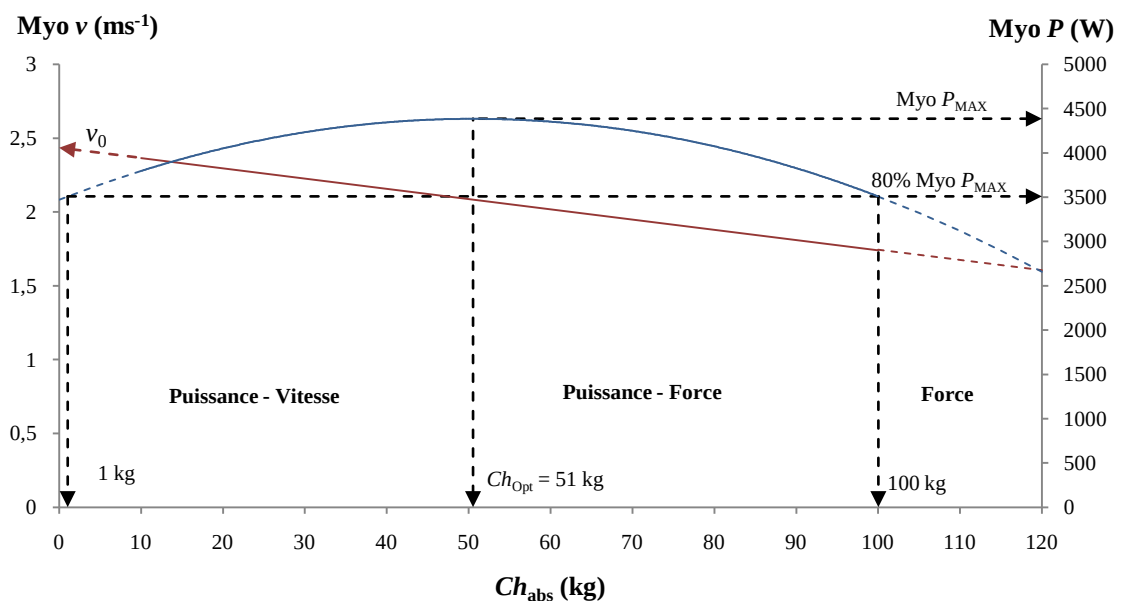


Figure III-29 – Exemple de zones d'entraînements selon un profil inertiel musculaire pour un pilote de BMX.

Winchester et al. [2010] ont montré que la force maximale isométrique des membres inférieurs était fortement et significativement corrélée ($r = 0,97$, $p < 0,05$) avec le 1RM en Squat. Pour un gain en force maximale des membres inférieurs, un entraînement en musculation doit être basé sur plusieurs séries de 3-6 répétitions maximales (*e.g.*, 5 séries de 5 répétitions, 6-8 séries de 3 répétitions, etc.) avec un repos inter-séries de 2 minutes 30 à 5 minutes [Kraemer et Ratamess, 2004]. Le choix des charges pourra être guidé par les profils musculaires inertiels des pilotes de BMX.

La planification de l'entraînement de musculation dépendra essentiellement des entraînements spécifiques de l'activité et des temps de récupération entre chaque session. Une planification linéaire conduira à travailler les qualités musculaires requises (*e.g.*, force, puissance, hypertrophie) une par une par phase de plusieurs semaines (*e.g.*, 2 à 6 semaines). Tandis qu'une planification non-linéaire permettra de travailler chaque qualité musculaire dans la même semaine. Hartman et al. [2009] n'ont pas montré de différence significative dans les gains en 1RM de deux groupes exécutant sur une période de 14 semaines un entraînement de musculation basé soit sur une planification linéaire soit sur une planification non-linéaire. Un travail de musculation basé sur 3 séances hebdomadaires suffira à améliorer le 1RM.

2.2.4. CONCLUSION

Le résultat principal de cette étude est que la force théorique maximale lors d'un exercice de $\frac{1}{2}$ Squat concentrique est corrélée positivement et significativement avec les puissances produites lors des tests sur cyclo-wattmètre. Cela montre que le développement de la force maximale des pilotes de BMX est un élément important pour améliorer la performance lors des départs arrêtés de compétition. De plus l'utilisation d'un profil musculaire inertiel peut aider à identifier les charges d'entraînement

personnalisées. Le second point mis en lumière lors de cette étude est le fait que le test de détente verticale soit un bon indicateur de la puissance produite en ½ Squat concentrique et lors des tests sur cyclo-wattmètre.

3. COMPARAISON DES PROFILS MUSCULAIRES INERTIELS CHEZ DES PILOTES DE BMX, DES CYCLISTES SUR ROUTES ET DES ATHLETES DE FORCE

3.1. INTRODUCTION

Lors des compétitions de BMX, 8 pilotes s'élancent en même temps. La configuration de la piste impose aux pilotes de se placer en tête avant le premier obstacle pour s'assurer une des trois premières places de la course. La performance nécessite une forte production de puissance maximale dès les premiers coups de pédale [Bertucci et al., 2007]. Le départ s'effectuant à l'arrêt, la force maximale et le taux de force développé sur la pédale semblent déterminants pour la performance [Stone et al., 2004]. L'étude précédente, présentée au Chapitre III.2.2, a permis de mettre en évidence l'importance de développer la force maximale théorique moyenne ($M_{yo} F_0$, N) des membres inférieurs en Squat pour améliorer la performance en pédalage lors de sprints courts.

Le but de cette étude est de comparer lors d'un mouvement de Squat en phase concentrique et d'un test de saut vertical, les profils musculaires inertiels puissance moyenne relative à la masse corporelle, de force moyenne relative à la masse corporelle, de vitesse moyenne et le taux de développement de force lors d'un saut d'un groupe de Cyclistes sur route, de Pilotes de BMX de haut niveau (BMX_{HN}), de Pilotes de BMX de niveau régional à national (BMX_{RN}) et des athlètes de force (AF) de haut niveau, considérés comme une référence dans la production de force maximale [Garhammer, 1993]. A partir de ces comparaisons, l'objectif est de déterminer des orientations d'entraînement en musculation des pilotes de BMX dans le but d'optimiser la performance en compétition.

3.2. METHODES EXPERIMENTALES

3.2.1. SUJETS ET ANTHROPOMETRIE

Quatres groupes d'athlètes de différentes disciplines ont participé à cette étude, des Cyclistes sur route de niveau régional à national ($n = 10$) (voir Chapitre III.2.1), des Pilotes de BMX ($n = 10$) de haut niveau (BMX_{HN}), des Pilotes de BMX de niveau régional à national (BMX_{RN}) ($n = 10$) (voir Chapitre III.2.2) et des athlètes de force (AF) de haut niveau ($n = 9$). Les valeurs moyennes ($\pm$ Ecart-Type) de l'âge, la hauteur corporelle (h_c , m), de la masse corporelle (m_c , kg) et de la masse grasse corporelle (MG, %) sont présentées dans le Tableau III-14.

Tableau III-14 – Données anthropométriques d'athlètes de différentes disciplines sportives. Valeurs moyennes $\pm$ Ecart-Type.

	Age (années)	h_c (m)	m_c (kg)	MG (%)
Cyclistes ($n = 10$)	21 ± 6	$1,79 \pm 0,05$	$65,8 \pm 5,5$	$10,7 \pm 4,0$
AF ($n = 9$)	22 ± 5	$1,65 \pm 0,09$	$69,4 \pm 14,8$	$15,8 \pm 5,6$
BMX_{HN} ($n = 10$)	19 ± 2	$1,75 \pm 0,06$	$68,6 \pm 8,0$	-
BMX_{RN} ($n = 10$)	17 ± 3	$1,76 \pm 0,05$	$66,5 \pm 8,1$	$13,8 \pm 2,9$

h_c : hauteur corporelle ; m_c : masse corporelle ; MG : masse grasse corporelle.

Les données anthropométriques de tous les athlètes sont mesurées selon les méthodes expliquées dans le Chapitre III.2.1.

3.2.2. PROTOCOLE

Concernant la détermination du 1RM, celui des Cyclistes sur route et des BMX_{HN} a été déterminé selon le protocole expliqué dans le Chapitre III.2.1. Pour les athlètes de force, la meilleure performance en Squat sans matériels dans le mois en cours a été retenue comme le 1RM. Quant aux BMX_{RN} , leur 1RM n'a pas été déterminé.

A partir de leur 1RM, les 4 groupes ont réalisé : **1)** une évaluation du profil musculaire inertiel avec incrémentation de la charge lors d'un exercice de $\frac{1}{2}$ Squat pour les Cyclistes

sur route, les BMX_{RN} et les BMX_{HN} et d'un exercice de Squat pour les athlètes de force ;
 2) et un test de détente verticale (SJ).

Les tests sont effectués dans un ordre randomisé pour chaque sujet. Un échauffement général et spécifique a été réalisé avant chaque test et 15 minutes de repos ont été accordées entre les tests. Les résultats des tests pour les Cyclistes sur route et les BMX_{RN} sont repris des Chapitres [III.2.1](#) et [III.2.2](#).

3.2.2.1. Protocole d'évaluation du profil musculaire inertiel des Pilotes de BMX de haut niveau

Lors d'un exercice de ½ Squat, les pilotes de BMX ont réalisé, dans un ordre randomisé, une répétition à différentes charges relatives (Ch_{rel} , % 1RM) de leur 1RM (*i.e.*, 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 et 100%) avec un repos de 5 minutes entre chaque essai.

Avec ou sans une barre chargée sur les épaules, la position de départ était avec les membres inférieurs fléchis, les jambes et les cuisses formant un angle d'environ 90°, les mains étaient situées soit derrière la tête soit sur la barre. Dans cette position de « point mort », une instruction est donnée de rester immobile jusqu'à un signal sonore. A ce signal, les sujets doivent exécuter le mouvement le plus rapidement possible sur toute la phase concentrique. Pour que les essais soient valides, la barre devait rester en contact avec le sujet durant toute la phase concentrique. Il était permis de sauter avec la barre à la fin de la phase concentrique. Pour des raisons de sécurité, un système d'assistance a été conçu au Pôle France d'Aix-en-Provence ([Figure III-30](#)).

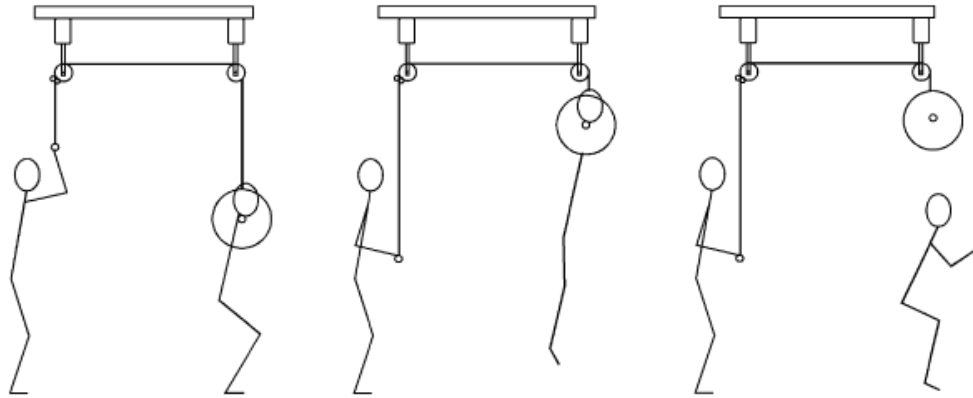


Figure III-30 – Schéma du système d'assistance lors du Squat Jump avec charge [D'après [Patterson et al., 2009](#)].

Un assistant qui est debout derrière le sujet tient deux cordes dont les extrémités sont attachées à la barre et qui passent par un système de poulie. Le sujet saute, et juste après avoir atteint la hauteur maximale, l'assistant tire rapidement sur les cordes, un système de taquet bloque la charge en l'air tandis que le sujet atterrit seul.

3.2.2.2. Protocole d'évaluation du profil musculaire inertiel des Athlètes de force

Lors d'un exercice de Squat, les athlètes de force ont réalisé, dans un ordre randomisé, une répétition à différentes charges relatives (Ch_{rel} , % 1RM) de leur 1RM (*i.e.*, 15, 30, 40, 50, 60, 70 et 80%) avec un repos de 5 minutes entre chaque essai.

Avec la barre sur les épaules, les sujets ont eu pour instruction d'exécuter la phase excentrique en respectant l'amplitude complète de compétition. Dans cette position de « point mort », une instruction est donnée de rester immobile jusqu'à un signal sonore. A ce signal, les sujets doivent exécuter le mouvement le plus rapidement possible sur toute la phase concentrique. Il n'était pas permis de sauter avec la barre à la fin de la phase concentrique.

Pour tous les tests, l'accélération de la barre a été mesurée à l'aide d'un accéléromètre 3 axes sans fil (Myotest SA, Suisse) pour les Cyclistes sur route, les athlètes de force et les BMX_{HN} (voir Chapitre III.2.1) et d'un accéléromètre 2 axes (Myotest SA, Suisse) pour les BMX_{RN} (voir Chapitre III.2.2). L'accéléromètre était fixé sur la barre.

Concernant les Cyclistes sur route, les BMX_{HN} et les athlètes de force, le profil musculaire inertiel en fonction des charges relatives au 1RM est établi pour chaque sujet. Pour les BMX_{RN}, le profil musculaire inertiel est établi en fonction des charges absolues. Seules les phases concentriques sont prises en compte lors des exercices.

A partir de la relation Charge – Puissance, les valeurs de puissance moyenne relative à la masse corporelle ($\text{Myo } P_{\text{moy}} m_c^{-1}$, Wkg^{-1}) et la charge optimale (*i.e.*, charge à laquelle le pic de puissance est produit) (Ch_{Opt} , % 1RM ou kg) ont été déterminées. Les vitesses moyennes ($\text{Myo } v_{\text{moy}}$, ms^{-1}) et les forces moyennes relatives à la masse corporelle ($\text{Myo } F_{\text{moy}} m_c^{-1}$, Nkg^{-1}) étudiées correspondent aux vitesses et forces moyennes optimales (*i.e.*, qui correspondent au pic de production de puissance). A partir de la relation Force – Vitesse moyenne, la force maximale théorique moyenne relative à la masse corporelle ($\text{Myo } F_0 m_c^{-1}$, Nkg^{-1}) et la vitesse maximale théorique moyenne ($\text{Myo } v_0$, ms^{-1}) ont été calculées.

Seules les valeurs moyennes sont prises en compte car elles sont plus représentatives des paramètres mécaniques musculaires lors de la phase concentrique [Izquierdo et al., 2002].

3.2.2.3. Test de détente verticale (« Squat Jump »)

Les sujets ont réalisé deux « Squat Jump » (SJ) sans charge additionnelle, le temps de récupération entre chaque saut était de 3 min. Le départ du saut s'effectue en position

genoux fléchis à environ 90°, avec les mains placées sur les hanches pour éviter tout mouvement de balancier avec les bras. La meilleure des deux performances est retenue.

Pour les Cyclistes sur route, les athlètes de force et les BMX_{HN}, un accéléromètre Myotest[®] est fixé sur les sujets au niveau de la hanche. Pour les BMX_{RN}, le protocole est expliqué dans le Chapitre III.2.2. Les sujets ont pour consigne de sauter le plus haut possible au signal sonore de départ.

La hauteur de saut maximale ($SJ h_{MAX}$, m), la vitesse de déplacement moyenne ($SJ v_{moy}$, $m \cdot s^{-1}$), la force moyenne relative à la masse corporelle développée ($SJ F_{moy} m_c^{-1}$, Nkg^{-1}), la puissance moyenne relative à la masse corporelle produite ($SJ P_{moy} m_c^{-1}$, Wkg^{-1}) et le taux moyen de développement de force (RFD_{moy} , Ns^{-1}) ont été déterminées à l'aide du Myotest[®] pour les Cyclistes sur route, les athlètes de force et les BMX_{HN}. Pour les BMX_{RN}, seuls $SJ h_{MAX}$ et $SJ P_{moy} m_c^{-1}$ ont été déterminés comme expliqué dans le Chapitre III.2.2. Pour les BMX_{RN}, RFD_{moy} a été déterminé à 10kg à l'aide du Myotest[®].

3.2.2.4. Performance en sprint départ arrêté

Les pilotes de BMX_{HN} ont réalisé 3 sprints départs arrêtés et le temps de passage à 5 m a été enregistré à l'aide de cellules photoélectriques (Racetime 2, Microgate, Italie) (Figure III-31). La meilleure des 3 performances (t_{5m} , s) est retenue.



Figure III-31 – 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. Un faisceau laser traverse la piste, et c'est lorsque les sujets passent au travers que le signal de passage est enregistré.

3.2.3. ANALYSES STATISTIQUES

Les données sont présentées comme Valeurs moyennes $\pm$ Ecart-Type. Les différences statistiques entre les deux groupes sur les données anthropométriques, les données issues du profil musculaire inertiel en ½ Squat et en Squat ainsi que les données issues du test de saut vertical sont déterminées en utilisant un test T de Student. Les liens entre les données SJ et t_{5m} chez les BMX_{HN} sont testés à l'aide de corrélations de Bravais-Pearson. Les tests statistiques sont réalisés à l'aide du logiciel Statistica 7.1 (StatSoft, France). Le niveau de significativité est fixé à $p < 0,05$.

3.3. RESULTATS

3.3.1. DONNEES ANTHROPOMETRIQUES ET 1RM

Les valeurs moyennes du 1RM ainsi que le ratio du 1RM sur la masse corporelle pour les Cyclistes sur route, les athlètes de force et pour les BMX_{HN} sont indiqués dans le [Tableau III-15](#). Les athlètes de force possèdent un 1RM et $1RMm_c^{-1}$ significativement plus grands ($p < 0,05$) que ceux des Cyclistes sur route et des BMX_{HN}. Et les BMX_{HN} possèdent un 1RM et un $1RMm_c^{-1}$ significativement plus grands ($p < 0,05$) que ceux des Cyclistes sur route.

Tableau III-15 – Résultats du 1RM et $1RMm_c^{-1}$ chez des athlètes de différentes disciplines sportives. Valeurs moyennes $\pm$ Ecart-Type.

	1RM (kg)	$1RMm_c^{-1}$
Cyclistes	92 ± 15	$1,40 \pm 0,23$
AF	$166 \pm 46^{a,b}$	$2,40 \pm 0,52^{a,b}$
BMX_{HN}	124 ± 28^a	$1,78 \pm 0,24^a$
BMX_{RN}	-	-

m_c : masse corporelle ; 1RM : Force maximale dynamique.

^aDifférence significative ($p < 0,05$) comparé aux Cyclistes sur route

^bDifférence significative ($p < 0,05$) comparé aux athlètes de force

Les Cyclistes sur route, les BMX_{HN} et les BMX_{RN} sont significativement ($p < 0,05$) plus grands que les athlètes de force. Et il n'existe aucune différence significative pour la masse corporelle entre les 4 groupes.

3.3.2. PROFIL MUSCULAIRE INERTIEL

Lors du $\frac{1}{2}$ Squat concentrique, la puissance moyenne relative à la masse corporelle (Figure III-32A), de 30 à 80% du 1RM, chez les BMX_{HN} et les athlètes de force est significativement ($p < 0,05$) supérieure à celle produite par les Cyclistes sur route. De 30 à 50% du 1RM, les BMX_{HN} produisent une $Myo P_{moy}m_c^{-1}$ significativement ($p < 0,05$) supérieure à celle des athlètes de force.

Pour les Cyclistes sur route, les BMX_{HN}, et les athlètes de force, le pic de $Myo P_{moy}m_c^{-1}$ est atteint à 60, 10 et 40% de 1RM pour une valeur de $11,0 \pm 2,7$, $28,2 \pm 9,6$ et $15,9 \pm 2,1$ Wkg⁻¹, respectivement.

Pour les Cyclistes sur route, il existe uniquement une différence significative ($p < 0,05$) entre Ch_{Opt} et la charge à 10% de 1RM. Pour les BMX_{HN}, la Ch_{Opt} est significativement ($p < 0,05$) différente de 70, 80, 90 et 100% de 1RM. Pour les athlètes de force, la Ch_{Opt} est significativement ($p < 0,05$) différente de 15% de 1RM.

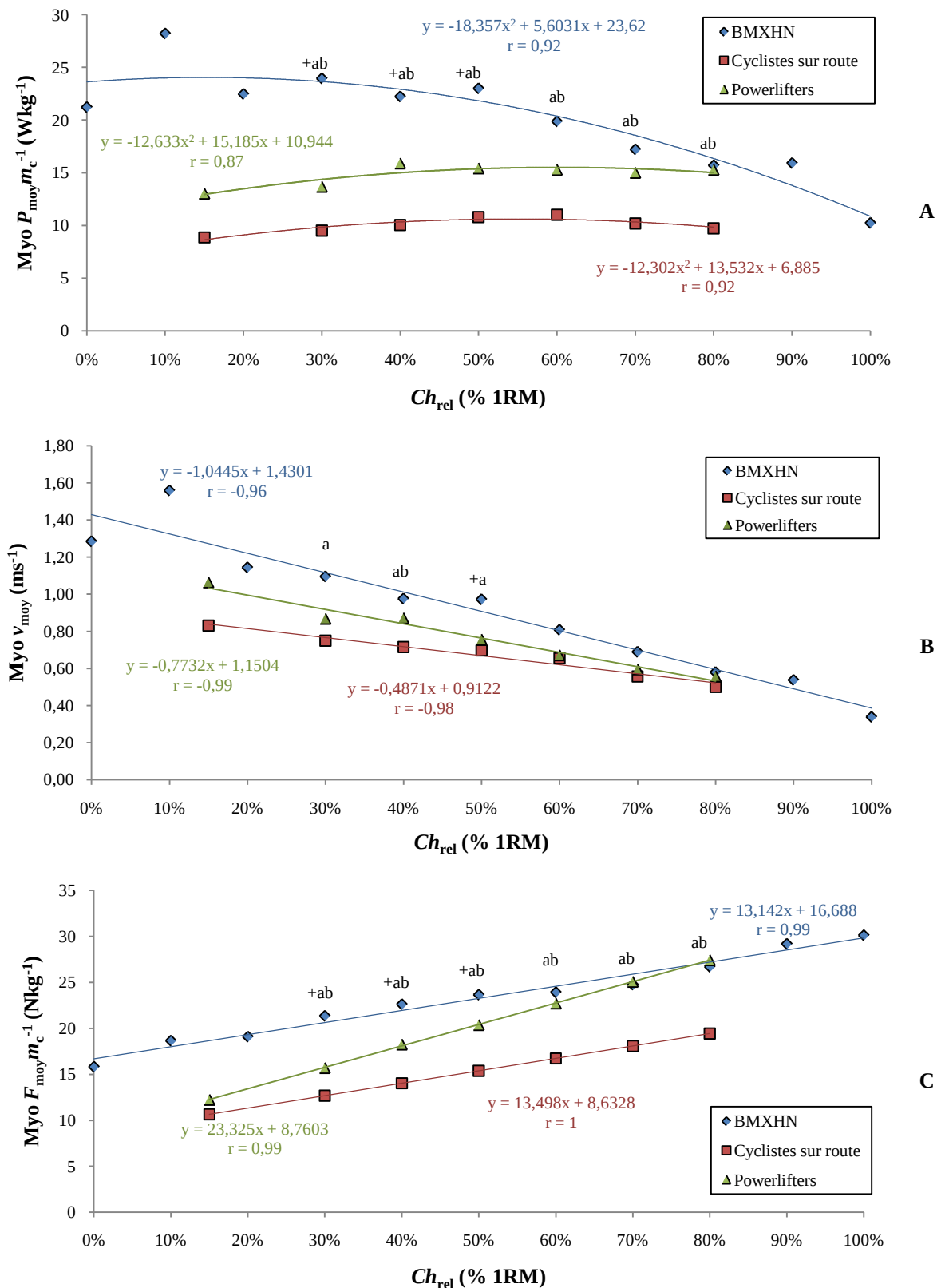


Figure III-32 – Comparaison des puissances moyennes relatives à la masse corporelle ($\text{Myo } P_{\text{moy}} m_c^{-1}$, Wkg^{-1}) (A), des vitesses moyennes ($\text{Myo } v_{\text{moy}}$, ms^{-1}) (B) et des forces moyennes relatives à la masse corporelle ($\text{Myo } F_{\text{moy}} m_c^{-1}$, Nkg^{-1}) (C) des BMX_{HN} , des Cyclistes sur route et des athlètes de force. ⁺Différence significative ($p < 0,05$) comparé aux athlètes de force, ^{a,b}Différence significative ($p < 0,05$) comparé aux Cyclistes sur route.

Lors du ½ Squat concentrique, la vitesse moyenne atteinte ([Figure III-32B](#)), de 30 à 50% du 1RM, chez les BMX_{HN} est significativement ($p < 0,05$) supérieure à celle atteinte par les Cyclistes sur route. A 50% de 1RM, la vitesse moyenne des BMX_{HN} est significativement ($p < 0,05$) supérieure à celle des athlètes de force. Et les athlètes de force atteignent une $Myo v_{moy}$ significativement supérieures à celles des cyclistes à 40% de 1RM.

Pour les Cyclistes sur route, les BMX_{HN}, et les athlètes de force, le pic de $Myo v_{moy}$ est atteint à 15, 10 et 15% de 1RM pour une valeur de $0,83 \pm 0,13$, $1,56 \pm 0,66$ et $1,06 \pm 0,13$ ms⁻¹, respectivement.

Pour les Cyclistes sur route, il existe uniquement une différence significative ($p < 0,05$) entre le pic de $Myo v_{moy}$ et les charges de 50 à 80% de 1RM. Pour les BMX_{HN}, le pic de $Myo v_{moy}$ est significativement ($p < 0,05$) différent des charges de 40 à 100% de 1RM. Pour les athlètes de force, le pic de $Myo v_{moy}$ est significativement ($p < 0,05$) différent de 40 à 80% de 1RM.

Lors du ½ Squat concentrique, la force moyenne relative à la masse corporelle développée ([Figure III-32C](#)) chez les BMX_{HN} est significativement ($p < 0,05$) supérieure à celle atteinte par les athlètes de force, de 30 à 50% du 1RM. De 30 à 80% du 1RM, les $Myo F_{moy} \cdot m_c^{-1}$ des BMX_{HN} et des athlètes de force sont significativement ($p < 0,05$) supérieures à celles des Cyclistes sur route.

Pour les Cyclistes sur route, les BMX_{HN}, et les athlètes de force, le pic de $Myo F_{moy} m_c^{-1}$ est atteint à 80, 100 et 80% de 1RM pour une valeur de $19,4 \pm 1,6$, $30,1 \pm 3,3$ et $27,43 \pm 4,12$ ms⁻¹, respectivement.

Pour les Cyclistes sur route, il existe une différence significative ($p < 0,05$) entre le pic de $Myo F_{moy} m_c^{-1}$ et les charges de 15 à 60% de 1RM. Pour les BMX_{HN}, le pic de $Myo F_{moy} m_c^{-1}$ est significativement ($p < 0,05$) différent des charges de 0 à 80% de 1RM. Pour

les athlètes de force, le pic de $\text{Myo } F_{\text{moy}}m_c^{-1}$ est significativement ($p < 0,05$) différent de 15 à 60% de 1RM.

Le [Tableau III-16](#) présente les valeurs pics moyennes de Ch_{Opt} , $\text{Myo } P_{\text{moy}}m_c^{-1}$, $\text{Myo } F_0m_c^{-1}$, $\text{Myo } v_0$, $\text{Myo } v_{\text{Opt}}v_0^{-1}$, $\text{Myo } F_{\text{Opt}}F_0^{-1}$ lors du mouvement d'extension des membres inférieurs entre les 4 groupes testés.

Tableau III-16 – Comparaison des données représentatives du ½ Squat et du Squat entre un groupe de Cyclistes sur route, d'athlètes de force (AF), de Pilotes de BMX de haut niveau (BMX_{HN}) et de niveau régional à national (BMX_{RN}).

	Cyclistes	AF	BMX_{HN}	BMX_{RN}
Ch_{Opt} (% 1RM)	$54,0 \pm 15,1^{\text{d}}$	$62,2 \pm 15,6^{\text{d}}$	$19,0 \pm 13,7$	-
Ch_{Opt} (kg)	$50,4 \pm 17,5^{\text{c,d}}$	$100,8 \pm 31,1^{\text{a,c,d}}$	$21,4 \pm 12,3$	$19,0 \pm 14,5$
$\text{Myo } P_{\text{moy}}m_c^{-1}$ (Wkg^{-1})	$12,1 \pm 1,9$	$17,4 \pm 3,1^{\text{a}}$	$32,3 \pm 5,9^{\text{a,b}}$	$31,1 \pm 6,8^{\text{a,b}}$
$\text{Myo } F_0m_c^{-1}$ (Nkg^{-1})	$36,7 \pm 12,2$	$46,3 \pm 10,8^{\text{c}}$	$44,0 \pm 9,5^{\text{c}}$	$36,0 \pm 3,4$
$\text{Myo } v_0$ (ms^{-1})	$1,25 \pm 0,30$	$1,43 \pm 0,21$	$2,15 \pm 0,82^{\text{a,b}}$	$3,24 \pm 1,04^{\text{a,b,d}}$
$\text{Myo } v_{\text{Opt}}v_0^{-1}$	$0,65 \pm 0,17^{\text{c}}$	$0,53 \pm 0,09$	$0,80 \pm 0,17^{\text{b,c}}$	$0,46 \pm 0,14$
$\text{Myo } F_{\text{Opt}}F_0^{-1}$	$0,46 \pm 0,09$	$0,61 \pm 0,11^{\text{a,d}}$	$0,48 \pm 0,12$	$0,62 \pm 0,07^{\text{a,d}}$

m_c : Masse corporelle ; P_{moy} : Puissance moyenne ; F_0 : Force théorique maximale moyenne ; v_0 : Vitesse théorique maximale moyenne ; v_{Opt} : Vitesse optimale ; F_{Opt} : Force optimale.

^aDifférence significative ($p < 0,05$) comparé aux Cyclistes sur route, ^bDifférence significative ($p < 0,05$) comparé aux athlètes de force,

^cDifférence significative ($p < 0,05$) comparé aux BMX_{RN} , ^dDifférence significative ($p < 0,05$) comparé aux BMX_{HN} .

Les BMX_{HN} et les BMX_{RN} ont une $\text{Myo } P_{\text{moy}}m_c^{-1}$ significativement ($p < 0,05$) supérieures à celles des athlètes de force et des Cyclistes sur route. Et les athlètes de force ont une $\text{Myo } P_{\text{moy}}m_c^{-1}$ significativement ($p < 0,05$) supérieure à celle des Cyclistes sur route.

Les athlètes de force et les BMX_{HN} ont une $\text{Myo } F_0m_c^{-1}$ significativement ($p < 0,05$) plus grande que les BMX_{RN} . Il n'existe pas de différence significative entre les athlètes de force, les BMX_{HN} et les Cyclistes sur route.

Les BMX_{RN} atteignent une $\text{Myo } v_0$ significativement ($p < 0,05$) supérieure à celle atteinte par les Cyclistes sur route, les athlètes de force et les BMX_{HN} . Et les BMX_{HN}

atteignent une significativité ($p < 0,05$) supérieure à celle des Cyclistes sur route et des athlètes de force.

Les cyclistes sur route ont un ratio $\text{Myo } v_{\text{Opt}}v_0^{-1}$ significativement ($p < 0,05$) supérieur à celui des BMX_{RN} . Et les BMX_{HN} ont un ratio $\text{Myo } v_{\text{Opt}}v_0^{-1}$ significativement ($p < 0,05$) supérieur à celui des BMX_{RN} et des athlètes de force.

Les athlètes de force et les BMX_{RN} ont un ratio $\text{Myo } F_{\text{Opt}}F_0^{-1}$ significativement ($p < 0,05$) supérieur à celui des Cyclistes sur route et des BMX_{HN} .

3.3.3. SAUT VERTICAL

Les données descriptives pour tous les groupes obtenues lors du Squat Jump sans charge additionnelle sont présentées dans le [Tableau III-17](#).

Tableau III-17 – Comparaison des données représentatives du Squat Jump entre les 4 groupes de sujets. Valeurs moyennes $\pm$ Ecart-Type.

	Cyclistes (n = 10)	AF (n = 9)	BMX_{HN} (n = 10)	BMX_{RN} (n = 10)
SJ h_{MAX} (m)	$0,33 \pm 0,05$	$0,38 \pm 0,06^d$	$0,39 \pm 0,09^d$	$0,30 \pm 0,04$
SJ $P_{\text{moy}}m_c^{-1}$ (Wkg^{-1})	$10,7 \pm 1,1$	$32,5 \pm 7,6^{a,c,d}$	$21,2 \pm 10,0^{a,d}$	-
SJ v_{moy} (ms^{-1})	$1,24 \pm 0,13$	$1,44 \pm 0,19^a$	$1,29 \pm 0,35$	-
SJ $F_{\text{moy}}m_c^{-1}$ (Nkg^{-1})	$8,6 \pm 0,0$	$22,4 \pm 3,1^{a,c}$	$15,8 \pm 3,5^a$	-
RFD _{moy} (Ns^{-1})	3073 ± 2089	7201 ± 4759^a	6369 ± 2503^a	$6174 \pm 4180^*$
t_{5m} (s)	-	-	$1,15 \pm 0,06$	-

h_c : hauteur corporelle ; m_c : masse corporelle ; MG : masse grasse corporelle ; RFD : taux de développement de force. ^aDifférence significative ($p < 0,05$) comparé aux Cyclistes sur route, ^bDifférence significative ($p < 0,05$) comparé aux athlètes de force, ^cDifférence significative ($p < 0,05$) comparé aux BMX_{HN} , ^dDifférence significative ($p < 0,05$) comparé aux BMX_{RN} . *RFD calculé avec un SJ à 10 kg.

Les BMX_{HN} et les athlètes de force ont une détente verticale significativement ($p < 0,05$) supérieures à celle des BMX_{RN} . Et la $\text{SJ } P_{\text{moy}}m_c^{-1}$ produite par les BMX_{HN} et les athlètes de force est significativement ($p < 0,05$) plus grande que celle produite par les Cyclistes sur route. La $\text{SJ } v_{\text{moy}}$ atteinte par les athlètes de force est significativement ($p < 0,05$) plus grande que celle atteinte par les Cyclistes sur route. Et la $\text{SJ } F_{\text{moy}}m_c^{-1}$ développée

par les BMX_{HN} est significativement supérieure à celle développée par les athlètes de force et les Cyclistes sur route.

Les athlètes de force et les BMX_{HN} développent un RFD_{moy} significativement ($p < 0,05$) supérieur à ceux des Cyclistes sur route. Il n'existe pas de différence significative entre les BMX_{RN} et les cyclistes sur route. Concernant les corrélations entre t_{5m} et les données issues des mesures en SJ chez les BMX_{HN}, il n'existe pas de corrélation significative entre RFD_{moy} et t_{5m} .

3.4. DISCUSSIONS

Le profil musculaire inertiel

L'étude des profils musculaires de 3 groupes a permis de mettre en évidence que les $\text{Myo } P_{\text{moy}} m_c^{-1}$ chez les BMX_{HN} sont significativement plus grandes de celles produites par les athlètes de force uniquement sur des charges relatives faibles (*i.e.*, de 0 à 50% de 1RM). En revanche, pour des charges supérieures à 50% de 1RM, pour $\text{Myo } v_{\text{moy}}$, il n'existe pas de différence significative entre les BMX_{HN}, les athlètes de force et les Cyclistes sur route ; et pour $\text{Myo } F_{\text{moy}} m_c^{-1}$, il n'existe pas de différence significative entre les BMX_{HN} et les athlètes de force.

Les résultats ont également montré que les BMX_{HN} développent une $\text{Myo } F_0 m_c^{-1}$ similaire à celle développer par les athlètes de force ($44,0 \pm 9,5$ vs. $46,3 \pm 10,8 \text{ Nkg}^{-1}$, respectivement) bien que les charges absolues utilisées soient significativement inférieures pour les BMX_{HN} ($21,4 \pm 12,3$ vs. $100,8 \pm 31,1 \text{ kg}$, respectivement). Ces résultats montrent que les BMX_{HN} sont capables de maximiser l'accélération et la vitesse lors du déplacement de charges relativement faibles. La [Figure III-33](#) présente un comparatif de $\text{Myo } v_0$ et de $\text{Myo } F_0 m_c^{-1}$ des 4 groupes de sportifs testés.

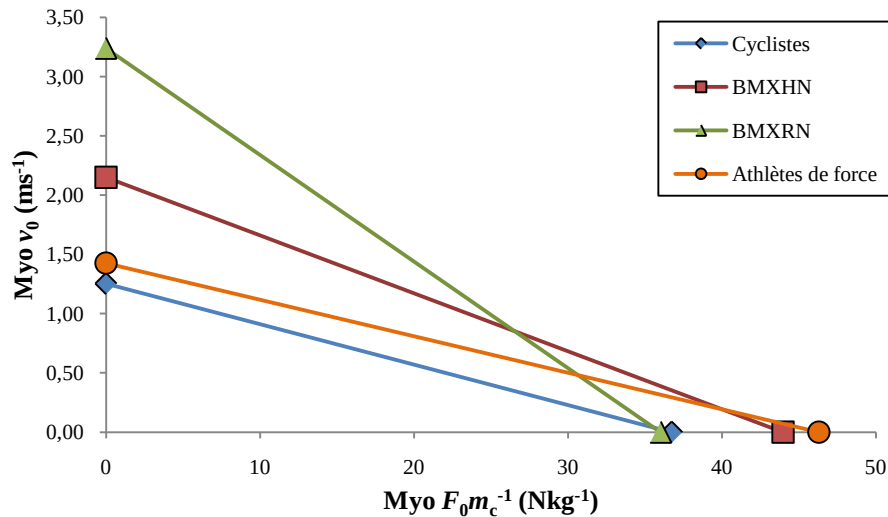


Figure III-33 – Comparatif des profils de force et de vitesses maximales théoriques moyennes chez les 4 groupes testés.

Les pilotes de BMX ont une $Myo v_0$ significativement supérieure à celles des Cyclistes sur route et des athlètes de force. Néanmoins les BMX_{RN} ont une $Myo F_0 m_c^{-1}$ similaire à celle des Cyclistes sur route et significativement inférieure à celle des BMX_{HN} et des athlètes de force. Cette différence de $Myo F_0 m_c^{-1}$ entre les pilotes de BMX_{HN} et les pilotes de BMX_{RN} peut s'expliquer par la différence de niveaux de compétitions et par un entraînement en musculation moins régulier chez les BMX_{RN} . Ce qui explique la similarité de $Myo F_0 m_c^{-1}$ entre les BMX_{RN} et les Cyclistes sur route qui eux non plus n'avaient pas une grande expérience en musculation.

Pour les athlètes de force, $Myo v_0$ et $Myo F_0 m_c^{-1}$ sont similaires à celle des Cyclistes sur route et à celle des BMX_{HN} , respectivement, pour un 1RM significativement supérieur. Cela montre que même si la force athlétique a longtemps été considérée comme une activité qui nécessitait uniquement une force importante développée à faible vitesse [Newton et Kraemer, 1994], il apparait que les méthodes d'entraînement ont beaucoup évolué. Swinton et al. [2009] ont interrogé 28 athlètes de force de niveau international. D'après cette étude, 46 % des athlètes interrogés exécutent leurs répétitions à charges lourdes (80-100 % 1RM) en Squat, Développé Couché et Soulevé de Terre aussi

rapidement que possible, et 79 % de ces athlètes effectuent au moins une des répétitions à vitesse maximale. Pour les charges sous-maximales, 82% des athlètes effectuent leur mouvement le plus rapidement possible. Et aucun de ces athlètes ne s'entraînaient à des charges inférieures à 30%.

Alors bien que le mouvement de Squat soit différent en amplitude du ½ Squat et qu'il implique une masse déplacée et une vitesse moindre, les athlètes de force testés dans cette étude ont atteint des vitesses relatives à la masse déplacée importantes en comparaison avec les autres groupes testés. La force étant le produit de la masse et de l'accélération, il semble important pour les athlètes de force de maximiser les vitesses de déplacement pour des charges élevées lors des entraînements.

Concernant les BMX_{HN} , $Myo v_0$ et $Myo F_0 m_c^{-1}$ sont élevées, et le profil Force-Vitesse de cet échantillon de pilotes en ½ Squat à montrer qu'ils ont développé une puissance moyenne avec une composante de vitesse plus importante que la composante de force :

$$Myo P_{moy} = 0,80v_0 0,48F_0 \quad (64)$$

Cela confirme les résultats observés sur leur profil musculaire inertiel, et qui indique qu'ils développent des $Myo P_{moy} m_c^{-1}$ élevées à des charges relatives faibles. Comme il a été montré dans le Chapitre III.2.2, $Myo F_0$ est un déterminant de la performance en sprint court, il apparaît donc nécessaire d'effectuer un travail en force maximale des membres inférieurs chez ces pilotes de BMX.

Le saut vertical

Le résultat principal du test de détente verticale est que les athlètes de force et les pilotes de BMX (*i.e.*, BMX_{HN} et BMX_{RN}) développent un RFD_{moy} statistiquement similaire, et qu'il est significativement supérieur de 57% à celui développé par les Cyclistes sur route.

De plus, les athlètes de force développent la plus grande SJ $P_{\text{moy}}m_c^{-1}$ et la plus grande SJ $F_{\text{moy}}m_c^{-1}$ de toutes les groupes testés, pour une hauteur de saut maximale similaire à celle des BMX_{HN} et significativement supérieure à celle des cyclistes.

De nombreux auteurs considèrent qu'un RFD élevé est essentiel dans les sports nécessitant une grande production de force dans un temps très court [e.g., [Wilson et al., 1995](#) ; [McBride et al., 1999](#) ; [Haff et al., 2005](#)]. Le RFD représente la capacité à accélérer maximale une masse donnée [[Stone et al., 2004](#)], il est souvent caractériser de déterminant de la « force explosive ».

Le manque de corrélation significative entre RFD_{moy} et t_{5m} peut s'expliquer du fait que le RFD_{moy} ait été calculé à partir du SJ sans charge additionnelle. Or, Lors du départ en BMX, la force à développer est supérieure à celle du poids du cycliste. [Stone et al. \[2004\]](#) n'ont pas trouvé de corrélation significative entre le RFD évalué en condition isométrique et la performance chronométrique en sprint chez des cyclistes sur piste. Mais [Wilson et al. \[1995\]](#) ont montré que les tests dynamiques de RFD étaient mieux corrélés à la performance en sprint que des tests isométriques de RFD. Un travail plus approfondi devra être mené sur le lien entre le RFD et la performance chronométrique lors de départs en sprints en BMX.

3.5. CONCLUSIONS

Le résultat principal de cette étude est que les Pilotes de BMX produisent une puissance maximale élevée à des charges relatives faibles. Il semble nécessaire que les Pilotes de BMX augmentent leur force maximale dynamique pour augmenter leur production de puissance musculaire des membres inférieurs à des charges relatives élevées.

Le manque de corrélation significative entre le taux moyen de développement de force mesuré lors d'un Squat Jump et la performance chronométrique sur 5 m est peut-être dû à

une charge inadaptée. Les relations entre le taux à laquelle la force est développée et les performances chronométriques en sprint chez des pilotes de BMX devront être étudiées de manière plus approfondie sur des mouvements impliquant les membres inférieurs et sur des charges relatives élevées.

4. OPTIMISATION DES PARAMÈTRES EN BMX

D'après les différents résultats obtenus, l'aire de section musculaire et la force maximale théorique moyenne des membres inférieurs apparaissent comme des déterminants de la performance (*i.e.*, la production de puissance maximale) lors de sprints courts (~ 6-30 s) sur cyclo-wattmètre.

D'après [Stone et al. \[2004\]](#), la force maximale musculaire affecte de plusieurs façons la production de puissance : *i)* une charge donnée représentera un pourcentage plus faible pour une personne dont la force maximale est plus grande ; *ii)* il est possible qu'une personne avec une force maximale très importante possède un plus grand pourcentage ou de plus grosses fibres musculaires de type II ; et *iii)* il est possible qu'un entraînement de force maximale entraîne une hypertrophie des fibres musculaires de type II, une augmentation du rapport de l'aire de section Fibres musculaires de type II / type I, et des adaptations au niveau du système nerveux.

Puisque le départ lors des compétitions en BMX est de nature « explosive », c'est-à-dire qu'il nécessite un développement de force maximale dans un temps le plus court possible, il est important de développer la force maximale musculaire des membres inférieurs avec comme notion principale, la vitesse à laquelle cette force est développée.

La [Figure III-34](#) présente un exemple de 3 profils différents de développement de la force en fonction du temps et selon le type d'entraînement. Si le développement de la force maximale est très important pour faciliter le travail à des charges relativement plus faibles, le taux de développement de force (RFD) n'évolue pas de manière proportionnelle. On peut constater sur la [Figure III-34](#) que les athlètes entraînés de manière spécifique à développer une grande « force explosive » développent pour un temps donné une force plus grande (F_A) que les autres groupes (F_B et F_C) malgré une force maximale inférieure au groupe entraîné en force maximale.

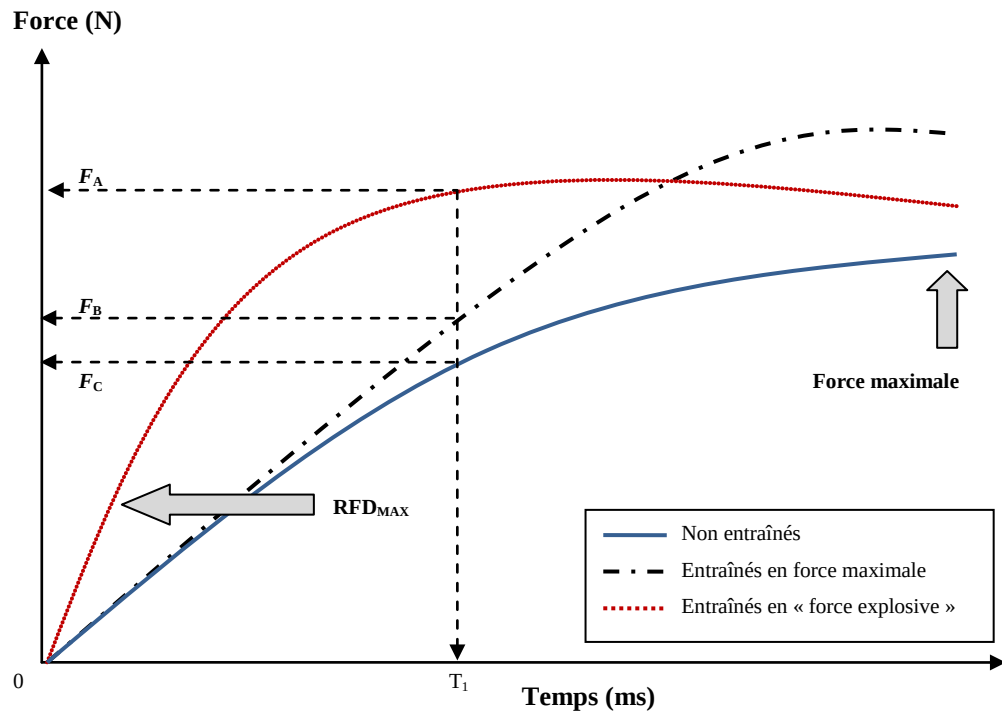


Figure III-34 – Force isométrique en fonction du temps indiquant la force maximale et le taux maximal de développement de force (RFD_{MAX} , Ns^{-1}) chez des athlètes non entraînés, entraînés en force maximale et entraînés en « force explosive », d'après [Newton et Kraemer \[1994\]](#).

Quelque soit le type d'entraînement effectué pour augmenter la force maximale, il est important de maximiser les vitesses d'exécution quelque soit la masse des charges déplacées. [Behm et Sale \[1993\]](#) ont comparé un entraînement isocinétique à différentes vitesses et un entraînement isométrique avec, dans les deux cas, la consigne d'exécuter le mouvement le plus rapidement possible. Ces auteurs ont montré que les principaux stimuli pour une augmentation de la vitesse d'exécution suite à un entraînement étaient les intentions répétées d'exécuter le mouvement le plus rapidement possible et un taux élevé de développement de force.

Si le type d'entraînement en musculation est un facteur primordial, les exercices choisis pour concevoir le programme d'entraînement sont tout aussi important. Pour les membres inférieurs, le Squat est l'exercice le plus testé et le plus utilisé dans les programmes de force maximale et d'hypertrophie, et les performances dans cet exercice

montre une bonne corrélation avec les performances en sprint [Sleivert et Taingahue, 2004 ; Harris et al., 2008].

Lors des départs de BMX, pour appliquer une force maximale sur les pédales, le pilote utilise ses bras et applique une traction sur le guidon. Il serait peut-être intéressant d'introduire des exercices de tirage faisant intervenir les membres supérieurs et inférieurs dans l'entraînement de musculation des pilotes de BMX, comme le soulevé de terre (SDT) (Figure III-35A), le Power Clean (PC) (Figure III-35B).



Figure III-35 – Illustration du Soulevé de Terre (SDT) (A) d'après Graham [2000a], et illustration du Power Clean (B) d'après Duba et al. [2009].

Le SDT est un des 3 exercices spécifiques en Force athlétique, il consiste à soulever une masse posée au sol sans vitesse initiale. Les muscles sollicités lors de ce mouvement sont le grand fessier, les fléchisseurs et les extenseurs de la jambe, le trapèze, le rhomboïde, les deltoïdes, et les muscles fléchisseurs des doigts [Graham, 2000a].

Le PC est une version plus « explosive » du SDT avec une trajectoire et une vitesse verticales de la barre plus grande. Les muscles sollicités lors de ce mouvement sont le grand fessier, les fléchisseurs et les extenseurs de la jambe, les extenseurs du pied, le trapèze, le rhomboïde et les deltoïdes [Graham, 2000b].

Des variantes peuvent être adaptées pour le SDT et le PC en modifiant la hauteur de départ de la barre, pour ainsi concentrer l'entraînement sur des phases particulières du mouvement.

Les exercices pourraient être sélectionnés selon l'objectif de développement de la force maximale et de développement du RFD : le Squat et le SDT permettraient principalement d'augmenter principalement le premier, et le SJ avec charge additionnelle et le PC permettraient un travail sur le second à des charges modérées à élevées.

Des études plus approfondies sur les bénéfices de l'entraînement de musculation et du choix des exercices sur la performance en BMX devront être menées.

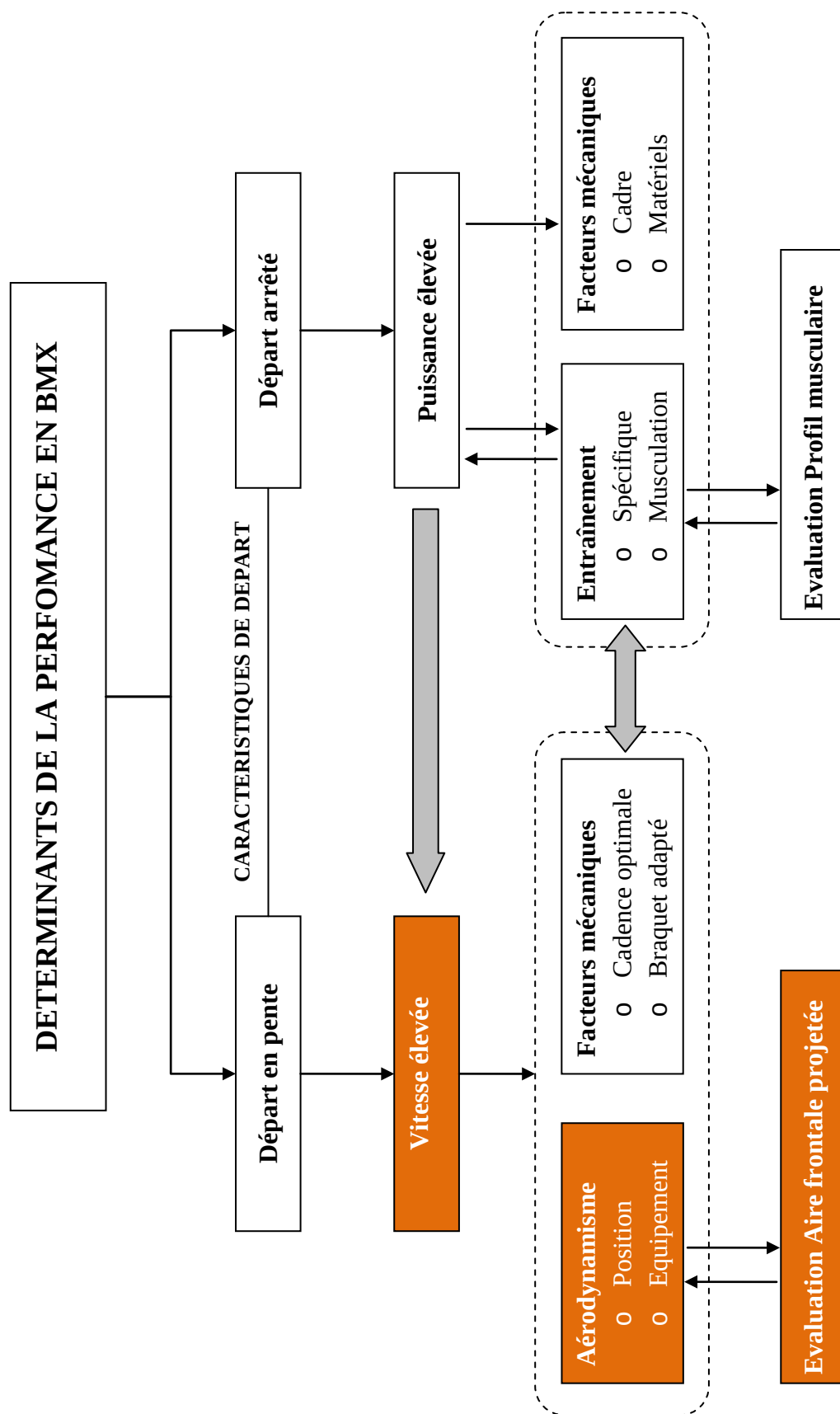


Figure III-36 – Présentation schématique des déterminants de la performance en BMX.

IV. ANALYSE D'UNE VARIABLE DE L'AÉRODYNAMISME : L'AIRE FRONTALE PROJÉTÉE

Lors d'un départ en BMX de type compétition, le départ sur un plan incliné et la production de puissance maximale élevée des membres inférieurs conduit à des vitesses maximales atteintes très importantes ($> 70 \text{ kmh}^{-1}$) (Figure IV-1).

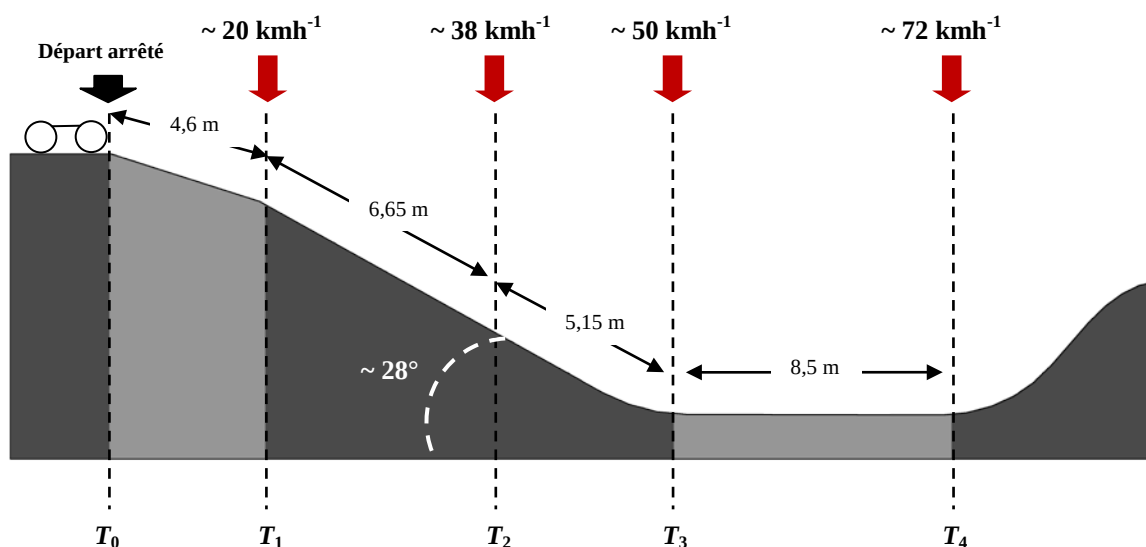


Figure IV-1 – Exemples de vitesses maximales atteintes par un pilote de BMX masculin de haut niveau lors de départs d'entraînement effectués sur une butte de départ identique à celle des Jeux Olympiques de 2008 [Service expertise et optimisation de la performance, FFC].

Sur l'ensemble de la course, le pilote pédale environ 10 s pour une durée totale d'environ 40 s. Quand on sait que quelques centimètres peuvent faire la différence au niveau du placement des pilotes, lors de ces phases où il ne peut plus augmenter sa production de puissance mécanique, il semble donc intéressant d'adopter une position sur

la bicyclette plus aérodynamique, pour minimiser les pertes de vitesse dues aux forces résistives à l'avancement.

1. REVUE DE LITTÉRATURE

Lors de son déplacement, le système cycliste – bicyclette est en interaction avec son milieu et différentes résistances sont générées. Elles sont dépendantes de l'air, du terrain et de certaines caractéristiques du système cycliste – bicyclette. En cyclisme, la vitesse de déplacement de ce système (v , ms^{-1}) est le paramètre fondamental de la performance. Elle est égale au ratio de la puissance mécanique produite par le cycliste (P , Watts) sur les résistances totales à l'avancement (R_T , N) :

$$v = \frac{P}{R_T} \quad (65)$$

Plus la vitesse de déplacement sera élevée plus les forces opposées à l'avancement seront importantes. Pour une même production de puissance mécanique, il paraît alors important de minimiser R_T .

1.1. LES DIFFÉRENTES RESISTANCES OPPOSEES A L'AVANCEMENT EN CYCLISME

Lors de son déplacement, le cycliste est confronté à 3 résistances : la résistance due à la gravité (R_G) lorsqu'il évolue sur un terrain à dénivelé positif, la résistance de roulement (R_R) et la résistance aérodynamique (R_A).

En montée, R_G représente la résistance due au poids du système cycliste – bicyclette et au degré d'inclinaison de la pente. Sur terrain plat, cette force est nulle. R_R représente le contact des roues avec le terrain sur lequel évolue le cycliste. Cette résistance est principalement dépendante de la masse du cycliste, de la nature du terrain, de la pression de gonflage des pneus et du matériau qui les compose. Cette résistance est indépendante de

la vitesse de déplacement pour des vitesses inférieures à 28 ms^{-1} [Grappe et al., 2009], et au-delà de 14 ms^{-1} , R_R représente environ 10% de R_T . Et enfin, R_A caractérise la résistance de l'air sur le système cycliste – bicyclette en déplacement. R_T s'exprime donc ainsi :

$$R_T = R_G + R_R + R_A \quad (66)$$

En cyclisme, sur terrain plat, parmi les résistances totales à l'avancement, R_A est la résistance principale opposée au mouvement [Millet & Candau, 2002]. Pour des vitesses de déplacement supérieures à 14 ms^{-1} , avec une bicyclette classique, R_A représente environ 90% des résistances totales à l'avancement [Candau et al., 1999; di Prampero, 2000; Millet & Candau, 2002; Martin et al., 2006]. Différents paramètres affectent cette résistance et permettent d'optimiser la performance.

1.2. VARIABLES DE LA TRAÎNÉE AÉRODYNAMIQUE

La résistance aérodynamique est composée de deux forces : la portance et la traînée aérodynamiques. Lors du déplacement du système cycliste – bicyclette, si on néglige la portance (qui est une force qui contribue à « attirer » le corps vers le haut), et que seule la traînée aérodynamique s'oppose à l'avancement. Alors la traînée aérodynamique sera notée R_A désormais.

R_A est directement proportionnelle à la masse volumique de l'air (ρ , kgm^{-3}), à l'aire frontale projetée du cycliste et de son équipement (A_p , m^2), au coefficient de traînée (C_D , sans unité), et au carré de la vitesse d'écoulement du fluide sur le corps du cycliste (v_f , ms^{-1}) [Pugh 1974 ; Heil 2001, 2002 ; Millet et Candau 2002]:

$$R_A = 0,5 \rho A_p C_D v_f^2 \quad (67)$$

La masse volumique de l'air, l'aire frontale projetée et le coefficient de traînée sont décrits dans les paragraphes suivants. Leur description permettra de comprendre à quoi correspond la traînée aérodynamique.

1.2.1. MASSE VOLUMIQUE DE L'AIR

La masse volumique de l'air (ρ) est directement proportionnelle à la pression barométrique du fluide (PB , mmHg) et inversement proportionnelle à la température absolue du fluide (T , K) [di Prampero 1986] :

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{PB}{760} \right) \left(\frac{273}{T} \right) \quad (68)$$

Où ρ_0 est la masse volumique de l'air pour $PB = 760$ mmHg et $T = 273$ K, et donc, $\rho_0 = 1.293 \text{ kgm}^{-3}$. La masse volumique de l'air est également influencée par l'humidité de l'air, mais son effet peut être négligé [Millet et Candau, 2002]. De plus, pour une température donnée, PB diminue avec l'altitude. Pour $T = 273$ K, la diminution de PB avec l'altitude (Alt , km) peut être décrite par la relation suivante [di Prampero 2000] :

$$PB = 760 e^{-0,124 Alt} \quad (69)$$

Pour des paramètres identiques, l'augmentation de l'altitude permet une diminution de R_A d'environ 24% de 0 à 2250 m (Mexico) (Tableau IV-1).

Tableau IV-1 – Influence de la masse volumique de l'aire sur la traînée Aérodynamique

Piste	Alt (km)	PB (mmHg)	ρ^a (kgm ⁻³)	R_A^b (N)
Bordeaux (France)	0	760	1.20	29.8
Colorado Springs (CO, Etats-Unis)	1.84	605	0.96	23.9
Mexico (Mexique)	2.25	575	0.91	22.6

^a Avec une température égale à 20°C

^b Basée sur l'équation 3, pour un cycliste avec $A_p C_D = 0.221 \text{ m}^2$ and $v_f = 15 \text{ ms}^{-1}$

Alt = Altitude; **PB** = Pression barométrique; **ρ** = Masse volumique; **R_D** = Traînée aérodynamique; **A_p** = Aire frontale projetée; **C_D** = Coefficient de traînée; **v_f** = Vitesse de déplacement relative au fluide.

Dans une condition climatique particulière et pour une vitesse donnée, le paramètre sur lequel il est possible d'avoir le plus d'influence est l' $A_p C_D$. En évaluant $A_p C_D$, il est possible de quantifier le profil aérodynamique d'un athlète et de déterminer la position optimale sur la bicyclette. Ceci permet également de comprendre l'évolution d' $A_p C_D$ en fonction de la vitesse, de la position du cycliste et de l'équipement utilisé.

1.2.2. COEFFICIENT DE TRAÎNÉE

Le coefficient de traînée est utilisé pour modéliser les facteurs complexes de forme, de position et les flux d'air agissant sur le corps du cycliste. En accord avec l'équation 3, C_D est le ratio entre R_A et le produit de la pression dynamique (q , Pa) du fluide en mouvement et A_p [Pugh, 1971] :

$$C_D = \frac{R_A}{q A_p} \quad (70)$$

Où q est l'équivalent de l'énergie cinétique par unité de volume d'un corps solide en mouvement, et il est défini par l'équation :

$$q = \frac{1}{2} \rho v_f^2 \quad (71)$$

C_D est dépendant du nombre de Reynolds (Re). Re est un nombre sans unité qui donne une mesure du ratio des forces inertielles sur les forces visqueuses. Donc, C_D dépend de la vitesse de l'air et de la rugosité de la surface du corps en mouvement. Pour une position

donnée sur une bicyclette, l'évolution de la relation entre R_A et la vitesse relative au fluide n'est pas linéaire.

Lors de recherches récentes en soufflerie, Grappe [2009] a montré que la relation entre l'aire frontale effective ($A_p C_D$, m²) et la vitesse de l'air était hyperbolique (Figure IV-2).

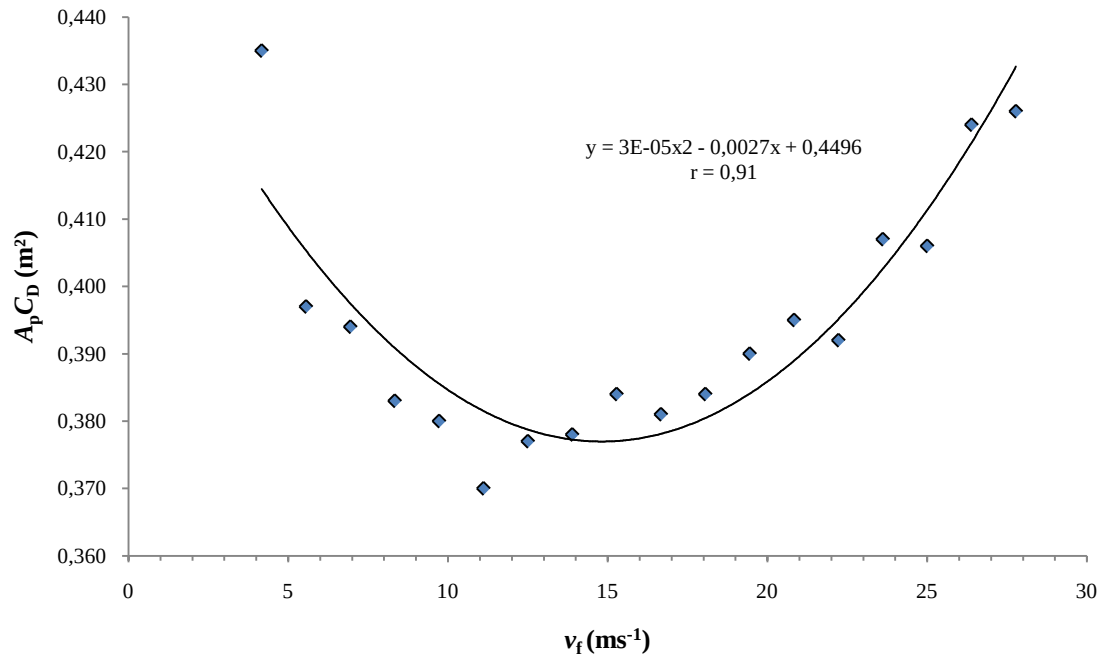


Figure IV-2 – Influence de la vitesse de l'air (v_f , ms⁻¹) sur l'aire frontale effective ($A_p C_D$, m²) pour un cycliste de haut-niveau en position traditionnelle aérodynamique (TAP) sur une bicyclette de route standard en soufflerie [D'après Grappe, 2009].

Les mesures ont été réalisées avec un cycliste de haut-niveau sur une bicyclette de route traditionnelle en position traditionnelle aérodynamique (TAP) (Figure IV-3), où le tronc est parallèle au sol, avec les mains positionnées sur la partie basse du guidon et avec les coudes fléchis à 90°. Ces données indiquent que $A_p C_D$ diminue entre 4,2 et 11,1 ms⁻¹, et augmente entre 11,1 et 13,9 ms⁻¹.



Figure IV-3 – Position aérodynamique traditionnelle (TAP)

Mais pour 3 cyclistes avec des bicyclettes de piste en position de compétition (DP), où le tronc est partiellement parallèle au sol, avec les mains en bas du guidon et les coudes en extension complète, $A_p C_D$ diminue entre 5,6 et 19,4 ms^{-1} (Figure IV-4). La position et la vitesse de l'air pourraient avoir un effet significatif sur Re .

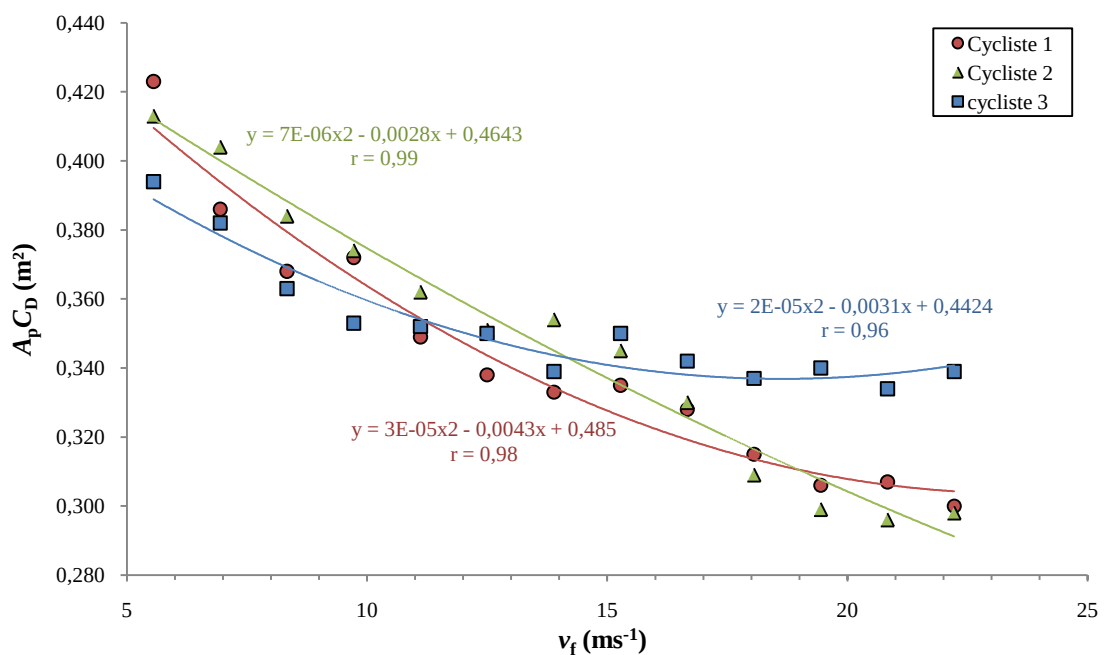


Figure IV-4 – Influence de la vitesse de l'air (v_f , ms^{-1}) sur l'aire frontale effective ($A_p C_D$, m^2) pour trois cyclistes sur piste en position de compétition sur des bicyclettes de piste, en soufflerie [D'après Grappe, 2009].

Oggiano et al. [2009] ont observé en soufflerie que R_A était également dépendant de la vitesse et de la rugosité du textile porté. La conclusion a mis en lumière le fait qu'en

utilisant un tissu avec une plus grande rugosité peut permettre une réduction de la traînée aérodynamique à des vitesses de déplacement faible, tandis qu'un tissu moins rugueux permettra un meilleur gain à grande vitesse.

Grappe [2009] a également étudié l'effet de la rugosité sur $A_p C_D$ en conditions réelles. Sur un vélodrome, la puissance mécanique produite d'un cycliste sur une bicyclette de piste a été mesurée à l'aide d'un wattmètre SRM (Schoberer Rad Messtechnik Scientific version, Welldorf, Germany) en position TAP. La puissance produite par le cycliste a été comparée à différentes vitesses entre 8,7 et 13,9 ms^{-1} dans deux conditions : 1) avec le système cycliste – bicyclette couvert d'un produit spécial censé améliorer la rugosité ; et 2) sans aucun traitement (Figure IV-5).

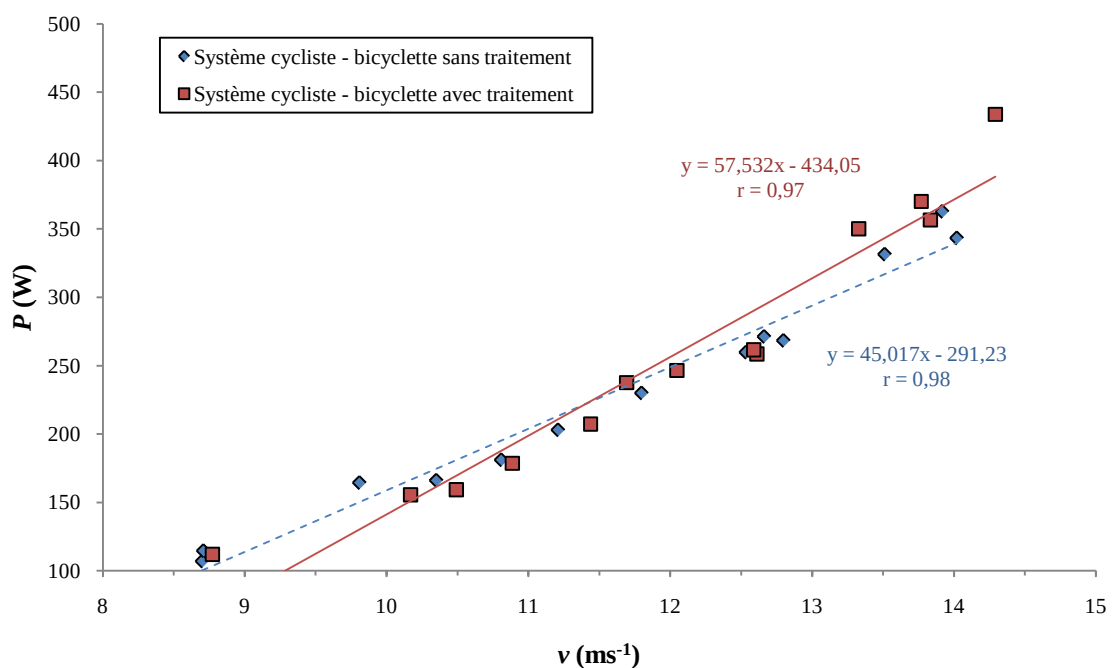


Figure IV-5 – Evolution de la puissance mécanique produite (P , W) en fonction de la vitesse de déplacement (v , ms^{-1}) pour un cycliste sur une bicyclette de piste dans un vélodrome en position aérodynamique traditionnelle (TAP) dans deux conditions : avec traitement et sans traitement [D'après Grappe, 2009].

Entre 11 et 12 ms^{-1} , il n'existe aucune différence entre les deux conditions expérimentales. Entre 8,7 et 11 ms^{-1} , le traitement de surface permet une augmentation de

la vitesse du système cycliste – bicyclette pour la même puissance mécanique produite. Cependant, pour des vitesses de déplacement plus grandes que 12 ms^{-1} , la vitesse n'augmente pas dans la condition où le traitement est appliqué. Ces résultats montrent toute la complexité de la relation entre C_D , la vitesse du fluide sur le corps en déplacement et la rugosité de la surface.

Heil [2001 ; 2005] a montré, qu'en cyclisme, C_D peut être expliqué en fonction de la masse corporelle (m_c , kg) d'après des données obtenues en soufflerie :

$$C_D = 4,45 m_c^{-0,45} \quad (72)$$

Heil [2001] a suggéré que C_D diminue quand la masse corporelle est élevée à la puissance -0,45. En utilisant l'équation précédente, il est possible d'obtenir pour des cyclistes avec une m_c comprise entre 50 et 100 kg, des valeurs de C_D entre 0,76 et 0,56, respectivement. Au regard des découvertes de Grappe [2009] sur la rugosité et l'évolution de C_D avec la vitesse de déplacement, ces données doivent être examinées avec une attention particulière. En effet, une masse corporelle de 100 kg correspond à une plus grande aire de surface cutanée (A_{BSA} , m^2) qu'une masse corporelle de 50 kg, donc à une plus grande portion de peau ou de tissus en contact avec l'air durant le déplacement, et un plus grand C_D . Mais des études plus avancées doivent être menées pour comprendre l'évolution de C_D en fonction de l'anthropométrie du cycliste, de sa position, et des vêtements qu'ils portent.

Pour une vitesse donnée, l'aire frontale effective est le paramètre le plus important de la traînée aérodynamique. En estimant $A_p C_D$, il est possible d'évaluer le profil aérodynamique et la position optimale sur la bicyclette diminuant R_A .

La mesure ou l'estimation d' $A_p C_D$ permet d'évaluer l'aérodynamisme de la position et de l'équipement [Faria, 1992], et ensuite de les optimiser. Il est aussi utile d'établir des modèles mathématiques pour prédire la performance. Jeukendrup et Martin [2001] ont

utilisé un modèle avec des facteurs multiples concernant $A_p C_D$ (e.g., position du corps, cadre de la bicyclette, roues, etc.). Leur modèle a été utile pour montrer la diminution du temps prédit pour parcourir une course contre-la-montre de 40 km en modifiant ces facteurs. Par exemple, la modification de la hauteur du guidon a permis de diminuer l' A_p de 5,8 %, et ce changement s'est traduit par une diminution du temps sur 40 km de 1 minute. Pour une même position du cycliste, l'utilisation d'un cadre dit aérodynamique a permis de diminuer le temps sur 40 km d'un peu plus que 1 minute en comparaison avec un cadre traditionnel.

1.2.3. AIRE FRONTALE PROJÉTÉE

L'aire frontale projetée (A_p , m²) représente la portion visible dans un plan frontal d'un corps vu par un observateur placé exactement en face de ce corps (Figure IV-6). C'est la surface qui est normale au déplacement d'un fluide. Certains auteurs supposent que A_p est une fraction constante de l'aire cutanée corporelle (A_{BSA}) pour établir des descriptions mathématiques de R_A [e.g., di Prampero et al., 1979 ; Capelli et al., 1993 ; Olds et al., 1993 ; 1995].

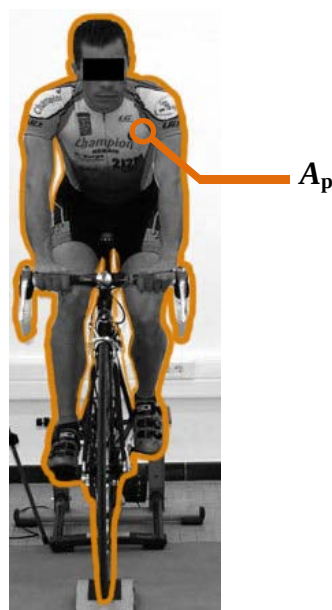


Figure IV-6 – Aire frontale d'un cycliste et de sa bicyclette (A_p , m²) représentée par la zone aux contours oranges.

Cette supposition est utile puisque A_{BSA} est facilement estimée à partir des mesures de deux paramètres anthropométriques, la hauteur corporelle (h_c , m) et la masse corporelle (m_c , kg) [Du Bois et Du Bois, 1916 ; Shuter et Aslani, 2000] :

$$A_{BSA} = 94,9 h_c^{0,655} m_c^{0,441} \quad (73)$$

Mais Swain et al. [1987] et Garcia-Lopez et al. [2008] ont montré que A_p n'était pas proportionnel à A_{BSA} , car le ratio $A_{BSA}m_c^{-1}$ tend à être plus petit chez les plus grands cyclistes.

Heil [2001] a rapporté que la supposition que A_p et A_{BSA} soient proportionnelles étaient correctes pour des cyclistes avec une m_c comprise entre 60 et 80 kg. Il est généralement considéré que A_{BSA} est proportionnelle à m_c élevée à la puissance 0,667 [Astrand et Rodahl, 1986], tandis que A_p est proportionnelle à m_c élevée à la puissance 0,762 [Heil, 2001]. A_p peut être également exprimée avec la position du cycliste sur sa bicyclette à partir de l'angle du tube de selle (STA, °) et de l'angle du tronc (TA, °) par rapport à l'horizontale :

$$A_p = 0,00433 STA^{0,172} TA^{0,096} m_c^{0,762} \quad (74)$$

Néanmoins, Garcia-Lopez et al. [2008] ont observé une faible corrélation entre l'angle du tronc et A_p ($r = 0,42$ $p < 0,05$).

Finalement, les résultats de différentes études montrent que A_p est dépendant de h_c et de m_c , la position sur la bicyclette et les matériaux utilisés. Par exemple, Faria et al. [2005] ont rapporté une méthode pour déterminer A_p en position aérodynamique avec un guidon équipé de prolongateurs en utilisant h_c et m_c :

$$A_p = 0,0293 h_c^{0,725} m_c^{0,425} + 0,0604 \quad (75)$$

1.3. METHODES DE MESURES DE L'AIRE FRONTALE PROJETEE

Bien que l'aire frontale effective ($A_p C_D$) soit le paramètre principal de l'évaluation aérodynamique d'un corps en mouvement dans un fluide, il peut être hautement influencé par A_p .

Les différentes méthodes existantes pour mesurer A_p peuvent être classées en deux conditions : **i)** avec une aire de calibration connue (la méthode de pesage des photographies [*e.g.*, [Pugh, 1970 ; 1971 ; di Prampero et al., 1979 ; Swain et al., 1987 ; Capelli et al., 1993 ; 1998 ; Olds et al., 1993 ; 1995 ; Padilla et al., 2000 ; Heil, 2001](#)], la méthode digitalisation [[Heil, 2001 ; 2002 ; Dorel et al., 2005](#)] ; et **ii)** sans aire de calibration (la méthode de planimétrie [[Olds et Olive, 1999](#)]).

1.3.1. METHODE DE PESAGE DES PHOTOGRAPHIES

Le principe de cette méthode consiste à prendre une photographie dans le plan frontal du cycliste et de sa bicyclette. Une zone de calibration dont l'aire est connue, située à mi-chemin entre la hanche et les épaules du cycliste face à l'appareil photographique, est également photographiée ([Figure IV-7](#)).

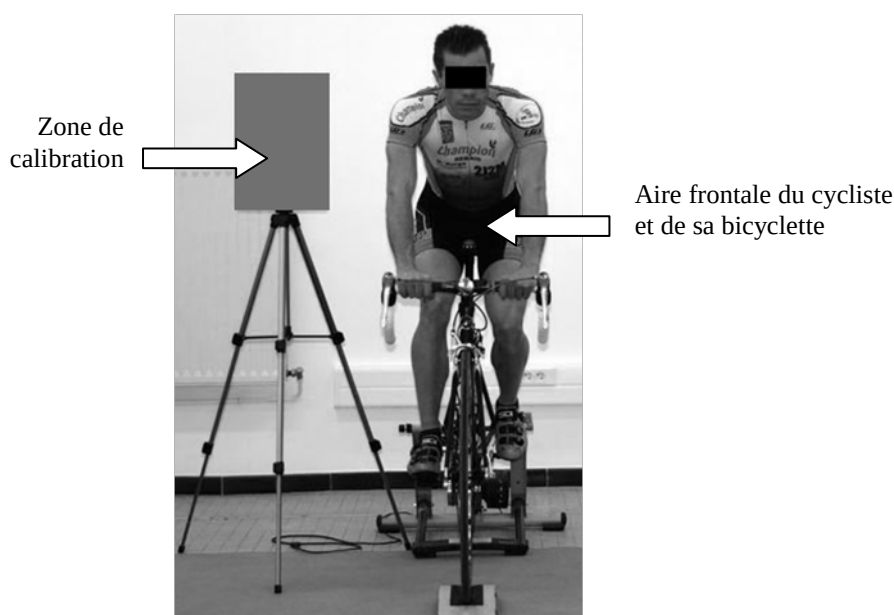


Figure IV-7 – Photographie en laboratoire d'un cycliste sur sa bicyclette avec une zone de calibration dont l'aire est connue placée à ses côtés.

La photographie est imprimée et les zones représentant le cycliste ainsi que l'aire de calibration sont découpées. Ces deux éléments sont pesés séparément à l'aide d'une balance à haute sensibilité.

L' A_p réelle en mètres carré est calculée pour chaque image en multipliant l'aire connue de la surface de calibration par le ration du poids de l'image représentant A_p sur le poids de l'image représentant la surface de calibration [Olds et al., 1995 ; Capelli et al., 1998 ; Padilla et al., 2000 ; Heil, 2001].

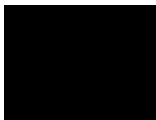
La méthode de pesage des photographies requière peu d'équipements (i.e., une zone de calibration, un appareil photographique analogique ou numérique, une balance avec une grande sensibilité, et un instrument de découpage), mais elle ne peut pas être utilisée dans des conditions réelles de course en raison de la nécessité de la zone de calibration.

Même si cette méthode est rudimentaire [Pugh, 1970 ; 1971 ; Swain et al., 1987], elle présente une forte reproductibilité ($CV = 1,3 \%$) [Debraux et al., 2009]. Et cette méthode a été utilisée comme une référence pour tester la validité d'une méthode d'évaluation de l'aire frontale projetée [Heil, 2001].

La méthode de pesage des photographies présente quelques inconvénients qui peuvent être néanmoins résolus. La découpe des photographies imprimées suivant les contours du cycliste doit être vraiment précise, et pour un expérimentateur aguerri cette opération peut durer environ 5 – 6 minutes par photographie. De plus, sur un format classique de photographie, il est plus facile de mesurer seulement l' A_p du cycliste sans sa bicyclette. Il est donc important d'imprimer les photographies dans un format assez grand, et d'utiliser un couteau de modéliste.

Pour être sûr que la couleur des photographies n'influence pas la masse des photographies, [Debraux et al. \[2009\]](#) ont pesé 5 photographies représentant chacune une couleur unique différente ([Tableau IV-2](#)). Les auteurs ont conclu que la couleur sur des photographies n'influait pas les résultats dans la méthode de pesage des photographies.

Tableau IV-2 – Photographies unicolores développées sur papier (17 x 12.7 cm) et pesées à l'aide d'une balance Metler Toledo AB 204 ($\pm 0,001$ gramme de sensibilité).

Couleurs	« Rouge »	« Noir »	« Bleu »	« Gris »	« Blanc »
					
Rouge*	255	0	0	76	255
Vert*	0	0	0	76	255
Bleu*	0	0	255	76	255
Masse (g)	4,682	4,717	4,707	4,720	4,716

*Code colorimétrique RVB

1.3.2. METHODE DE PLANIMETRIE

Dans la méthode de planimétrie, les contours du cycliste et de sa bicyclette sont tracés avec un planimètre polaire ([Figure IV-8](#)), l'aire à mesurer est calculée par triangulation [[Olds et Olive, 1999](#)].



Figure IV-8 – Planimètre polaire (A) et la représentation graphique de la façon de mesurer une aire à l'aide de cet instrument (B).

Olds et Olive [1999] ont comparé les méthodes de pesage des photographies et de planimétrie en mesurant l' A_p de cyclistes en trois positions (Figure IV-9) :

- **Position « redressée » (UP)** : où le tronc est droit avec les mains placées sur la partie haute du guidon près de la potence.
- **Position de « compétition » (DP)** : où le tronc est partiellement parallèle au sol avec les mains placées sur la partie basse du guidon avec une extension complète des coudes.
- **Position « aérodynamique avec prolongateur » (AeroP)** : où les bras reposent sur des prolongateurs aérodynamiques.

Ces auteurs ont observé une faible différence moyenne significative ($< 3,3\%$) entre les aires frontales projetées déterminées par les deux méthodes. La reproductibilité des deux méthodes était excellente mais meilleure pour la méthode de pesage des photographies comparée à la méthode de planimétrie, $0,25\%$ vs. $2,90\%$, respectivement.



Position redressée (Up)



Position de compétition (DP)

Position Aérodynamique avec
prolongateur (AeroP)**Figure IV-9** – Positions représentatives des positions classiques adoptées en cyclisme sur route.

1.3.3. METHODE DE DIGITALISATION

Comme la méthode de pesage des photographies, la méthode de digitalisation [Heil, 2001 ; 2002 ; Dorel et al., 2005 ; Debraux et al., 2009] requière l'utilisation d'une zone de calibration dont l'aire est connue placée près du cycliste et de sa bicyclette. Cependant, cette méthode est numérique, et elle ne nécessite pas de couper les photographies.

Cette méthode consiste à digitaliser une photographie papier à l'aide d'un digitaliseur (Figure IV-10A) [Heil, 2001], ou de digitaliser une photographie numérique à l'aide d'une logiciel d'analyse de l'image (*e.g.*, Scion Image Release Alpha 4.0.3.0.2 for Windows, Scion Corporation, Frederick, Md., USA) (Figure IV-10B) [Heil, 2002 ; Dorel et al., 2005 ; Debraux et al., 2009].

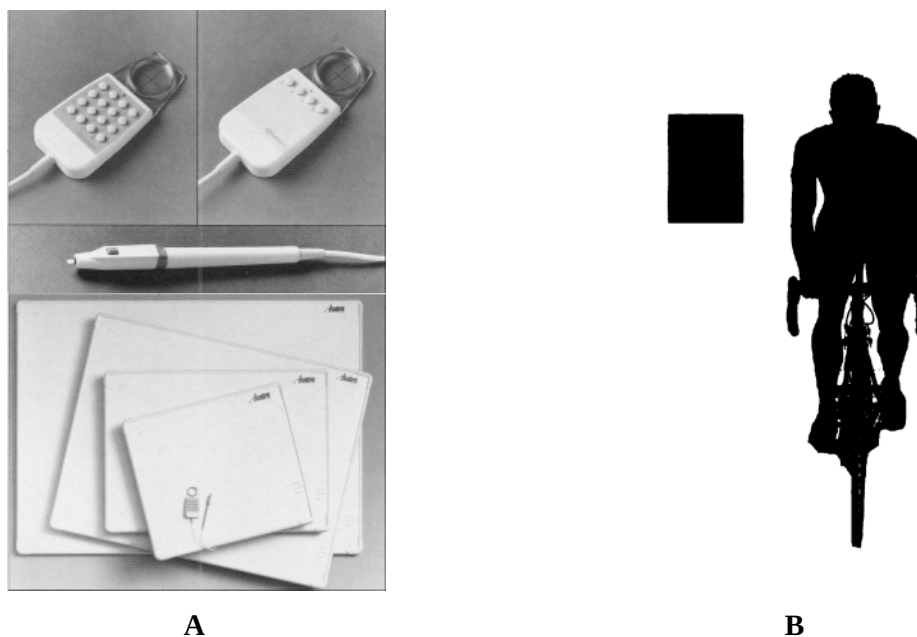


Figure IV-10 – Digitaliseur manuel (A) et image exportée sous Scion Image Release Alpha 4.0.3.0.2 for Windows (B).

Pour utiliser les photographies numériques et travailler de manière plus efficace, un travail de préparation de l'image est nécessaire. Les zones à mesurer doivent être assombries le plus possible : 1) le fichier image peut être converti en un fichier noir et blanc en utilisant un logiciel de retouche d'images (*e.g.*, The Gimp, Adobe Photoshop) [Debraux et al., 2009] ; ou 2) en utilisant une lumière placée derrière le cycliste et sa bicyclette [Dorel et al., 2005]. Ces techniques permettent d'automatiser la sélection des aires à mesurer dans le logiciel de digitalisation.

Dans un logiciel d'analyse basée sur l'image (*e.g.*, Scion Image Release Alpha 4.0.3.0.2 for Windows, Scion Corporation, Frederick, Md., USA), l'image en noir et blanc est importée, et les zones du cycliste et de sa bicyclette et de la zone de calibration sont sélectionnées (Figure IV-10B). Le logiciel mesure le nombre de pixels inclus dans chaque zone.

L' A_p réelle en mètres carré de l'image digitalisée est obtenue en déterminant le ratio de pixels des deux zones, et en multipliant ce ratio par l'aire réelle connue de la zone de

calibration. Pour mesurer seulement l' A_p du cycliste, il est nécessaire de prendre une photographie du cycliste et de sa bicyclette, et une photographie de la bicyclette, séparément.

La méthode de digitalisation nécessite un ordinateur personnel, le logiciel est libre, gratuit et simple d'utilisation, un appareil photographique numérique (ou un scanner pour numériser les photographies imprimées). Cependant, il requière de l'utilisateur de corriger les photographies (*e.g.*, obscurcir les zones à mesurer, changer les extensions des fichiers images) avant de les ouvrir dans le logiciel Scion Image, ce qui demande du temps et de la pratique. Cette méthode est valide en comparaison avec la méthode de pesage des photographies [Heil, 2001 ; Debraux et al., 2009].

1.4. LIMITES DES METHODES ACTUELLES DE MESURE DE L'AIRE FRONTALE PROJÉTÉE

Les méthodes de mesure actuelles ne permettent pas d'évaluer A_p en conditions réelles de course. En effet, que ce soit dans la méthode de pesage des photographies, de planimétrie ou de digitalisation, une aire de référence est utilisée pour le calcul de l' A_p réelle du cycliste et de sa bicyclette. Et cette zone de référence nécessite une prise de la photographie en laboratoire.

De plus, l' A_p mesurée en laboratoire ne sera pas forcément identique tout au long d'une course, le cycliste adoptant différentes postures selon le terrain et les différentes actions qu'il exécute.

RESUME – LES RESISTANCES TOTALES A L’AVANCEMENT EN CYCLISME

- Lors de son déplacement, le système cycliste – bicyclette rencontre 3 résistances différentes : la résistance due à la gravité (R_G , N), la résistance de roulement (R_R , N) et la résistance aérodynamique (R_A , N). La résistance aérodynamique en cyclisme est principalement composée de la traînée aérodynamique (R_A , N).
- R_A est la résistance principale qui s’oppose à l’avancement du système cycliste – bicyclette à des vitesses supérieures à 14 ms^{-1} sur terrain plat. Environ 90% de la puissance mécanique produite par le cycliste est utilisée pour lutter contre cette résistance. Plus la vitesse de déplacement augmente et plus R_A augmente.
- R_A est dépendante de la vitesse de déplacement (v , ms^{-1}), de la masse volumique de l’air (ρ , kgm^{-3}) et de l’aire frontale effective ($A_p C_D$, m^2). $A_p C_D$ représente l’aérodynamisme du système cycliste – bicyclette. A_p est l’aire frontale projetée (m^2) et C_D est le coefficient de traînée (sans unité).
- Pour diminuer R_A , il est impératif de diminuer ρ et $A_p C_D$. La masse volumique dépend principalement de l’altitude et de la température, tandis que $A_p C_D$ dépend de la position du cycliste sur sa bicyclette et du matériel utilisé.

2. MISE EN PLACE D'UNE NOUVELLE MÉTHODE DE MESURE DE TERRAIN [[Annexe A](#)]

2.1. INTRODUCTION

En cyclisme, sur terrain plat, à des vitesses de déplacement supérieures à 14 ms^{-1} , la résistance aérodynamique (R_A) représente environ 90% des résistances totales à l'avancement que rencontre un cycliste. R_A est proportionnelle au carré de la vitesse d'écoulement de l'air sur le cycliste. Plus le cycliste augmentera sa vitesse et plus la résistance aérodynamique nécessitera une puissance mécanique à produire importante.

A une altitude donnée, pour maintenir une vitesse élevée, tout en produisant une puissance mécanique moindre, il est nécessaire d'optimiser l'aire frontale effective ($A_p C_D$, m^2). Deux facteurs composent l'aire frontale effective : le coefficient de traînée (C_D , sans unité) qui représente le profil aérodynamique du cycliste et de sa bicyclette ; et l'aire frontale projetée (A_p , m^2) qui représente la surface située dans le plan perpendiculaire au flux de l'air sur le système cycliste – bicyclette. Si ces deux paramètres sont améliorables, il est en revanche plus difficile de quantifier C_D indépendamment de A_p . A l'inverse, $A_p C_D$ et A_p peuvent être facilement déterminées, ce qui peut permettre une quantification indirecte de C_D .

Différentes méthodes existent pour mesurer A_p (la méthode de pesage des photographies, la méthode de planimétrie et la méthode de digitalisation), mais toutes ces méthodes sont prévues pour être utilisées en condition de laboratoire, et dans ce cas la position du cycliste sur sa bicyclette n'est pas totalement représentative de la position adoptée lors de certaines phases d'une course, par exemple, la position debout sur les pédales en danseuse. L'évaluation sur le terrain permet également de quantifier l' A_p à différents moments d'une course pour permettre de suivre l'évolution de la position au cours du temps.

Le but de cette étude est d'expérimenter une nouvelle méthode de mesure de terrain de l' A_p et de valider cette méthode par rapport à deux méthodes de référence : la méthode de pesage des photographies et la méthode de digitalisation. Cette méthode n'utilise pas de zone d'étalonnage à placer sur aux côtés du cycliste et de sa bicyclette, elle est donc utilisable sur le terrain lors d'un entraînement ou d'une compétition.

2.2. METHODES EXPERIMENTALES

2.2.1. SUJETS

Neuf cyclistes masculins de niveaux régional à national se sont portés volontaires pour participer à cette étude. Les valeurs moyennes ($\pm$ Ecart-Type) de l'âge, la hauteur corporelle (h_c , m) et de la masse corporelle (m_c , kg) sont 27 ($\pm$ 14) ans, 1,89 ($\pm$ 0,06) m et 72,7 ($\pm$ 8,6) kg, respectivement.

2.2.2. PROTOCOLE DE MESURE EN CONDITIONS DE LABORATOIRE

Pour déterminer l'aire frontale projetée (A_p , m²) en conditions de laboratoire, des photographies de chaque cycliste bicyclette sont prises. Chaque bicyclette personnelle est placée sur un « home-trainer » stationnaire (Tacx Basic, Pays-Bas), elle est mise à niveau à l'aide d'un niveau à bulle et le tout est positionné devant un mur blanc.

Sur la bicyclette, les cyclistes placent leur pied droit en avant (i.e., La manivelle est à 90°, où 0° est la position de la manivelle verticale et vers le haut), et leur pied gauche en arrière (position de la manivelle à 270°).

Pour permettre de comparer les différentes méthodes de mesure d' A_p , une zone de calibration dont l'aire est connue (0,110148 m²) est placée à mi-chemin entre la hanche et les épaules des sujets, face à l'appareil photographique ([Figure IV-11A](#)). Un appareil

photographique est monté sur un trépied mis à niveau. L'appareil photographique est placé 5 m devant le sujet, et 1,1 m au-dessus du sol (Figure IV-11B) [Heil, 2001 ; 2002].

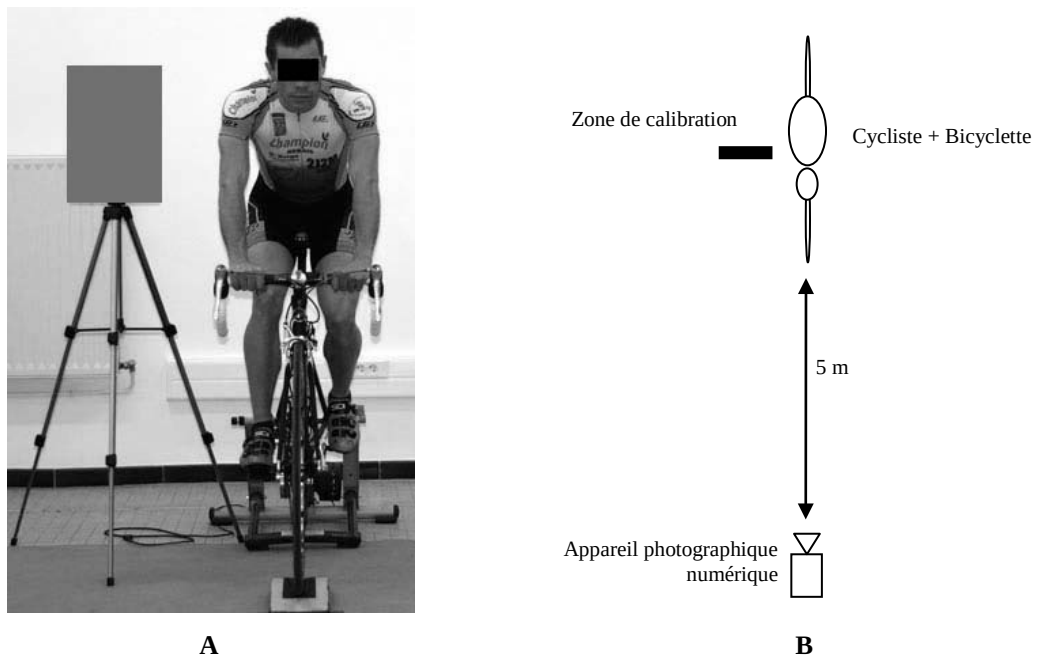


Figure IV-11 – Exemple d'aire frontale projetée d'un cycliste et de sa bicyclette (A_p , m²) avec zone de calibration (A) et dispositif de prise de la photographie en laboratoire (B).

Les mesures d' A_p sont réalisées à partir d'images photographiques numériques prises à l'aide d'un appareil photographique numérique d'une résolution de 8 mégapixels (Canon EOS 300D, France). L' A_p est déterminé selon deux positions différentes où le cycliste est sur le « home-trainer » avec sa propre bicyclette, sans casque, avec ses vêtements de compétition, et le regard fixé sur l'appareil photographique. Les deux positions sont celles communément utilisées en compétition sans prolongateurs aérodynamiques (Figure IV-12) :

- **Position redressée (UP)** (Figure IV-12A) : où le tronc est droit avec les mains placées sur la partie haute du guidon avec une extension complète des coudes.
- **Position aérodynamique traditionnelle (TAP)** (Figure IV-12B) : où le tronc est parallèle au sol, avec les mains positionnées sur la partie basse du guidon et avec les coudes fléchis à 90°.

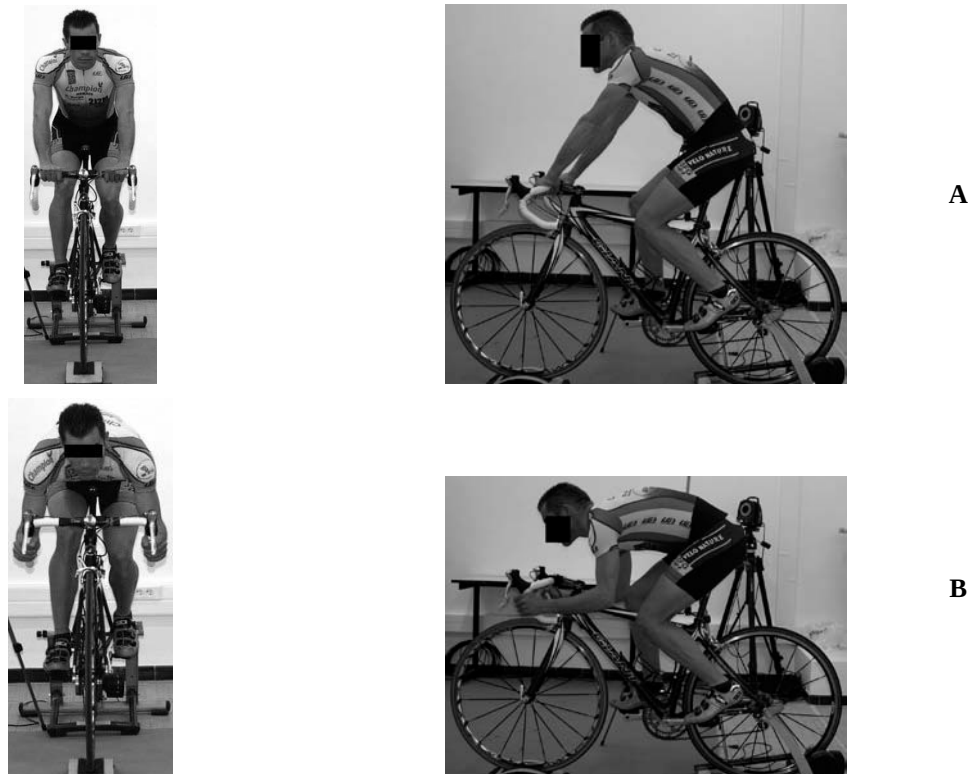


Figure IV-12 – Exemple de photographies dans les deux positions testées : Position redressée (UP) (A) et position traditionnelle aérodynamique (TAP) (B).

Toutes les photographies sont ensuite transférées sur un ordinateur personnel et imprimées dans un format classique (100 × 130 mm) pour analyse.

Pour comparer les différentes méthodes entre elles, l' A_p corporelle est utilisée pour comparer la méthode de pesage des photographies et la nouvelle méthode de terrain, et l' A_p totale est utilisée pour comparer la méthode de digitalisation et la nouvelle méthode de terrain.

2.2.3. DETERMINATION DE L'AIRE FRONTALE PROJETEE A L'AIDE D'UNE NOUVELLE METHODE DE TERRAIN

Chaque fichier de photographie numérique (3072 × 2048 pixels) est ouvert dans un logiciel de Conception Assisté par Ordinateur (C.A.O.) (Pro/ENGINEER® Wildfire™ 2.0, Etats-Unis). Dans ce logiciel, à l'aide d'un outil spécifique, la photographie est remise à

l'échelle réelle grâce à une dimension référence verticale ou horizontale de la zone de calibration.

Les contours des zones représentant l'aire du cycliste (*i.e.*, A_p corporelle), ainsi que celle représentant l'aire du cycliste et de sa bicyclette (*i.e.*, A_p totale) sont tracés avec un outil de courbe dans le mode de dessin 2D du logiciel (Figure IV-13A). L' A_p corporelle inclue les vêtements et les chaussures du cyclistes, tandis que l' A_p totale inclue l' A_p corporelle et chaque partie observable de la bicyclette (incluant les rayons des roues, mais pas les câbles). Puisque le logiciel a la possibilité de mesurer uniquement des volumes 3D, l'aire délimitée est extrudée pour obtenir un volume (Figure IV-13B), une option suffit ensuite à mesurer l' A_p (Figure IV-13C).

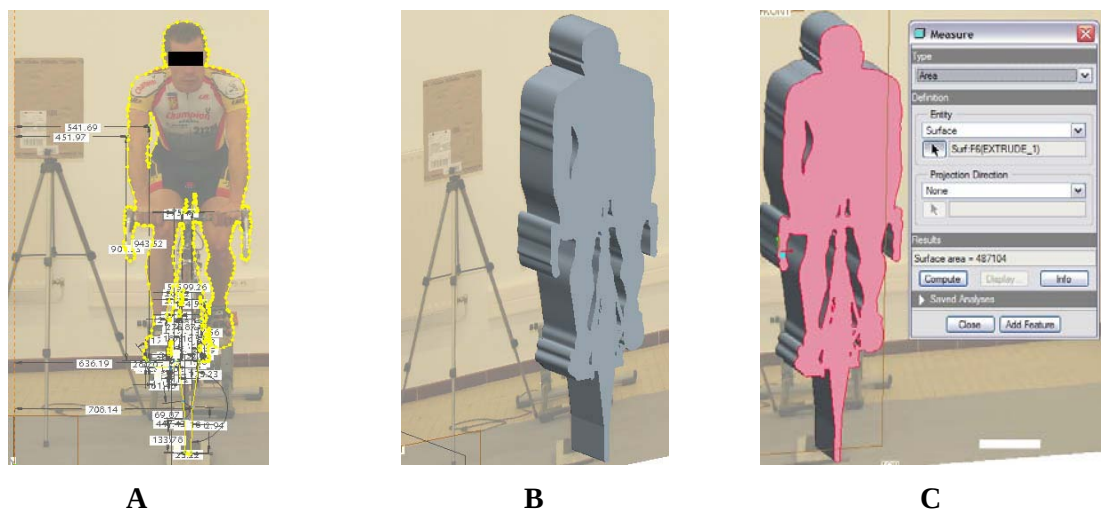


Figure IV-13 – Démonstration de la mesure de l'aire frontale projetée totale du cycliste et de sa bicyclette à l'aide d'une nouvelle méthode de terrain. L' A_p est délimitée (A) puis extrudée (B) et mesurée en mm² (C).

2.2.4. DETERMINATION DE L'AIRE FRONTALE PROJETEE A L'AIDE DE LA METHODE DE REFERENCE : LA METHODE DE PESAGE DES PHOTOGRAPHIES

Pour déterminer l' A_p corporelle en utilisant la méthode de pesage des photographies (WP), les photographies des sujets et de la zone de calibration sont développées sur papier au format 100 × 130 mm. Ensuite, la zone représentant l' A_p corporelle du cycliste et la

zone de calibration sont découpées séparément à l'aide d'un couteau de modéliste (Figure IV-14A) et pesées en utilisant une balance à haute sensibilité (Metler Toledo AB 204, ± 0.001 gramme de sensibilité) (Figure IV-14B).

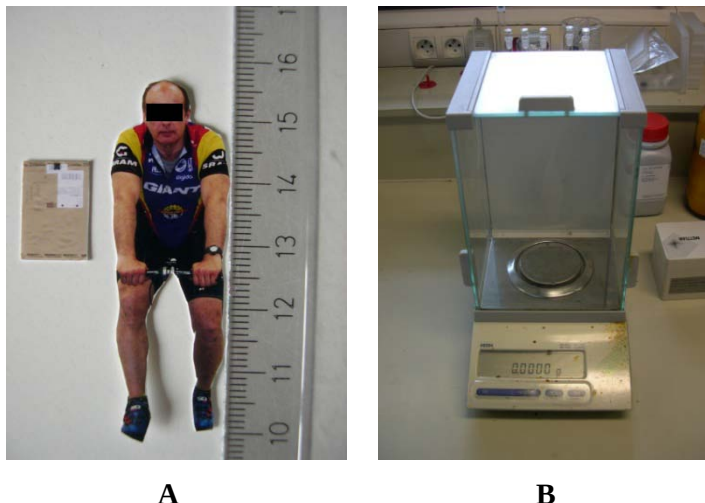


Figure IV-14 – Exemple d’une découpe de zone représentant l’ A_p du cycliste et de la zone de calibration (A) et la balance Metler Toledo AB 204 ($\pm 0,001$ gramme de sensibilité) (B) utilisée pour peser ces zones.

L’ A_p réelle du cycliste en mètres au carré est ensuite calculée pour chaque image en multipliant l’aire connue de la zone de calibration ($0,110148 \text{ m}^2$) par le ratio de la masse de la zone représentant l’ A_p du cycliste sur la masse de la zone représentant la zone de calibration [Heil, 2001 ; 2002 ; Olds et al., 1995].

2.2.5. DETERMINATION DE L’AIRE FRONTALE PROJETEE A L’AIDE DE LA METHODE DE DIGITALISATION

Dans le but de comparer avec une troisième méthode, chaque photographie numérique (3072×2048 pixels) en format « .JPEG » est modifiée via un logiciel de retouche d’images (Adobe Photoshop CS2, Adobe, Etats-Unis). Chaque image est convertie en un fichier noir et blanc, et les zones représentant le cycliste et sa bicyclette et la zone de calibration sont noircies (Figure IV-15). Ensuite, ces nouveaux fichiers noir et blanc sont ouverts dans un logiciel d’analyse de l’image (Scion Image Release Alpha

4.0.3.2 for Windows, Scion Corporation, Frederick, Md., Etats-Unis) pour mesurer l' A_p totale. En sélectionnant chaque zone, une mesure du nombre de pixels compris dans cette zone est obtenue.

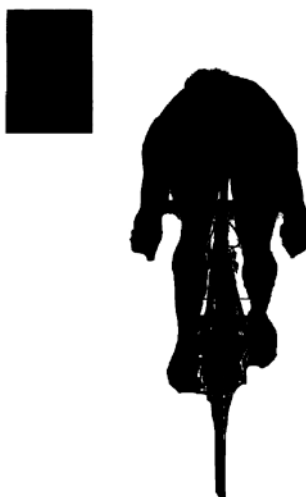


Figure IV-15 – Exemple d’une image noircie représentant l’ A_p totale et la zone de calibration, utilisée dans le logiciel Scion Image Release Alpha 4.0.3.2 for Windows (Scion Corporation, Frederick, Md., Etats-Unis).

L’ A_p totale réelle en mètres au carré de chaque image traitée est déterminée en multipliant l’aire connue de la zone de calibration ($0,110148 \text{ m}^2$) par le ratio du nombre de pixels de la zone représentant l’ A_p totale sur le nombre de pixels de la zone représentant la zone de calibration.

2.2.6. DETERMINATION DE L’AIRE FRONTALE EFFECTIVE EN CONDITIONS REELLES DE PEDALAGE

Les méthodes classiques pour mesurer l’aire frontale projetée ne permettent pas d’évaluer l’aire frontale en conditions réelles de pédalage. Néanmoins, coupler la mesure d’ A_p avec la mesure de la puissance mécanique produite dans une des disciplines peut s’avérer très utile pour déterminer l’aire frontale effective et le coefficient de traînée.

Pour cela, sept cyclistes masculins de niveaux régional à national se sont portés volontaires pour participer à cette étude. Les valeurs moyennes ($\pm$ Ecart-Type) de l’âge, la

hauteur corporelle (h_c , m) et de la masse corporelle (m_c , kg) sont $25 (\pm 5)$ ans, $1,77 (\pm 0,03)$ m et $70,5 (\pm 5,4)$ kg, respectivement.

Ces cyclistes ont exécuté 4 essais de 3 minutes chacun, sur un terrain plat avec revêtement en asphalte, sans vent, dans une position (les mains sont placées sur le guidon avec les coudes fléchis à environ 90°) (Figure IV-16A) et à différentes vitesses (7, 8 et 10 ms^{-1}). Ces tests ont été réalisés sur le même vélo tout-terrain (VTT) (XTC composite Disc 2 2007, Giant, Etats-Unis) avec les spécifications suivantes : masse = 11,9 kg, taille du cadre = 0,58 m, diamètre des principaux tubes du cadre = 0,0318 m, équipé avec une roue avant Mavic X 317 Disc et une roue arrière DT Swiss H 450. Tous les sujets portaient un casque (Casque Air-8, Specialized) et les mêmes vêtements de course durant tous les essais.

Les mesures de l' A_p totale sont déterminées à partir de photographies numériques prises en extérieures à l'aide d'un appareil photographique d'une résolution de 7,1 mégapixels (Nikon Coolpix S500).



Figure IV-16 – Exemple de photographie prise en condition de terrain sans pose de zone de calibration. La référence utilisée pour remettre la photographie à l'échelle est la largeur du guidon (0,582 m) (A). L' A_p totale du sujet est ensuite mesurée à l'aide d'un logiciel de C.A.O. (B).

L' A_p totale est mesurée en utilisant la nouvelle méthode de terrain (NM) avec comme valeur de référence, la largeur du guidon (0,582 m) (Figure IV-16A). La puissance mécanique produite et la vitesse de déplacement sont enregistrées à l'aide d'un PowerTap (modèle professionnel, CycleOps, Etats-Unis) (Figure IV-17) [Gardner et al., 2004 ; Bertucci et al., 2005b].



Figure IV-17 – PowerTap, modèle Professional, CycleOps, Etats Unis.

A partir de ces mesures et dans ces conditions, R_T est supposé être constitué uniquement de R_A et R_R . Basée sur l'équation 1, R_T est déterminé, pour chaque essai, en mesurant la puissance mécanique produite par le cycliste (P , W) à vitesse constante (v , $m \cdot s^{-1}$) :

$$R_T = \frac{P}{v} \quad (76)$$

En accord avec l'équation 2 :

$$R_T = R_A + R_R \quad (77)$$

$$R_T = 0,5 \rho A_p C_D v^2 + R_R \quad (78)$$

En considérant 2 constantes a et b :

$$a = 0,5 \rho A_p C_D \quad (79)$$

$$b = R_R \quad (80)$$

$$R_T = av^2 + b \quad (81)$$

En utilisant une analyse par régression linéaire, il est possible de déterminer $A_p C_D$ pour la condition testée en accord avec l'équation 25 ($A_p C_D = a / 0,5 \rho$) à partir la pente a de la droite représentative de l'équation 27. L'effet de l'humidité de l'air est supposé

négligeable [Capelli et al., 1993 ; Grappe et al., 1997 ; di Prampero, 2000] dans les conditions expérimentales de cette étude, $\rho = 1.210 \text{ kgm}^{-3}$.

2.2.7. ANALYSES STATISTIQUES

Les données de l' A_p totale et de l' A_p corporelle sont testées pour leur hétéroscédasticité en calculant la corrélation d'hétéroscédasticité entre 1) les différences absolues entre la nouvelle méthode de terrain (NM) et la méthode de pesage des photographies (WP) et l' A_p totale moyenne, et 2) entre les différences absolues entre la nouvelle méthode et la méthode de digitalisation (DM) et l' A_p corporelle moyenne, comme décrit par Atkinson et Nevill [1998]. Bien que ces analyses montrent que l'hétéroscédasticité n'était pas présente, les données sont logarithmiquement transformées selon les recommandations de Nevill [1997] et Nevill et Atkinson [1997]. Les limites d'agrément à 95% des différences de l' A_p corporelle entre la nouvelle méthode et la méthode de pesage des photographies et les limites d'agrément à 95% des différences de l' A_p totale entre la nouvelle méthode et la méthode de digitalisation sont définies en utilisant la méthode de Bland et Altman [1986]. Les différences d' A_p totale et d' A_p corporelle sont établies en fonction des valeurs moyennes et 95 % des différences sont attendues entre les deux limites d'agrément qui sont calculées comme la différence moyenne ± 1.96 écart-type (ET) des différences, exprimées comme biais $\pm$ l'erreur aléatoire selon Atkinson et Nevill [1998]. L'intervalle de confiance à 95% (IC_{95%}) pour le biais est aussi calculé.

La mesure de l' A_p corporelle dans les deux positions testées (n=18) en utilisant la nouvelle méthode est aussi comparée à la méthode de pesage des photographies avec un test T sur séries appariées, et de la même manière, la mesure de l' A_p totale dans les deux positions testées (n=18) en utilisant la nouvelle méthode comparée à la méthode de digitalisation avec un test T sur séries appariées.

Un coefficient de corrélation Bravais-Pearson est calculé pour déterminer la signification de la relation entre les méthodes. De plus, la reproductibilité de la nouvelle méthode et la méthode de pesage des photographies a été déterminée à l'aide du coefficient de variation (CV) sur les 30 mesures de l' A_p corporelle d'un sujet en position TAP. Dans la même session de mesure, les deux méthodes sont testées 30 fois avec la même photographie. Le CV est calculé comme le ratio de ET sur la moyenne, multiplié par 100. Pour la méthode de digitalization, le CV n'est pas calculé car la technique employée (*i.e.*, cliquer avec un outil sur la zone à mesurer) donnera exactement la même mesure sur chaque essai. Le niveau de significativité est fixé à $p < 0,05$. Les données sont présentées comme valeurs moyennes ($\pm$ ET).

2.3. RESULTATS

Les valeurs moyennes pour l' A_p corporelle et totale pour chacune des trois méthodes et pour chaque position sont présentées dans le [Tableau IV-3](#).

Tableau IV-3 – Aires frontales projetées (A_p) totale et corporelle moyennes ($\pm$ ET) de cyclistes mesurées dans deux positions avec la méthode de pesage des photographies (WP), la nouvelle méthode de terrain (NM) et la méthode de digitalisation (DM).

	WP		NM		DM
Position	A_p corporelle (m ²)	A_p corporelle (m ²)	A_p totale (m ²)	A_p totale (m ²)	A_p totale (m ²)
UP	0,432 ($\pm$ 0,030)	0,430 ($\pm$ 0,031)	0,565 ($\pm$ 0,037)	0,533 ($\pm$ 0,031)	
TAP	0,341 ($\pm$ 0,029)	0,338 ($\pm$ 0,029)	0,450 ($\pm$ 0,040)	0,426 ($\pm$ 0,031)	

UP : Position redressée ; TAP : Position traditionnelle aérodynamique.

Aucune différence significative observée entre WP et NM et entre DM et NM ($p < 0,05$).

Aucune différence significative n'a été observée entre la nouvelle méthode et la méthode de pesage des photographies pour la mesure de l' A_p corporelle en position UP ($p = 0,43$) ou en position TAP ($p = 0,14$), et entre la nouvelle méthode et la méthode de digitalisation pour la mesure de l' A_p totale en position UP ($p = 0,12$) et en position TAP ($p = 0,31$).

La corrélation entre NM et WP ($y = 1,0087x - 0,006$), et entre NM et DM ($y = 0,9444x + 0,0085$) est significative et positive ($r = 0,99$, $p < 0,05$). La [Figure IV-18](#) montre les valeurs prédites de la nouvelle méthode en fonction de leurs valeurs résiduelles.

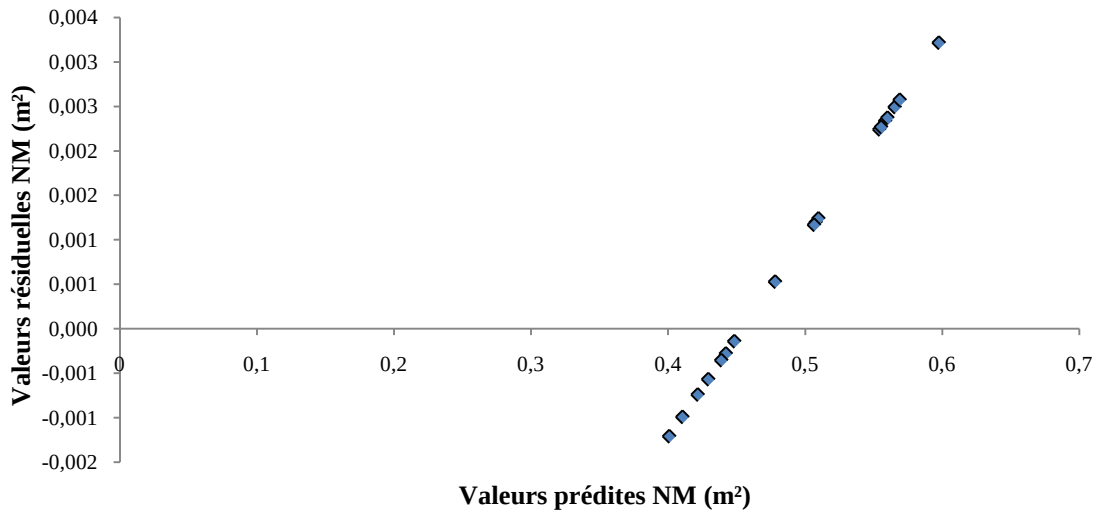


Figure IV-18 – Valeurs prédites de la nouvelle méthode (NM) en fonction des valeurs résiduelles.

Les limites des ratios d'agrément des différences de l' A_p corporelle entre NM et WP sont $1,0071 \times \div 1,0342$ ($IC_{95\%} = 0,9737 - 1,0415$) ([Figure IV-19](#)).

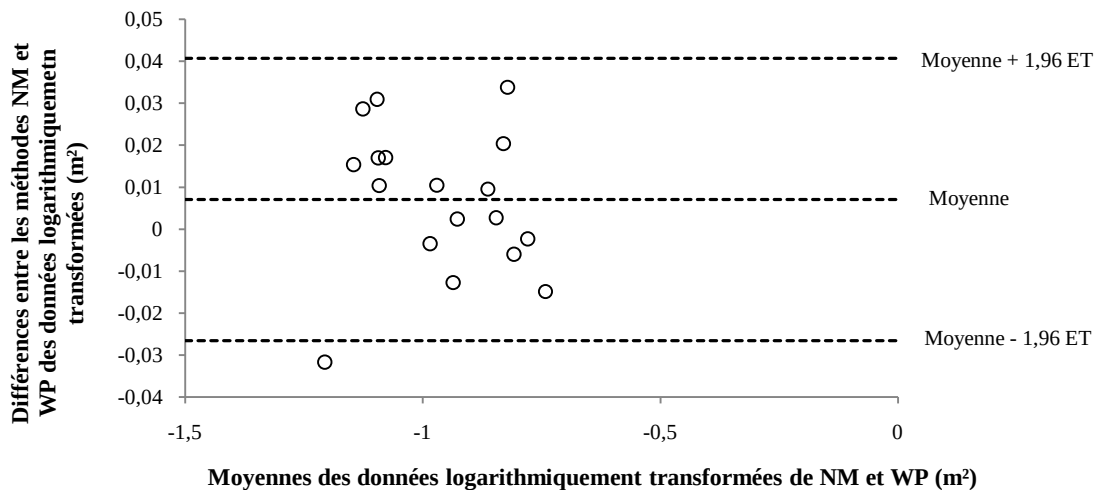


Figure IV-19 – Différence entre les données logarithmiquement transformées de l' A_p corporelle mesurée avec NM et WP, selon [Bland et Altman \[1986\]](#).

Les limites des ratios d'agrément des différences de l' A_p totale entre NM et DM sont $1,0399 \times \div 1,0282$ ($IC_{95\%} = 1,0114 - 1,0692$) ([Figure IV-20](#)).

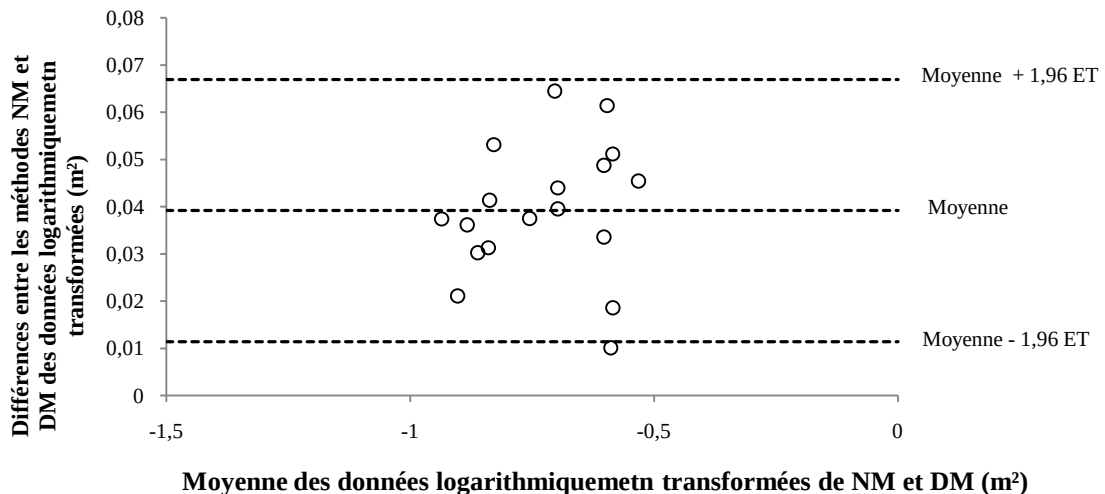


Figure IV-20 – Selon Bland et Altman, la différence entre les données logarithmiquement transformées de l' A_p totale mesurée avec NM et DM.

Pour l' A_p corporelle, le biais moyen ($\pm 1,96$ ET) entre NM et WP est de $0,0071 \pm 0,0336$ m². Pour l' A_p totale, le biais moyen ($\pm 1,96$ ET) entre NM et DM est de $0,0392 \pm 0,0278$ m². Le CV pour NM et WP est de 0,1% et 1,26%, respectivement.

Concernant la détermination de $A_p C_D$ dans les conditions réelles, les valeurs moyennes ($\pm$ ET) des A_p totales mesurées avec NM sont $0,469 (\pm 0,024)$ m². En utilisant la méthode de régression linéaire, la valeur moyenne ($\pm$ ET) de $A_p C_D$ est égale à $0,361 (\pm 0,021)$ m². Donc la valeur moyenne ($\pm$ ET) de C_D est $0,771 (0,054)$.

2.4. DISCUSSIONS

Cette étude est la première à utiliser cette nouvelle méthode de terrain pour évaluer l'aire frontale projetée de cyclistes dans deux positions classiques utilisées durant les conditions réelles de cyclisme.

L'analyse en utilisant la méthode de [Bland et Altman \[1986\]](#) indique que les différences de ratio des limites d'agrément de l' A_p corporelle entre NM et WP et de l' A_p totale entre NM et DM sont petites : $1,0071 \times \div 1,0342$ ($IC_{95\%} = 0,9737 - 1,0415$) and $1,0399 \times \div 1,0282$ ($IC_{95\%} = 1,0114 - 1,0692$), respectivement. Pour l' A_p corporelle, le biais

moyen ($\pm 1,96$ ET) entre NM et WP est de $0,0071 \pm 0,0336 \text{ m}^2$. Pour l' A_p totale, le biais moyen ($\pm 1,96$ ET) entre NM et DM est de $0,0392 \pm 0,0278 \text{ m}^2$. Et les CV pour NM et WP sont très faibles (0,1 and 1,26 %, respectivement). Ces résultats suggèrent que cette nouvelle méthode de terrain est une méthode valide et reproductible pour la détermination de l'aire frontale projetée d'un sujet lors de différentes activités sportives.

Les deux positions testées dans cette étude correspondent à deux des quatre positions étudiées par Heil [2001] avec la méthode de digitalisation. Les caractéristiques anthropométriques des sujets sont similaires à celles de l'étude de Heil [2001], indiquant en outre le potentiel d'inférence de nos données à un plus vaste échantillon de cyclistes. Pour UP, les mesures moyennes des A_p des sujets de cette étude avec NM sont comparables à celles reportées par Heil [2001] pour l' A_p corporelle ($0,430 \pm 0,031 \text{ m}^2$ vs. $0,401 \pm 0,0089 \text{ m}^2$, respectivement) et pour l' A_p totale ($0,533 \pm 0,031 \text{ m}^2$ vs. $0,525 \pm 0,0099 \text{ m}^2$, respectivement). Pour TAP, les mesures moyennes des A_p des sujets de cette étude avec NM sont comparables à celles reportées par Heil [2001] pour l' A_p corporelle ($0,338 \pm 0,029 \text{ m}^2$ vs. $0,342 \pm 0,0077 \text{ m}^2$, respectivement) et pour l' A_p totale ($0,426 \pm 0,031 \text{ m}^2$ vs. $0,460 \pm 0,0091 \text{ m}^2$, respectivement). La compatibilité de ces deux études renforce le potentiel de la nouvelle méthode pour l'évaluation de l'aire frontale projetée.

La nouvelle méthode ne requière pas une aire de calibration à placer au côté du cycliste. A la place, une mise à l'échelle réelle est faite par le logiciel utilisé (Pro/ENGINEER® Wildfire™ 2.0) en utilisant une distance verticale ou horizontale (m), qui peut être facilement mesurée sur une bicyclette (*e.g.*, largeur du guidon, diamètre des roues). Il est important de noter également que NM est rapide et relativement simple d'utilisation, et qu'elle peut être utilisée avec n'importe quel logiciel de C.A.O. Un autre avantage de cette méthode est que l' A_p totale et corporelle peuvent être déterminées. Avec de la pratique, cette nouvelle méthode prend environ 2 à 3 minutes pour un sujet et 2

mesures (A_p corporelle et totale). Mais cette méthode requière un ordinateur et un logiciel de C.A.O. qui est cher.

La méthode de digitalisation nécessite également un ordinateur mais le logiciel est gratuit, et facile d'utilisation. Cependant, l'utilisateur doit retoucher les photographies (*i.e.*, noircir les zones à mesurer, changer les extensions de fichier) avant de les ouvrir dans le logiciel Scion Image, ce qui demande du temps et de la pratique. Mais cette méthode est plus rapide que les méthodes NM et WP si les photographies sont prises dans des conditions appropriées (*e.g.*, avec une source de lumière derrière le cycliste) [Dorel et al., 2005]. Mais de cette façon, les mesures de l' A_p corporelle ne sont pas possibles.

Au contraire, la méthode WP ne requière pas d'ordinateur mais elle nécessite de développer les photographies sur papier, de les découper minutieusement et de les peser avec une balance à haute sensibilité. Toutes ces opérations durent environ 5 – 6 minutes pour juste une mesure de l' A_p corporelle. Mais la méthode WP ne nécessite pas d'ordinateur et de logiciel spécifique, et si la photographie est imprimée en grandes dimensions, il est possible et plus simple de mesurer A_p corporelle et A_p totale.

Pour être sûr que la couleur n'influence pas la masse des photographies dans la méthode WP, 5 photographies représentant chacune une couleur unique (rouge, bleu, gris, noir et blanc) ont été pesées (4,682 – 4,720 g). La densité est entre 216,86 et 218,62 gm^{-2} . En comparaison, la densité pour les photographies utilisées dans la méthode WP était de 250 gm^{-2} pour l'aire de calibration et 250,98 gm^{-2} pour la zone représentant l' A_p corporelle. Cette différence peut être expliquée par la différence de papier. Il est possible de conclure que la couleur n'influence pas significativement les résultats de cette méthode pour notre étude.

Le but de quantifier l' A_p totale est de permettre plus d'efficacité dans l'utilisation des modèles mathématiques existants pour estimer la performance. Une évaluation de l' A_p

totale la plus proche des conditions réelles de compétition assurera une plus grande précision des modélisations mathématiques. Selon la littérature, l' A_p totale est proportionnelle à la masse corporelle (m_c) et à la taille (h_c) des sujets [Heil, 2001]. Plus grands sont m_c et h_c , et plus grand sera l' A_p totale, ce qui démontre l'importance d'optimiser la position sur la bicyclette. Heil [2005] a supposé que C_D était fonction de m_c , et que C_D tendait à diminuer avec l'augmentation de m_c :

$$C_D = 4,45 m_c^{-0,45} \quad (82)$$

Mais C_D dépend également de la position du cycliste sur la bicyclette et de l'aérodynamisme de l'équipement (*e.g.*, bicyclette, casque). Il est possible de supposer que des plus grandes valeurs de m_c signifieraient une plus grande surface cutanée, et donc de plus grande résistance de frottements.

Olds et al. [1995] ont estimé l' A_p totale d'être égale à 18,5% de l'aire de surface cutanée avec la méthode WP quand le cycliste est en position de Contre-la-montre. Anton et al. [2007] ont utilisé cette valeur pour évaluer l' A_p totale and pour montrer que la performance en contre-la-montre sur terrain plat est liée au travail maximal absolu et aux variables anthropométriques.

Cependant, nous pouvons supposer que les changements dans la conception des bicyclettes entre 1995 et 2007 pourraient suggérer que les estimations de l' A_p totale comme proportionnelle à l'aire de surface cutanée auraient besoin d'être reconsidérées. Avec une plus grande précision dans la mesure de l' A_p totale, cela pourrait permettre une meilleure estimation de C_D et de l' $A_p C_D$ pour affiner la détermination de R_A . Cela améliorerait les tests en soufflerie et rendrait les modèles mathématiques plus proches des conditions réelles de course. En effet, Gonzales-Haro et al. [2007] ont rapporté que sur 9 modèles théoriques pour estimer la puissance mécanique produite en cyclisme, seulement deux d'entre eux étaient corrélés avec un wattmètre (SRM), et seulement deux autres étaient les

meilleurs estimateurs de la puissance maximale produite et du $\text{VO}_{2\text{MAX}}$ sur un vélodrome. L' A_p totale peut être facilement déterminée dans de nombreuses positions qui ensuite pourraient être testées dans des conditions réelles avec un wattmètre pour connaître $A_p C_D$.

La nouvelle méthode a été testée dans des conditions réelles. Des mesures de $A_p C_D$ ont été réalisées sur 7 cyclistes pour une position en vélo tout-terrain en utilisant les données obtenues à partir d'un PowerTap. Les valeurs moyennes ($\pm$ ET) sont $0,469 (\pm 0,024) \text{ m}^2$ pour l' A_p totale et $0,771 (\pm 0,054)$ pour le C_D . Les valeurs de C_D sont comparables aux valeurs obtenues par Padilla et al. [2000] : 0,50 – 0,75. Dans la comparaison de ces données, les valeurs de cette études montrent une corrélation négative non-significative entre C_D et A_p (Figure IV-21A) tandis que les valeurs reportées par Padilla et al. [2000] montrent a corrélation positive non-significative (Figure IV-21B), mais leur étude concernait le record de l'heure, donc une bicyclette et une position différentes.

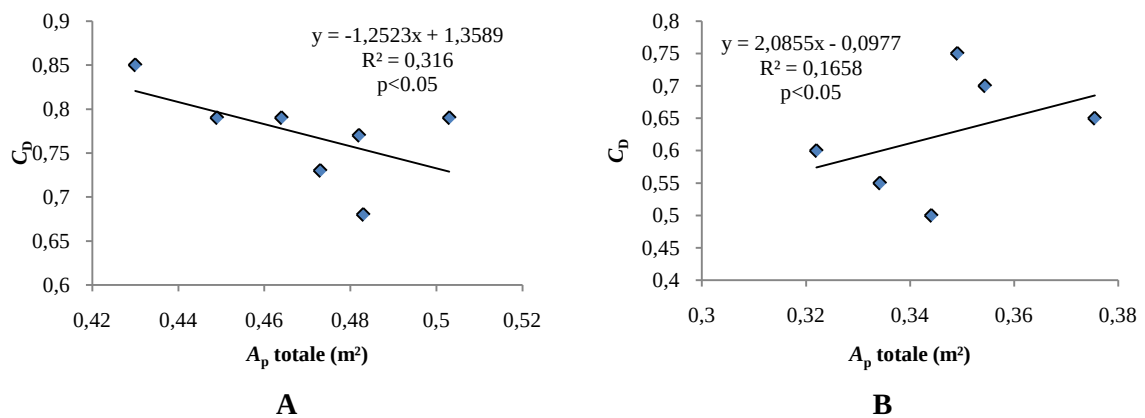


Figure IV-21 – Evolution du coefficient de traînée (C_D) en fonction de l'aire frontale projetée (A_p) totale pour des cyclistes sur vélo tout-terrain (A) et pour des cyclistes lors d'un record de l'heure [Padilla et al., 2000] (B).

Et dans l'étude de Padilla et al. [2000], les valeurs de C_D sont estimées à partir des valeurs de la littérature pour différentes positions et différents équipements, seulement deux ont été calculés à partir de mesure en soufflerie. Ces résultats peuvent suggérer qu'une A_p totale optimale devrait être estimée dans le but d'optimiser le C_D et donc l' $A_p C_D$.

De plus, Grappe [2009] a montré que l'évolution de C_D était dépendante de la vitesse, et de la rugosité de la surface qui recouvre les cyclistes en déplacement.

Ces trois méthodes de mesure de l'aire frontale projetée sont utiles et peu onéreuses pour tester plusieurs positions et postures du cycliste dans le but de minimiser l' A_p totale. Pour les athlètes de haut-niveau, ces méthodes peuvent être utiles pour préparer des tests en conditions réelles avec un wattmètre ou en soufflerie et minimiser ainsi les coûts et le temps passé en laboratoire. Il peut être également utile en course « contre-la-montre » d'observer si la fatigue pourrait affecter l' A_p totale et si les cyclistes peuvent conserver l'efficacité de la posture durant la durée de la course.

Cependant, une limite de ces 3 méthodes est que l' A_p peut seulement fournir une information dans un plan, elle ne peut pas à elle seule évaluer la forme complexe et l'aérodynamisme d'un corps dans sa totalité.

2.5. CONCLUSIONS

Le principal résultat de cette étude indique que la nouvelle méthode de terrain est une technique valide et reproductible pour déterminer l'aire frontale projetée d'un cycliste et de son équipement en laboratoire et sur le terrain. Cette méthode est efficace pour déterminer l' A_p corporelle et totale aussi bien que les autres techniques existantes (*i.e.*, la méthode de pesage des photographies et la méthode de digitalisation), de plus et contrairement aux méthodes actuelles celle-ci est utilisable dans les conditions de terrain lors d'entraînements ou de courses. Chacune de ces méthodes permet de déterminer l' A_p d'une manière différente, avec plus ou moins de rapidité. La similarité des mesures d' A_p entre NM et WP et entre NM et DM, et l'excellent agrément entre elles offrent un fort support pour l'utilisation de la méthode NM dans des sports divers où la résistance créée par l' A_p du sujet et de son équipement est un problème majeur.

En utilisant ces techniques, couplées avec un wattmètre ou avec la méthode de décélération, des entraîneurs ou des scientifiques peuvent évaluer les paramètres aérodynamiques facilement et à moindre coûts.

De plus, l'utilisation de méthodes numériques de calcul de dynamiques des fluides en 3D [Defraeye et al., 2010] pourrait permettre une approche intéressante sur l'étude de l'aérodynamisme en comparaison à la soufflerie. L'alternative numérique semblerait moins coûteuse, et permettrait d'obtenir plus facilement des informations sur les flux d'air en interaction avec le système Cycliste – Bicyclette.

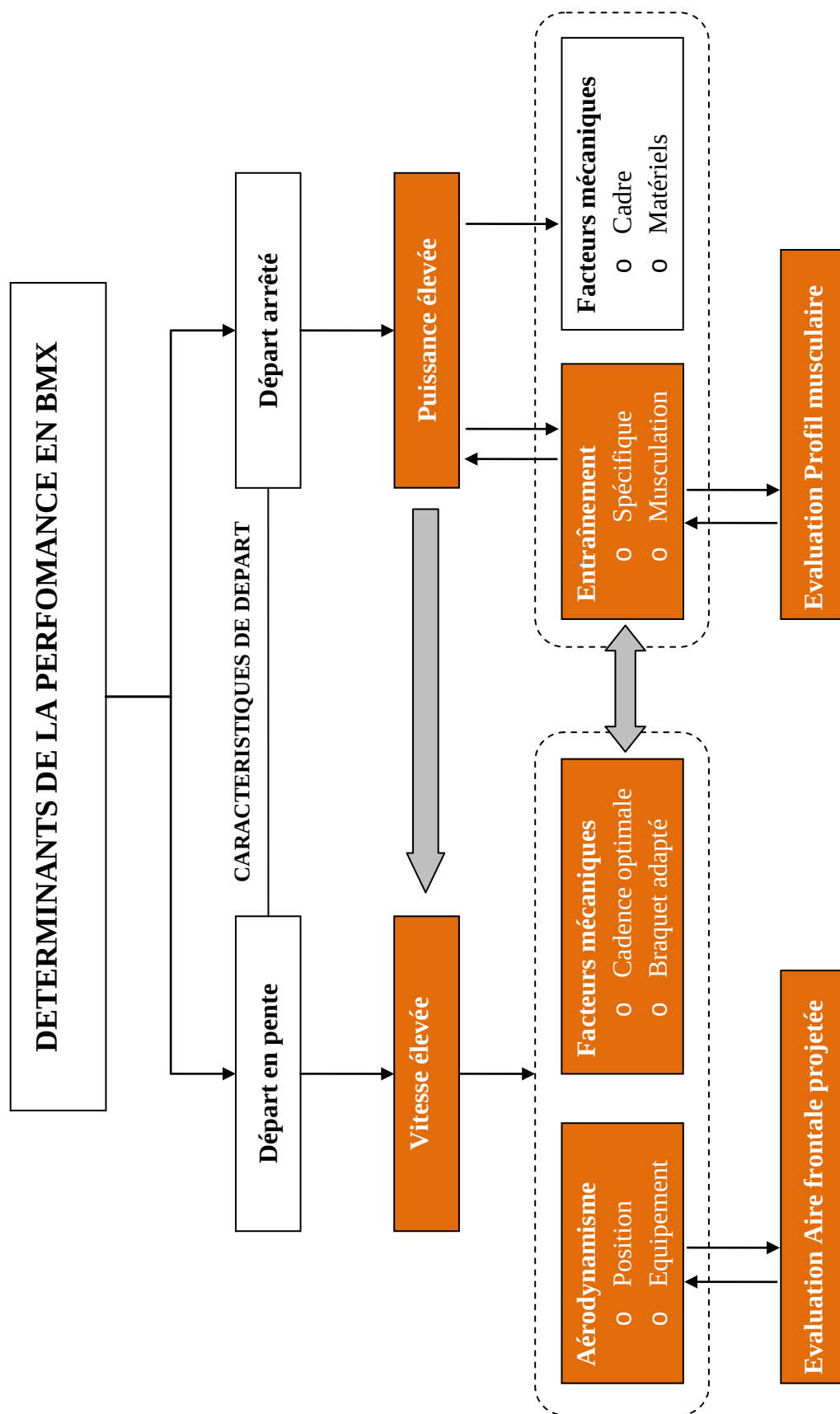


Figure IV-22 – Présentation schématique des déterminants de la performance en BMX.

V. RELATIONS COUPLE – VITESSE ET PUISSANCE – VITESSE EN BMX LORS D’UN SPRINT DE 80M CHEZ DES PILOTES DE HAUT NIVEAU

En compétition de BMX, les départs s’effectuent à l’arrêt et sur un plan incliné. La course se déroule sur une piste spécifique longue de 300 à 400m en 30-40s. Les vitesses maximales atteintes lors d’un départ peuvent dépasser 70 kmh^{-1} chez les pilotes de haut niveau. En course, le placement des pilotes en fin de la première ligne droite est déterminant pour le classement final. En effet, il est très difficile de doubler les pilotes adverses ensuite. Cette discipline exige donc une production élevée de puissance dès les premiers coups de pédales.

A l’instar du cyclisme sur piste [Dorel et al., 2005], les pilotes de BMX n’utilisent pas de système de dérailleur, bien que ce type de matériel soit autorisé par l’UCI [UCI]. Cela signifie que les pilotes doivent choisir leur braquet avant la course, ce qui influence la cadence de pédalage lors du sprint. Or la cadence de pédalage influence la production de puissance mécanique lors du pédalage. Bertucci et al. [2007] ont montré que les performances chronométriques de la première ligne droite étaient significativement ($p < 0,01$) corrélées avec la production maximale de puissance lors de tests de « Force – Vitesse » sur cyclo-wattmètre.

De plus les vitesses maximales atteintes étant élevées ($> 19 \text{ ms}^{-1}$), la résistance aérodynamique (R_A) apparait comme la principale force résistive opposée à l’avancée du système Pilote – Bicyclette ($> 90\%$ de R_T). Pour des conditions climatiques données, l’aire

frontale projetée du système Pilote – Bicyclette (A_p totale) et le coefficient de traînée de ce système sont les deux paramètres principaux avec la vitesse influençant R_A .

Le but de cette étude est d'analyser l'aire frontale projetée totale en utilisant la méthode de terrain du Chapitre IV.2, les relations Couple – Vitesse et Puissance – Vitesse lors d'un sprint départ arrêté de 80 m sur terrain plat. L'objectif est de déterminer les facteurs déterminants (*i.e.*, la vitesse sur 80 m) lors de ce sprint et d'analyser plus étroitement la relation entre la cadence optimale de pédalage, la cadence moyenne lors du sprint et entre l'aire frontale projetée totale et la performance sur 80 m.

1. METHODES EXPERIMENTALES

1.1. SUJETS

Sept pilotes de BMX (3 femmes et 4 hommes) de haut niveau ont participé à cette étude. Les valeurs moyennes ($\pm$ Ecart-Type) de l'âge, la hauteur corporelle (h_c , m) et de la masse corporelle (m_c , kg) sont 20 ($\pm$ 2) ans, 1,73 ($\pm$ 0,09) m et 68,7 ($\pm$ 6,6) kg, respectivement.

1.2. AIRE FRONTALE PROJETEE TOTALE

Les mesures d' A_p totale sont réalisées à partir d'images photographiques numériques prises à l'aide d'un appareil photographique numérique d'une résolution de 8 mégapixels (Canon EOS 300D, France) lors des sprints de 80 m. L'aire frontale projetée totale des pilotes de BMX a été mesurée à l'aide de la nouvelle méthode de terrain décrite dans le Chapitre IV.2 avec comme valeur de référence, la largeur de la barre centrale du guidon (0,23 – 0,25 m) (Figure V-1).



Figure V-1 – Exemple de l'aire frontale projetée totale (A_T , m^2) d'un sujet sur sa propre bicyclette mesurée lors d'un sprint de 80 m.

L'appareil photographique est monté sur un trépied et mis à niveau à 1,1 m au-dessus du sol. L'appareil photographique est placé 5 m derrière la ligne d'arrivée du sprint et la prise de la photographie s'effectue lorsque le le sujet arrive à environ 15 m de la ligne d'arrivée ([Figure V-2](#)).

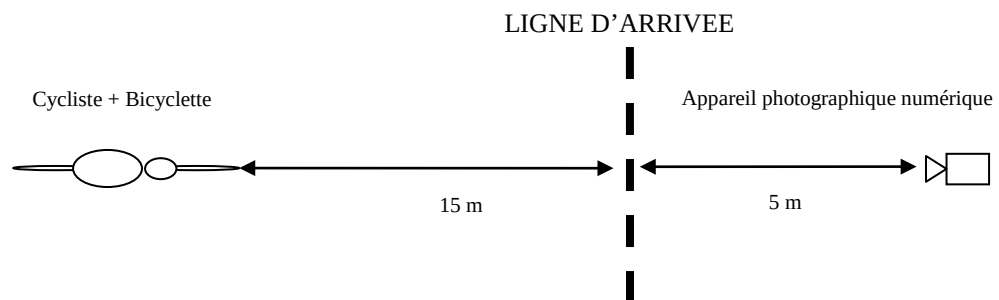


Figure V-2 – Dispositif de prise de la photographie pour la mesure de l'aire frontale projetée totale sur le terrain lors de sprints.

1.3. SPRINT DE 80 M

Après un échauffement spécifique, les pilotes de BMX ont effectué 3 sprints de 80 m à vitesse maximale, avec 5 min de récupération entre chaque sprint. Le départ était réalisé « arrêté », le pilote était maintenu par un expérimentateur placé derrière lui (Figure V-3).



Figure V-3 – Illustration du maintien des pilotes par un expérimentateur lors des départs arrêtés.

La puissance mécanique maximale (P_{MAX} , W), la cadence de pédalage (Cad , rpm), le couple (C , Nm) et la vitesse maximale sur 80 m (v_{80} , ms^{-1}) ont été mesurés à l'aide du système PowerTap (modèle professionnel, CycleOps, Etats-Unis) (Figure IV-17) [Gardner et al., 2004 ; Bertucci et al., 2005b].

Lors des sprints, la relation linéaire obtenue entre le couple (C) et la cadence de pédalage (Cad) permet de déterminer par extrapolation C_0 et Cad_0 qui sont le couple maximal théorique et la cadence de pédalage maximale théorique, respectivement (Figure V-4A). A partir de la relation Puissance – Vitesse qui peut être décrite par une relation polynomiale [Hautier et al., 1996 ; Dorel et al., 2005], P_{MAX} et Cad_{Opt} sont déterminées (Figure V-4B). Les valeurs de P_{MAX} sont également exprimées relativement à la masse corporelle ($P_{MAX}m_c^{-1}$, Wkg^{-1}) et à l'aire frontale projetée totale ($P_{MAX}A_p^{-1}$, Wm^{-2}).

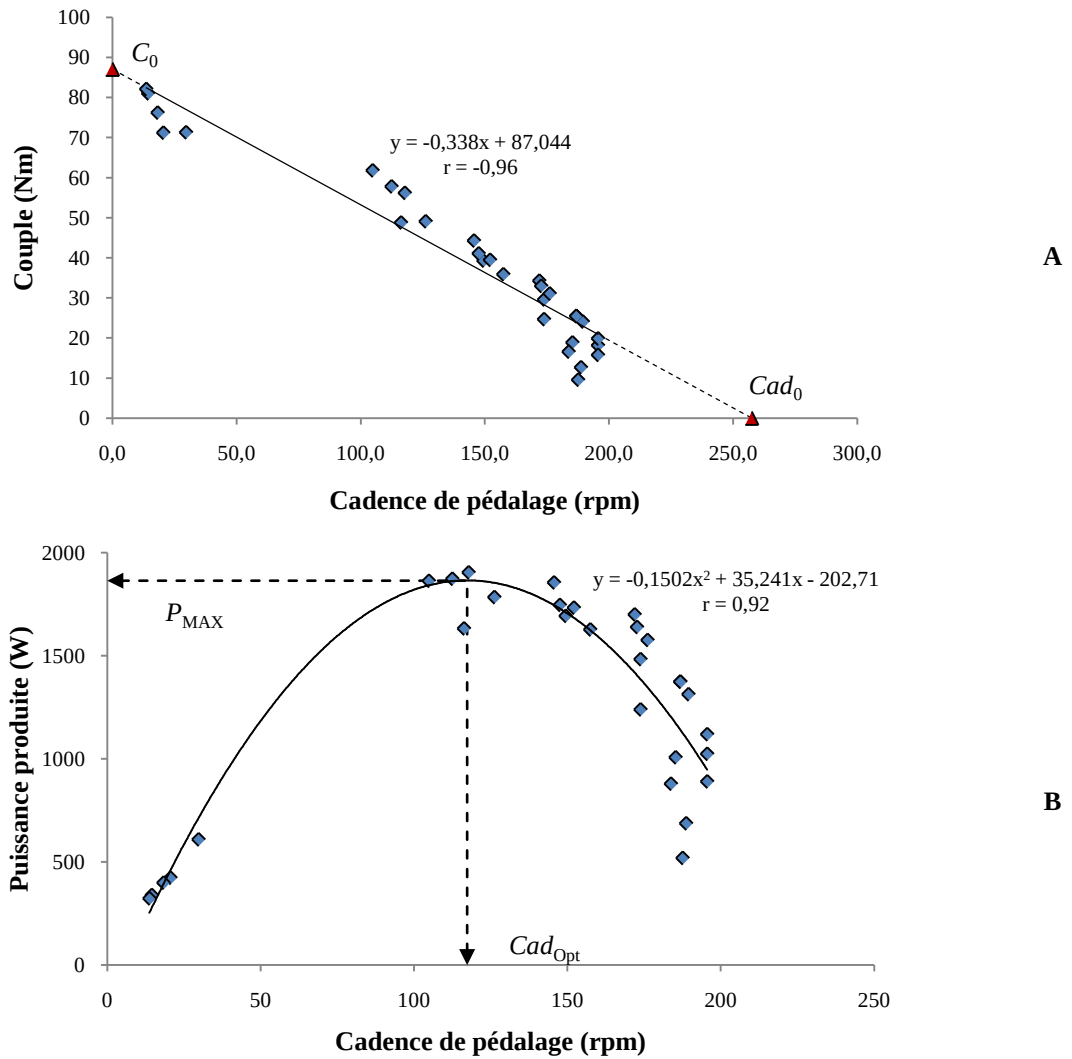


Figure V-4 – Exemples de relations Couple – Cadence de pédalage (A) et Puissance – Cadence de pédalage (B) lors de sprints de 80 m. Détermination de la cadence théorique maximale (Cad_0), du couple théorique maximale (C_0), de la puissance maximale (P_{MAX}) et de la cadence optimale (Cad_{Opt}).

1.4. ANALYSES STATISTIQUES

Toutes les données sont analysées à l'aide du logiciel Statistica 7.1 (StatSoft, France). Les données sont présentées comme Valeurs moyennes $\pm$ Ecart-Type. Des coefficients de corrélation de Bravais-Pearson sont calculés pour déterminer si les relations entre l' A_p totale, les variables mécaniques mesurées à l'aide du PowerTap (P_{MAX} , Cad_{Opt} , Cad_{moy} , Cad_0 , C_{Opt} et C_0) et la performance sur 80 m (v_{80}) sont significatives. Les relations

significatives entre les variables sont examinées par analyses de régression linéaire et multiple. Un test T de Student a été utilisé pour étudier les différences entre Cad_{Opt} et Cad_{moy} . Le niveau de significativité est fixé à $p < 0,05$.

2. RESULTATS

Les aires frontales projetées totales mesurées lors des sprints sur 80 m sont égales à $0,602 \pm 0,069 \text{ m}^2$. Les valeurs des variables mécaniques mesurées lors des sprints sur 80 m sont présentées dans le tableau.

Tableau V-1 – Valeurs moyennes des variables mécaniques mesurées lors de sprints sur 80 m à l'aide d'un PowerTap chez des pilotes de BMX de haut niveau.

	Valeurs $\pm$ Ecart-Type
P_{MAX} (W)	1631 ± 368
$P_{MAX}m_c^{-1}$ (Wkg^{-1})	$23,5 \pm 3,4$
$P_{MAX}A_p^{-1}$ (Wm^{-2})	2695 ± 471
Cad_{Opt} (rpm)	123 ± 18
C_{Opt} (Nm)	45 ± 9
Cad_0 (rpm)	253 ± 21
C_0 ($\text{N}\cdot\text{m}$)	$79,1 \pm 11,1$
Cad_{moy} (rpm)	158 ± 9
v_{80} ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$13,7 \pm 0,9$

m_c : Masse corporelle ; A_p : Aire frontale projetée totale ; P_{MAX} : Puissance maximale produite ; Cad_{Opt} : Cadence de pédalage optimale ; C_{Opt} : Couple optimale ; Cad_0 : Cadence de pédalage maximale théorique ; C_0 : Couple maximal théorique ; Cad_{moy} : Cadence de pédalage moyenne ; v_{80} : Vitesse maximale sur 80 m.

Aucune corrélation n'a été observée entre P_{MAX} et Cad_{Opt} et entre P_{MAX} et C_{Opt} . Mais des corrélations significatives ($p < 0,05$) ont été observées entre P_{MAX} et Cad_0 ($r = 0,98$), entre P_{MAX} et C_0 ($r = 0,89$) et entre P_{MAX} et Cad_{moy} ($r = 0,98$).

Une corrélation significative ($p < 0,05$) a été trouvée entre v_{80} et P_{MAX} ($r = 0,99$) et entre v_{80} et $P_{MAX}A_p^{-1}$ ($r = 0,87$) (Figure V-5). Aucune corrélation significative n'est

observée entre v_{80} et Cad_{Opt} , mais entre v_{80} et Cad_{moy} , il existe une forte corrélation significative ($r = 0,98$).

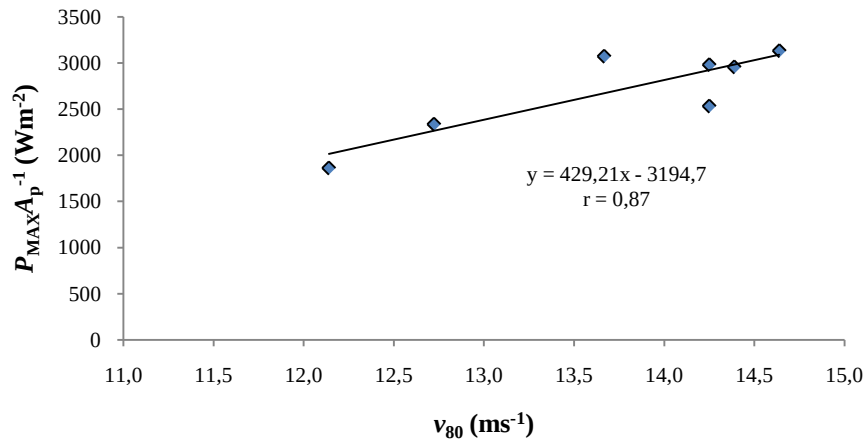


Figure V-5 – Relation entre la vitesse maximale sur 80 m (v_{80}) et la puissance maximale produite relative à l'aire frontale projetée totale ($P_{MAX}A_p^{-1}$).

Concernant l'analyse par régression multiple, le plus haut coefficient pour v_{80} a été obtenu quand les variables indépendantes C_{Opt} et Cad_{Opt} ont été prises en compte ($r = 0,99$, $p < 0,01$), Cad_{Opt} explique 63% de la variation de v_{80} :

$$v_{80} = 0,11 C_{Opt} + 0,07 Cad_{Opt} \quad (83)$$

Il existe une différence significative ($p < 0,01$) entre Cad_{moy} et Cad_{Opt} , Cad_{moy} est significativement plus grand que Cad_{Opt} (158 ± 9 vs. 123 ± 18 rpm).

3. DISCUSSIONS

Aire frontale projetée totale

Du fait de la position debout sur les pédales lors des sprints en BMX, les pilotes de BMX ont une aire frontale projetée totale très importante ($0,602 \pm 0,069$ m²). Cette A_p moyenne est supérieure à celle rapportée par Heil [2001] pour des cyclistes sur route en position UP qui présentent une A_p moyenne de $0,525 \pm 0,0099$ m². Dorel et al. [2005]

rapportent une A_p moyenne chez des cyclistes sur piste en position de compétition (*i.e.*, position DP) de $0,531 \pm 0,014 \text{ m}^2$.

Cette plus importante aire frontale projetée totale chez les pilotes de BMX peut s'expliquer tout d'abord par leur position debout sur les pédales, ce qui expose visiblement une plus grande partie du corps. De plus, cette position de pédalage ne permet pas aux pilotes de grouper les coudes au corps, ce qui pourrait réduire A_p . Ensuite, l'équipement et la tenue vestimentaire participe à la maximisation d' A_p . Traditionnellement, les codes vestimentaires des pilotes de BMX ont été empruntés aux pilotes de motocross. Encore actuellement, les pilotes de BMX portent des casques de motocross, et des vêtements très amples. Une réduction de l' A_p pourrait être faite simplement en adoptant une tenue plus proche du corps et en portant un casque intégral avec une aire frontale projetée moins importante.

Déterminants de la performance sur 80 m

La puissance maximale produite lors des sprints de 80 m par les pilotes de BMX ($23,5 \pm 3,4 \text{ Wkg}^{-1}$) comparée à la puissance maximale produite par des cyclistes sur piste de niveau international sur 200 m ($19,3 \pm 1,3 \text{ Wkg}^{-1}$) [Dorel et al., 2005] confirme le haut niveau des pilotes de BMX de cet échantillon. Les valeurs de vitesse maximale sont néanmoins plus faibles comparées à celles de l'étude de Dorel et al. [2005] ($13,7 \pm 0,9$ vs. $19,24 \pm 0,48 \text{ ms}^{-1}$), cela illustre d'une part la différence d'aérodynamisme entre les pilotes de BMX et les cyclistes sur piste, et d'autre part la différence observée dans le couple optimal qui est plus important pour les cyclistes sur piste (45 ± 9 vs. $118,5 \pm 9,8 \text{ Nm}$).

Cette étude a montré une corrélation significative forte entre v_{80} et P_{MAX} et entre v_{80} et $P_{\text{MAX}}A_p^{-1}$. A_p semble être un paramètre important à minimiser. La minimisation de R_A par

la diminution de l'aire frontale effective ($A_p C_D$, m^2) permet pour une puissance donnée d'augmenter la vitesse de déplacement.

P_{MAX} est significativement et fortement corrélé à Cad_{moy} , Cad_0 et C_0 . Aucune corrélation n'a été observée entre P_{MAX} et Cad_{Opt} et C_{Opt} . Dorel et al. [2005] ont observé une relation significative ($p < 0,001$) entre P_{MAX} et C_{Opt} ($r = 0,91$) et entre P_{MAX} et C_0 ($r = 0,92$).

En accord avec la relation linéaire Couple – Vitesse de pédalage, Cad_{Opt} et C_{Opt} sont égales à $0,48 \pm 0,05 Cad_0$ et $0,57 \pm 0,11 C_0$, respectivement. Dorel et al. [2005] suggèrent que C_0 serait un bon indicateur de la force maximale des membres inférieurs des sujets, et qu'il pourrait supposer du niveau d'entraînement en force des athlètes. Cela correspond au profil des pilotes de BMX présentés dans cette étude qui sont impliqués depuis quelques années dans un programme d'entraînement spécifique de musculation.

Cadence de pédalage et performance sur 80 m

L'un des objectifs de cette étude était d'analyser la différence entre Cad_{Opt} et Cad_{moy} lors du sprint de 80 m. Il s'avère que Cad_{Opt} et Cad_{moy} sont significativement différentes ($p < 0,01$), Cad_{moy} étant $30,0 \pm 14,8 \%$ plus élevée que Cad_{Opt} parmi les pilotes de BMX. A partir de la relation Puissance – Cadence de pédalage, il est possible de déterminer la puissance correspondante à la cadence moyenne sur 80 m (P_{Cadmoy} , W) (Figure V-6). Puisque Cad_{moy} est significativement plus grande chez tous les pilotes, cela signifie P_{Cadmoy} est inférieure à P_{MAX} produite à Cad_{Opt} .

Il semble alors important de réduire la différence $Cad_{moy} - Cad_{Opt}$. Une solution consisterait à adopter un braquet plus long, cela résulterait en une diminution de la cadence de pédalage et dans une production de puissance plus élevée. Ce qui se conclurait par une améliorer de la performance.

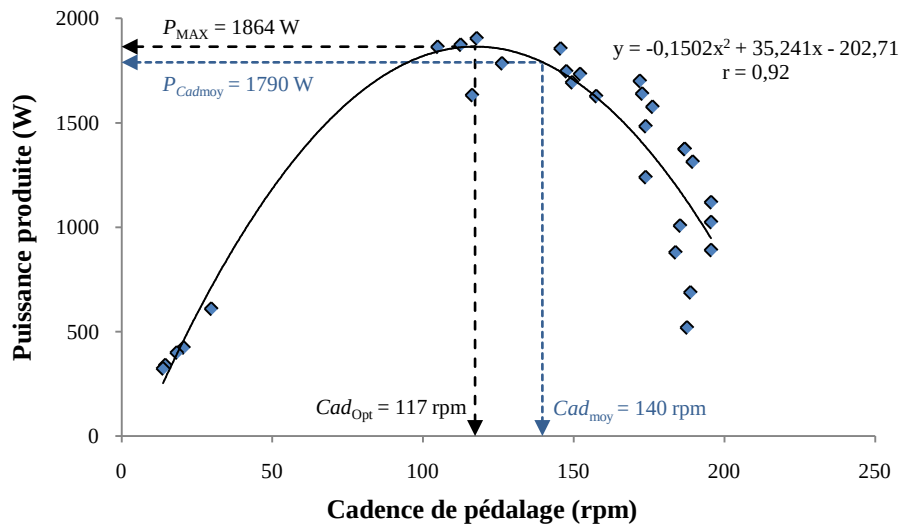


Figure V-6 – Exemple de détermination pour un pilote de la puissance produite à cadence moyenne sur 80 m (P_{Cadmoy}) à l’aide de la relation Puissance – Cadence de pédalage.

Le changement de braquet résultera dans une force à développer sur la pédale plus grande. La performance étant corrélée à C_0 , l’entraînement en musculation avec une orientation du travail sur la force maximale musculaire semble une bonne alternative. Afin de personnaliser l’entraînement, l’utilisation des profils musculaires inertiels pourrait être utile pour déterminer les charges d’entraînements adaptées à l’objectif.

Les départs de compétition étant réalisés à l’arrêt, pour éviter une perte de temps trop importante lors des premières secondes, il serait judicieux d’étudier la possibilité d’utiliser un système de dérailleur. Des études plus poussées devront être menées pour déterminer l’utilisation optimale de différents braquets au cours d’une course de BMX.

Aire frontale projetée totale et cadence de pédalage en BMX

Les départs lors des compétitions en BMX s’effectuent sur un plan incliné. La résistance due à la gravité est donc la plus importante des résistances totales opposées à l’avancement du pilote et elle facilite le gain de vitesse. En effet, les vitesses maximales atteintes quelques secondes après le départ sont très élevées ($> 19,5 \text{ ms}^{-1}$). Mais lorsque la cadence de pédalage est supérieure à Cad_{Opt} , la minimisation d’ A_p et l’adoption d’une

position plus aérodynamique (*i.e.*, corps regroupé, tronc parallèle au sol) pourraient permettre de diminuer la perte de vitesse lors de certaines phases.

4. CONCLUSION

Les principaux résultats de cette étude montrent que P_{MAX} , $P_{MAX}A_p^{-1}$, Cad_{moy} et Cad_0 sont des indicateurs significatifs de la performance en sprint sur 80 m. Il a été montré également que Cad_{moy} était significativement plus grande que Cad_{Opt} . D'après ces observations, il semblerait que le braquet ne soit pas adapté et qu'il faille l'augmenter ce qui aboutirait en une augmentation de la puissance maximale et de la vitesse de déplacement. Un entraînement de musculation en force permettrait de développer la force maximale des membres inférieurs des pilotes afin de s'adapter optimalement à des braquets plus longs. L'optimisation de l'aérodynamisme semble également un paramètre à étudier plus amplement en BMX, notamment dans les conditions réelles de course. Ces paramètres devront faire l'objet d'une étude en conditions réelles de course de BMX afin d'optimiser au mieux la performance.

5. OPTIMISATION DES PARAMÈTRES EN BMX

L'aire frontale projetée est un paramètre important de l'aérodynamisme. Elle est dépendante de la position du cycliste sur sa bicyclette, et de son équipement. En BMX, la position debout, la tenue vestimentaire ample et le casque de motocross augmente énormément cette aire frontale projetée chez les pilotes ([Figure V-7](#)).



Figure V-7 – Illustration de l'aire frontale projetée lors du pédalage en BMX. L'aire frontale projetée totale est égale à $0,519 \text{ m}^2$ pour ce pilote.

L'étude de l' A_p en position debout sur les pédales n'a pas fait l'objet de nombreuses études. En effet, en cyclisme sur route, cette position est adoptée dans les montées de col, où la vitesse s'en trouve très réduite, et lors des sprints. Il était difficile de l'étudier en laboratoire, car l'inclinaison de droite à gauche du cadre n'est pas possible sur home-trainer. Grâce à la nouvelle méthode de terrain, l'aire frontale projetée des pilotes de BMX en position debout sur les pédales est plus facilement quantifiable. Chez des pilotes masculins, elle peut varier de $0,500$ à $0,700 \text{ m}^2$ ([Tableau V-2](#)).

Tableau V-2 – Données anthropométriques et Aire frontale projetée totale de pilotes de BMX de haut niveau (n = 7).

	m_c (kg)	h_c (m)	A_p (m ²)
Pilote 1	67,1	1,70	0,519
Pilote 2	65,2	1,63	0,525
Pilote 3	73,0	1,78	0,639
Pilote 4	73,9	1,77	0,626
Pilote 5	73,9	1,82	0,648
Pilote 6	55,8	1,60	0,560
Pilote 7	72,0	1,81	0,700
Moyenne ± Ecart-Type	68,7 ± 6,6	1,73 ± 0,09	0,602 ± 0,069

m_c : masse corporelle ; h_c : hauteur corporelle ; A_p : aire frontale projetée totale.

L'aire frontale projetée totale est significativement ($p < 0,05$) corrélée ($r = 0,84$) à la hauteur corporelle pour cet échantillon de pilotes :

$$A_p = 0,84 h_c \quad (84)$$

Cette forte corrélation s'explique par la position presque verticale des pilotes sur les BMX. Lors des phases de pédalage il est très difficile pour les pilotes de diminuer l' A_p par un changement de position. Par contre, dans les positions de non-pédalage, les pilotes peuvent réduire l' A_p en ramenant les coudes contre le corps, en fléchissant les bras et en ayant le tronc presque parallèle au sol (Figure V-8).

**A (0,519 m²)****B (0,377 m²)****Figure V-8** – Réduction de 27% de l'aire frontale projetée totale lors d'une phase de non-pédalage.

Lors du départ en compétition, il a été observé que les pilotes arrêtaient de pédaler en bas du plan incliné de départ, car la cadence de pédalage était trop élevée pour générer une puissance supplémentaire. De plus, les pilotes se redressent généralement en arrivant sur la zone plate avant le 1^{er} obstacle (Figure V-9), augmentant ainsi leur A_p , et donc les résistances aérodynamiques. Cette augmentation de R_A aboutit à une perte de vitesse.

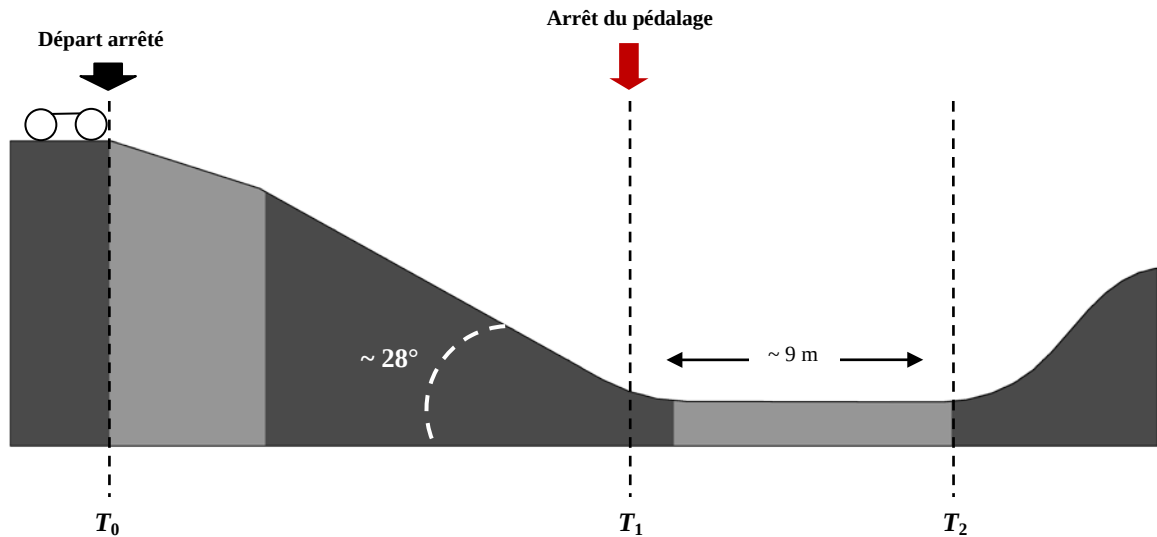


Figure V-9 – Exemples de vitesses maximales atteintes par un pilote de BMX masculin de haut niveau lors de départs d'entraînement effectués sur une butte de départ identique à celle des Jeux Olympiques de 2008 [Service expertise et optimisation de la performance, FFC].

Il serait donc plus judicieux pour les pilotes d'adopter une position aérodynamique (Figure V-8B) lors de cette phase de non-pédalage. Sur la zone plate entre T_1 et T_2 , sans vent, à 20°C , pour le pilote illustré en Figure V-8 d'une masse corporelle de 73,9 kg et une bicyclette d'une masse de 10 kg, et en supposant pour ce pilote, un C_D de 0,75, on peut considérer 2 résistances principales à l'avancement : R_A et R_R . Dans ce cas, R_R est égale à 4,1 N. En arrivant à T_1 , à 65 kmh^{-1} , dans la position la moins aérodynamique (Figure V-8A), le pilote rencontrera une R_A égale à 76,4 N. Et si à T_1 , le pilote adopte une position plus aérodynamique (Figure V-8B), il diminuera la R_A rencontrée de 27%, elle sera égale à 55,6 N. En diminuant R_A , la perte de vitesse entre T_1 et T_2 sera moindre que dans le cas inverse.

Une étude sur les positions et l’équipement des pilotes de BMX devra être menée pour estimer l’impact des résistances à l’avancement sur les phases principales d’une course de BMX. Il est possible de supposer que l’utilisation d’un cadre profilé aérodynamiquement, d’un casque profilé, de roues lenticulaires et de vêtements plus près du corps pourrait significativement améliorer l’aérodynamisme.

VI. CONCLUSION

Le travail de cette thèse s'est appuyé sur les caractéristiques du départ lors d'une compétition de BMX (Figure VI-1). Le départ s'effectue à l'arrêt et sur un plan incliné et il est la phase la plus importante d'une course. Le classement au bout de la première ligne droite, c'est-à-dire après quelques secondes de course, est déterminant pour le classement final. La production maximale de puissance musculaire apparaît alors comme l'un des paramètres déterminants de cette performance de départ. De plus, les vitesses atteintes lors cette ligne droite sont supérieures à 70 kmh^{-1} chez les pilotes de haut niveau. Il semble alors important d'étudier l'aérodynamisme des pilotes.

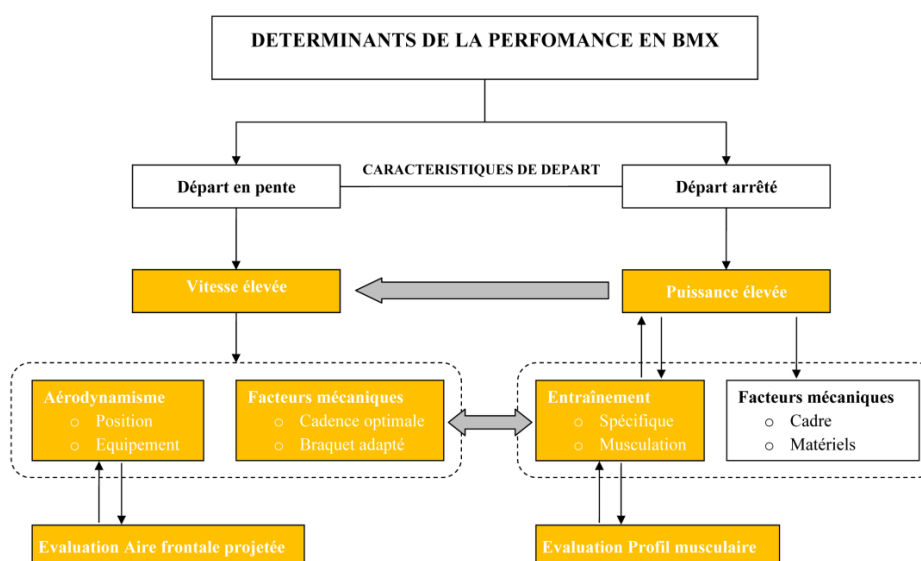


Figure VI-1 – Schéma récapitulatifs des déterminants de la performance étudiée dans cette thèse.

C'est pourquoi l'objectif de cette thèse était d'évaluer deux paramètres essentiels à la performance en BMX : la production de puissance musculaire des membres inférieurs et une variable de l'aérodynamisme, l'aire frontale projetée.

Le premier axe de cette thèse a été consacré à l'étude des déterminants de la performance lors d'exercices à intensité maximale. Des profils musculaires inertiels des membres inférieurs ont été comparés à des sprints courts (~ 6-30 s) sur cyclo-wattmètre chez des Cyclistes sur route et des pilotes de BMX. L'influence de l'aire de section musculaire de la cuisse et de la force maximale théorique sur la performance lors de sprints à intensité maximale a été mise en évidence, et les sauts verticaux (Squat Jump) se sont avérés de bons indicateurs de la performance en sprint.

Une comparaison des profils musculaires inertiels de pilotes de BMX de haut niveau, de pilotes de BMX de niveau régional à national, de cyclistes sur route, et d'athlètes de force de haut niveau a permis de mettre en lumière que les pilotes de BMX maximisent la production de puissance musculaire pour des charges relatives faibles. De plus, aucune corrélation significative n'a été observée entre le temps de passage des 5 premiers mètres d'un sprint sur terrain plat et le taux moyen de développement de la force (RFD_{moy}) lors d'un Squat Jump.

Tous ces résultats suggèrent la nécessité pour les pilotes de BMX d'augmenter la masse musculaire et la force maximale des membres inférieurs. Et qu'il est important pour eux de pouvoir développer une très grande force le plus rapidement possible. Un entraînement de musculation est donc conseillé. L'utilisation des profils musculaires inertiels dans l'individualisation des charges d'entraînement de musculation pourra permettre d'atteindre les objectifs recherchés : Hypertrophie, force maximale et RFD élevé.

Le deuxième axe de cette thèse a été l'étude d'une variable de l'aérodynamisme, l'aire frontale projetée. En BMX, la forte production de puissance maximale et les départs sur plan incliné permettent d'atteindre des vitesses maximales très importantes, souvent

supérieures à 70 kmh^{-1} pour le haut niveau. La position et la tenue vestimentaire des pilotes sont inadaptées, en termes d'aérodynamisme, dans les phases de non-pédalage.

Néanmoins, les méthodes classiques existantes pour quantifier l'aire frontale projetée n'étaient pas adaptées aux mesures en conditions réelles. La validité et la reproductibilité d'une nouvelle méthode pour quantifier l'aire frontale projetée sur le terrain ont été testées. Les résultats montrent que cette méthode est reproductible et valide pour mesurer l'aire frontale projetée en comparaison avec les méthodes de référence issues de la littérature scientifique. Elle facilite la mesure de l'aire frontale et donne la possibilité d'être utilisée sur le terrain avec simplement un appareil photographique et une mesure étalon horizontale ou verticale prise sur le cycliste et sa bicyclette.

En utilisant cette méthode, l'aire frontale projetée de pilotes de BMX de haut niveau a été mesurée lors de sprints de 80 m sur terrain plat. Cette étude a montré que la puissance maximale produite en fonction de l'aire frontale projetée était significativement corrélée à la performance sur 80 m. Il a également été observé que le braquet choisi par les pilotes de BMX n'était pas optimal car la cadence moyenne était supérieure à la cadence optimale. Le gain en force maximale et en puissance musculaire maximale permettra de choisir un braquet plus long pour diminuer la cadence moyenne de pédalage.

D'après les résultats de cette thèse, l'optimisation de la performance en BMX nécessite un entraînement spécifique en musculation (*i.e.*, la force maximale et l'hypertrophie musculaire), une optimisation de l'aérodynamisme des pilotes (*i.e.*, l'aire frontale projetée) et une modification des paramètres de leur bicyclette (*i.e.*, le braquet).

VII. PERSPECTIVES

L'étude approfondie de la production de puissance musculaire et de l'aérodynamisme pourrait permettre d'améliorer les performances des pilotes de BMX lors des prochains Jeux Olympiques de 2012 à Londres.

Des études devront être menées pour déterminer les charges d'entraînement spécifiques en musculation qui correspondraient le mieux à la phase de départ en BMX. Il serait intéressant d'étudier notamment la force développée sur la pédale lors du premier coup de pédale et la vitesse à laquelle cette force est développée. Ce travail pourrait être réalisé à l'aide de pédales instrumentées de capteurs de force, qui permettraient d'étudier le développement de la force en fonction du temps ([Figure VII-1](#)).

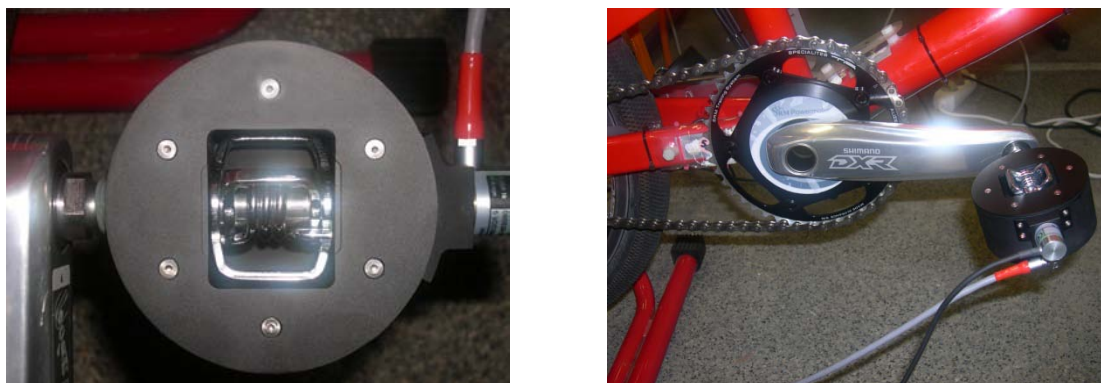


Figure VII-1 – Pédales instrumentées avec des capteurs dynamométriques 3 axes.

En étudiant la corrélation entre la force maximale développée sur les pédales lors de la première seconde de course et les taux de développement de la force lors de différents exercices de musculation, il sera peut-être possible de déterminer une charge d'entraînement adaptée et de choisir les meilleurs exercices de musculation selon l'objectif recherché.

Les sprints réalisés sur 80 m avec départ arrêté ont mis en évidence que les pilotes étaient à des cadences de pédalage supérieures à la cadence optimale. Ces observations laissent supposer qu'un braquet optimal pourrait permettre une meilleure production de puissance. Or, lors de tests réalisés sur des tours de piste avec départ arrêté, le [Service d'expertise et d'optimisation de la performance \(F.F.C.\)](#) a mis en évidence que les pilotes pédalaient à des cadences supérieures à la cadence optimale sur 90% de la course.

Il semble qu'un développement unique soit inadapté sur plusieurs phases de la course. Lors du départ, il est trop long, et à mesure que les pilotes prennent de la vitesse, il devient trop court. La [Figure VII-2](#) illustre ce phénomène sur un tour de piste. La ligne rouge indique la vitesse optimale d'un pilote de BMX. Chaque moment où la vitesse est au-dessus de cette ligne correspond à un moment où le sujet a une cadence de pédalage supérieure à sa cadence optimale. Sur la majorité du temps de la course, la cadence de pédalage n'est pas optimale.

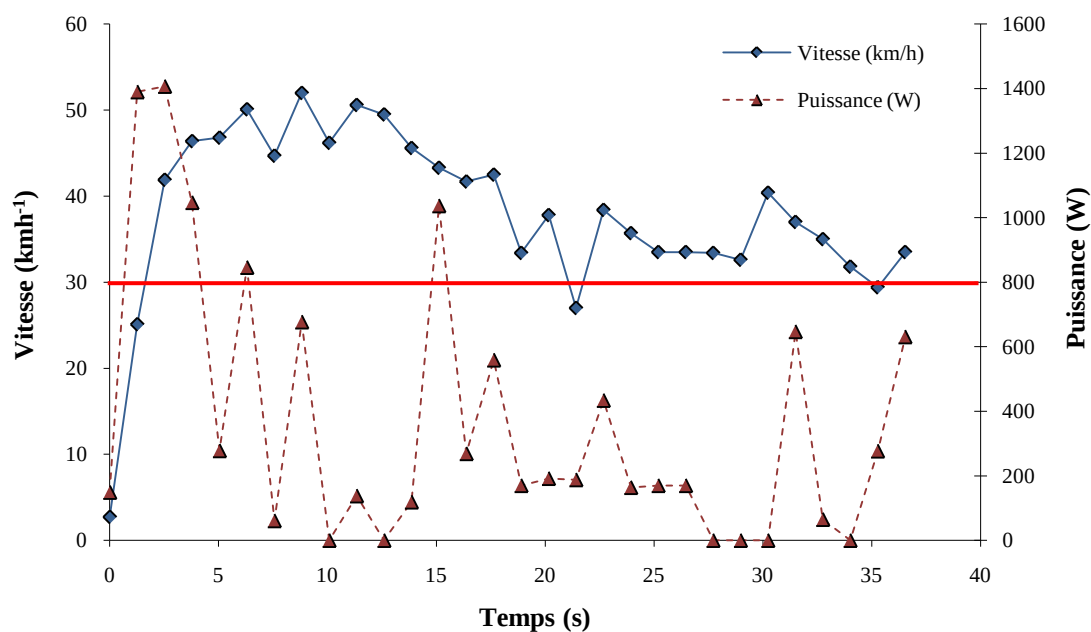


Figure VII-2 – Exemple des vitesses atteintes et des puissances produites lors d'un tour de piste en BMX.

La ligne continue rouge représente la vitesse optimale du pilote de BMX.

La possibilité d'utiliser un dérailleur spécifique à l'activité de BMX pourrait être étudiée. Elle est d'ailleurs autorisée par le règlement UCI. Une solution technique pourrait être l'utilisation de dérailleurs intégrés dans le moyeu arrière. Des systèmes existent comme le Nexus de Shimano ([Figure VII-3A](#)) ou le système Speedhub de Rohloff ([Figure VII-3B](#)). Ils ne nécessitent pas de « tendeur de chaîne » et ils empêchent donc tout dérailage de la chaîne. Ces systèmes pourraient être adaptés à l'activité de BMX en choisissant plusieurs développements optimums qui correspondraient à des phases importantes de la course (*e.g.*, départ, accélération dans les 20 premiers mètres, phases à vitesses élevées), selon les qualités physiques des pilotes et selon la piste.

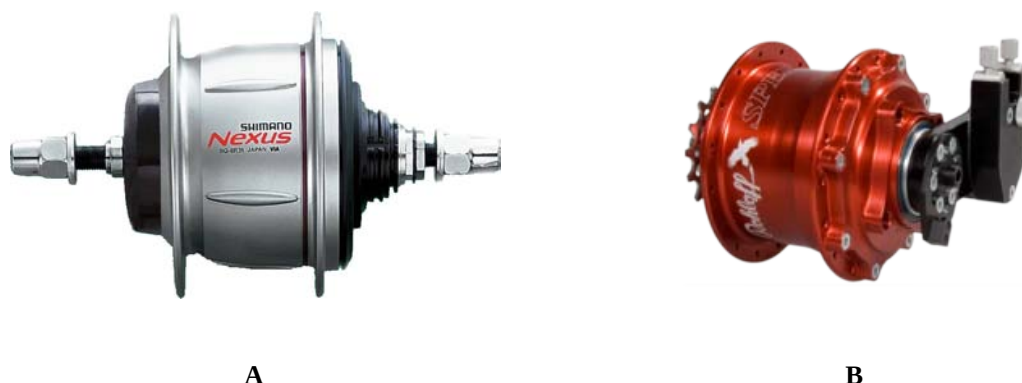


Figure VII-3 – Dérailleur Nexus de Shimano (A) et dérailleur Speedhub de Rohloff (B) intégrés directement dans le moyeu de la roue arrière.

L'utilisation de systèmes de pédaliers spéciaux (*e.g.*, Harmonic, Pro-Raced, Rotor) devra également faire l'objet d'une étude comparative en BMX. En théorie, ces systèmes sont tout à fait adaptés à l'activité de BMX, puisque la littérature scientifique a montré leur intérêt dans les sprints courts (~ 6-30s), pour des cyclistes ayant une masse musculaire des membres inférieurs importante.

Une plus grande attention devra être portée à l'aérodynamisme des pilotes de BMX. Tout d'abord en améliorant leur tenue vestimentaire, et en étudiant comment réduire l'aire frontale projetée et le coefficient de traînée. Les casques actuels sont les mêmes que les

casques utilisés par les pilotes de Motocross (Figure VII-4). Les deux principaux inconvénients sont la visière (Figure VII-4A) qui semble inutile en BMX et l'ouverture béante au niveau du visage (Figure VII-4B) qui l'aire frontale effective.



Figure VII-4 – Exemple de casque utilisé lors des compétitions de BMX. Il présente une visière (A) et une grande ouverture au niveau du visage (B).

Un travail sur la conception d'un casque spécifique pour le BMX pourrait être réalisé, par exemple, en diminuant l'aire frontale effective tout en conservant l'aspect sécuritaire. La forme du casque devrait être plus épurée, la surface ne devrait pas présenter de relief ou d'aspérités inutiles et le casque devrait être fermé.

Le cadre et la tenue vestimentaire des pilotes devront être optimisés dans les limites du règlement UCI pour minimiser la perte de vitesse dans les phases de non-pédalage.

L'évaluation précise des qualités de force et de vitesse musculaires nécessaires pour optimiser la performance lors du départ pourront être utilisées également dans la conception de matériels adaptés, comme par exemple le cadre de BMX. En effet, le cadre de bicyclette doit transmettre les puissances produites sur les pédales à la roue arrière avec le moins de perte d'énergie possible. Ces pertes sont dues généralement à la déformation élastique du cadre.



Figure VII-5 – Représentation des zones subissant les plus grandes déformations (zones sombres) dans un cadre de BMX.

Des tests en laboratoire ont montré que lors du pédalage sur home-trainer, les plus grandes déformations apparaissaient dans le tube de selle et dans les tubes de base arrières. Les pics de déformations correspondaient aux pics de production de puissance au cours du cycle de pédalage (Ce travail est le sujet d'un article auquel j'ai contribué, et qui est actuellement en soumission).

Une étude de la déformation du cadre de BMX en condition réelle de départ couplée à la mesure des forces et des puissances générées par le pilote aiderait à localiser les zones de plus grandes déformations des cadres de bicyclettes et à optimiser leur conception.

VIII. BIBLIOGRAPHIE

- [1] **Anton MM**, Izquierdo M, Ibanez J, Asiain X, Mendiguchia J, Gorostiaga EM. Flat and uphill climb time trial performance prediction in elite amateur cyclists. *Int J Sports Med* 2007; 28: 306-313.
- [2] **Arola D**, Reinhall PG, Jenkins MG, Iverson SC. An experimental analysis of a hybrid bicycle frame. *Experimental techniques* 1999; May/june: 21-24.
- [3] **Åstrand PO**, Rodahl K. Body dimensions and muscular exercise. In P.O. Åstrand & K. Rodahl (Eds.), *Textbook of work physiology* (3rd edn., pp. 391-411) 1986. New York: McGraw-Hill.
- [4] **Atkinson G**, Nevill AM. Statistical methods for assessing measurement error reliability in variables relevant to sports medicine. *Sports Med* 1998; 26: 217-238.
- [5] **Baker D**, Nance S, Moore M. The load that maximizes the average mechanical power output during jump squats in power-trained athletes. *J Strength Cond Res* 2001; 15: 92-97.
- [6] **Baker D**, Newton RU. Methods to increase the effectiveness of maximal power training for the upper body. *Strength Cond J* 2005; 27: 24-32.
- [7] **Ball D**, Burrows C, Sargeant AJ. Human power output during repeated sprint cycle exercise: the influence of thermal stress. *Eur J Appl Physiol* 1999; 79: 360-366.
- [8] **Bertucci W**, Duc S, Villerius V, Pernin JN, Grappe F. Validity and reliability of the PowerTap mobile cycling powermeter when compared with the SRM device. *Int J Sports Med* 2005a; 26: 868-873.

-
- [9] **Bertucci W**, Hourde C, Manolova A, Vettoretti F. Facteurs mécaniques de la performance lors de la phase d'accélération en BMX chez des pilotes entraînés. *Sci Sports* 2007 ; 22: 179-181.
- [10] **Bertucci W**, Taiar R, Grappe F. Differences between sprint tests under laboratory and actual cycling conditions. *J Sports Med Phys Fitness* 2005b; 45: 277-283.
- [11] **Bevan HR**, Bunce PJ, Owen NJ, Bennett MA, Cook CJ, Cunningham DJ, Newton RU, Kilduff LP. Optimal loading for the development of peak power output in professional rugby players. *J Strength Cond Res* 2010; 24: 43-47.
- [12] **Bland JM**, Altman DG. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *Lancet* 1986; 1: 307-310.
- [13] **Bosco C**, Belli A, Astrua M, Tihanyi J, Pozzo R, Kellis S, Tsarpela O, Foti C, Manno R, Tranquilli C. A dynamometer for evaluation of dynamic muscle work. *Eur J Appl Physiol* 1995; 70: 379-386.
- [14] **Bouhlef E**, Bouhlef H, Chelly MS, Tabka Z. Relation entre la puissance maximale anaérobie mesurée lors de l'épreuve charge-vitesse, la détente verticale et le 5-jump test chez le garçon entraîné. *Sci Sports* 2006; 21: 1-7.
- [15] **Brogger-Jensen T**, Hvass I, Bugge S. Injuries at the BMX cycling European Championship 1989. *Br J Sports Med* 1990; 24(4): 269-270.
- [16] **Buresh R**, Berg K, French J. The effect of resistive exercise rest interval on hormonal response, strength, and hypertrophy with training. *J Strength Cond Res* 2009; 23 (1): 62-71.
- [17] **Caldwell GE**, Hagberg JM, McCole SD, Li L. Lower extremity joint moments during uphill cycling. *J Appl Biomech* 1999; 15: 166-181.
- [18] **Caldwell GE**, Li L, McCole SD, Hagberg JM. Pedal and crank kinetics in uphill cycling. *J Appl Biomech* 1998; 14: 245-259.

-
- [19] **Campos GER**, Luecke TJ, Wendeln HK, Toma K, Hagerman FC, Murray TF, Ragg KE, Ratamess NA, Kraemer WJ, Staron RS. Muscular adaptations in response to three different resistance-training regimens: specificity of repetition maximum training zones. *Eur J Appl Physiol* 2002; 88: 50-60.
- [20] **Candau R**, Grappe F, Ménard M, Barbier B, Millet G.P, Hoffman MD, Belli AR, Rouillon JD. Simplified deceleration method for assessment of resistive forces in cycling. *Med Sci Sports Exerc* 1999; 31 (10): 1441-1447.
- [21] **Capelli C**, Rosa G, Butti F, Ferretti G, Veicsteinas A. Energy cost and efficiency of riding aerodynamics bicycles. *Eur J Appl Physiol* 1993; 67: 144-149.
- [22] **Capelli C**, Schena F, Zamparo P, Dal Monte A, Faina M, di Prampero PE. Energetics of best performances in track cycling. *Med Sci Sports Exerc* 1998; 30 (4): 614-624.
- [23] **Capmal S**, Vanedwalle H. Torque-velocity relationship during cycle ergometer sprints with and without toe clips. *Eur J Appl Physiol* 1997; 76: 375-379.
- [24] **Challis JH**. Examination of the scaling of human jumping. *J Strength Cond Res* 2004; 18 (4): 803-809.
- [25] **Chromiak JA**, Smedley B, Carpenter W, Brown R, Koh YS, Lamberth JG, Joe LA, Abadie BR, Altorfer G. Effect of 10-week strength training program and recovery drink on body composition, muscular strength and endurance, and anaerobic power and capacity. *Nutrition* 2004; 20: 420-427.
- [26] **Cormie P**, Deane R, McBride JM. Methodological concerns for determining power output in the jump squat. *J Strength Cond Res* 2007a; 21 (2): 424-430.
- [27] **Cormie P**, McBride JM, McCaulley GO. Power-time, force-time, and velocity-time curve analysis during the jump squat: Impact of load. *J Appl Biomech* 2008; 24: 112-120.

-
- [28] **Cormie P**, McBride JM, McCaulley GO. The influence of body mass on calculation of power during lower-body resistance exercises. *J Strength Cond Res* 2007b 21 (4): 1042-1049.
- [29] **Cormie P**, McBride JM, McCaulley GO. Validation of power measurement techniques in dynamic lower body resistance exercises. *J Appl Biomech* 2007c 23: 103-118.
- [30] **Cormie P**, McCaulley GO, McBride JM. Power versus strength-power jump squat training: Influence on the load-power relationship. *Med Sci Sports Exerc* 2007d; 39 (6): 996-1003.
- [31] **Cormie P**, McCaulley GO, Travis Triplett N, McBride J. Optimal loading for maximal power output during lower-body resistance exercises. *Med Sci Sports Exerc* 2007e; 39 (2): 340-349.
- [32] **Coyle EF**, Feltner ME, Kautz SA, Hamilton MT, Montain SJ, Baylor AM, Abraham LD, Petrek GW. Physiological and biomechanical factors associated with elite endurance cycling performance. *Med Sci Sports Exerc* 1991; 23: 93–107.
- [33] **Cronin JB**, Hing RD, McNair PJ. Reliability and validity of a linear position transducer for measuring jump performance. *J Strength Cond Res* 2004; 18: 590-593.
- [34] **Cronin JB**, Sleivert G. Challenges in understanding the influence of maximal power training on improving athletic performance. *Sports Med* 2005; 35: 213-234.
- [35] **Cuerrier J-P**, Paré D, Beaudoin A-J, Smeesters C, Champoux Y. Une nouvelle méthode de mesure de longueurs segmentaires. *Sci Sports* 2007;22: 149-154.
- [36] **Dauty M**, Bryand F, Potiron-Josse M. Relation entre la force isocinétique, le saut et le sprint chez le footballeur de haut niveau. *Sci Sports* 2002; 17: 122-127.

- [37] **Dayne AM**, Nuzzo JL, McBride JM, Burr A, Travis Triplett N. Power output in the jump squat in adolescent male athletes. *J Strength Cond Res* 2010; 24 (S1): 1-1.
- [38] **Debraux P**, Bertucci W, Manolova AV, Rogier S, Lodini A. New method to estimate the cycling frontal area. *Int J Sports Med* 2009; 30: 266-272.
- [39] **Defraeye T**, Blocken B, Koninckx E, Hespel P, Carmeliet J. Aerodynamic study of different cyclist positions: CFD analysis and full-scale wind-tunnel tests. *J Biomech* 2010; 43: 1262-1268.
- [40] **Delaney DP**, Carr MC. Urethral strictures incident to bicycle motocross racing. *Urology* 2005; 65 (4): 798.e18-798.e19.
- [41] **di Prampero PE**, Cortili G, Mognoni P, Saibene F. Equation of motion of a cyclist. *J Appl Physiol* 1979; 47 (1): 201-206.
- [42] **di Prampero PE**. Cycling on Earth, in space and on the Moon. *Eur J Appl Physiol* 2000; 82: 345-360.
- [43] **di Prampero PE**. The energy cost of human locomotion on land and in water. *Int J Sports Med* 1986; 7: 55-72.
- [44] **Dorel S**, Hautier CA, Rambaud O, Rouffet D, Van Praagh E, Lacour J-R, Bourdin M. Torque and power-velocity relationships in cycling: Relevance to track sprint performance in world-class cyclists. *Int J Sports Med* 2005; 26: 739-746.
- [45] **Du Bois D**, Du Bois EF. Clinical Calorimetry: A formula to estimate the approximate surface area if height and weight be known. *Arch Int Med* 1916; 17: 863-871.
- [46] **Duba J**, Kraemer WJ, Martin G. Progressing from the hang power clean to the power clean: a 4-step model. *Strength Cond J* 2009; 31 (3): 58-66.

- [47] **Dugan EL**, Doyle TLA, Humphries B, Hasson CJ, Newton RU. Determining the optimal load for jump squats: A review of methods and calculations. *J Strength Cond Res* 2004; 18 (3): 668-674.
- [48] **Durnin JVGA**, Womersley J. Body fat assessed from total body density and its estimation from skinfold thickness: measurements on 481 men and women aged from 16 to 72 years. *Br J Nutr* 1974; 32: 77-97.
- [49] **Edgerton VR**, Roy RR, Gregor RJ, Rugg S. Morphological basis of skeletal muscle power output. In : Human muscle power. In: Jones NL, McCartney N, McComas AJ, editors. *Human muscle power*. Champaign (Il): Human Kinetics, 1986: 43-63.
- [50] **Faria EW**, Parker DL, Faria IE. The science of cycling: Factors affecting performance – Part 2. *Sports Med* 2005; 35 (4): 313-337.
- [51] **Faria EW**, Parker DL, Faria IE. The science of cycling: Physiology and training – Part 1. *Sports Med* 2005; 35 (4): 285-312.
- [52] **Faria IE**. Energy expenditure, aerodynamics and medical problems in cycling. *Sports Med* 1992; 14 (1): 43-63.
- [53] **Fatouros IG**, Kambas A, Katrabasas I, Nikolaidis K, Chatzinikolaou A, Leontsini D, Taxildaris K. Strength training and detraining effects on muscular strength, anaerobic power, and mobility of inactive older men are intensity dependent. *Br J Sports Med* 2005; 39: 776-780.
- [54] **Faulkner JA**, Claflin DR, Cully KK. Power output of fast and slow fibres from human skeletal muscles. In: Jones NL, McCartney N, McComas AJ, editors. *Human muscle power*. Champaign (Il): Human Kinetics, 1986: 81-93.

-
- [55] **Garcia-Lopez J**, Rodriguez-Marroyo JA, Juneau, C-E, Peleteiro J, Cordova Martinez A, Villa JG. Reference values and improvement of aerodynamic drag in professional cyclists. *J Sports Sci* 2008; 26: 277-286.
- [56] **Gardner AS**, Martin DT, Barras M, Jenkins DG, Hahn AG. Power output demands of elite track sprint cycling. *eIJAPS* 2005; 5: 149-154.
- [57] **Gardner AS**, Martin JC, Martin DT, Barras M, Jenkins D. Maximal torque- and power-pedaling rate relationships for elite sprint cyclists in laboratory and field tests. *Eur J Appl Physiol* 2007; 101: 287-292.
- [58] **Gardner AS**, Stephens S, Martin DT, Lawton E, Lee H, Jenkins D. Accuracy of SRM and PowerTap power monitoring systems for bicycling. *Med Sci Sports Exerc* 2004; 36: 1252-1258.
- [59] **Garhammer J**. A review of power output studies of olympic and powerlifting: methodology, performance prediction, and evaluation tests. *J Strength Cond Res* 1993; 7 (2): 76-89.
- [60] **Gollnick PD**, Bayley AW. Biochemical training adaptation and maximal power. In: *Human Muscle Power* 1986. Editors: Jones, McCartney & McComas. Human kinetics. Champaign: 255-267.
- [61] **Gonzales-Haro C**, Galilea Ballarini PA, Soria M, Drobic F, Escanero JF. Comparison of nine theoretical models for estimating the mechanical power output in cycling. *Br J Sports Med* 2007; 41: 506-509.
- [62] **Goubel F**, Lensele-Corbeil G. *Biomécanique : Eléments de mécanique musculaire* (2^e édition) 2003. Paris : Masson, Collection STAPS.
- [63] **Graham JF**. Exercise: Deadlift. *Strength Cond J* 2000a; 22 (5): 18-20.
- [64] **Graham JF**. Power Clean. *Strength Cond J* 2000b; 22 (6): 63-65.

-
- [65] **Grappe F**, Candau R, Belli A, Rouillon JD. Aerodynamic drag in field cycling with special reference to the Obree's position. *Ergonomics* 1997; 40: 1299-1311.
- [66] **Grappe F**. *Cyclisme et Optimisation de la Performance* (2nd edn.) 2009. Paris : De Boeck Université, Collection Science et Pratique du Sport.
- [67] **Haff GG**, Carlock JM, Hartman MJ, Kilgore JL, Kawamori N, Jackson JR, Morris RT, Sands WA, Stone MH. Force-time curve characteristics of dynamic and isometric muscle actions of elite women Olympic weightlifters. *J Strength Cond Res* 2005; 19 (4): 741-748.
- [68] **Harman EA**, Rosenstein MT, Frykman PN, Rosenstein RM, Kraemer WJ. Estimation of human power output from vertical jump. *J Strength Cond Res* 1991; 5: 116-120.
- [69] **Harris NK**, Cronin JB, Hopkins WG, Hansen KT. Squat jump training at maximal power loads vs. heavy loads: Effect on sprint ability. *J Strength Cond Res* 2008; 22: 1742-1749.
- [70] **Harris NK**, Cronin JB, Hopkins WG. Power outputs of a machine squat-jump across a spectrum of loads. *J Strength Cond Res* 2007; 21: 1260-1264.
- [71] **Hartman H**, Bob A, wirth K, Schmidtbleicher D. Effects of different periodization models on rate of force development and power ability of the upper extremity. *J Strength Cond Res* 2009; 23 (7): 1921-1932.
- [72] **Hautier CA**, Linossier M-T, Belli A, Lacour J-R, Arsac LM. Optimal velocity for maximal power production in non-isokinetic cycling is related to muscle fibre type composition. *Eur J Appl Physiol* 1996; 74: 114-118.
- [73] **Heil DP**. Body mass scaling of frontal area in competitive cyclists not using aero-handlebars. *Eur J Appl Physiol* 2002; 87: 358-366.

-
- [74] **Heil DP.** Body mass scaling of projected frontal area in competitive cyclists. *Eur J Appl Physiol* 2001; 85: 520-528.
- [75] **Heil DP.** Body size as a determinant of the 1-h cycling record at sea level and altitude. *Eur J Appl Physiol* 2005; 93: 547-554.
- [76] **Henke T.** 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* 1998. University of Konstanz, Germany: 174 – 177.
- [77] **Hill AV.** The heat of shortening and the dynamic constants of muscle. *Proc Roy Soc B* 1938; 126: 136-195.
- [78] **Hintzy F, Belli A, Grappe F, Rouillon J-D.** Effet de l'utilisation de pédales automatiques sur les caractéristiques mécaniques mesurées lors de sprints sur cycloergomètre non isocinétique. *Sci Sports* 1999; 14: 137-144.
- [79] **Hintzy F, Belli A, Grappe F, Rouillon J-D.** Effet de l'utilisation de pédales automatiques sur les caractéristiques mécaniques mesurées lors de sprints sur cycloergomètre non isocinétique. *Sci Sports* 1999; 14: 137-144.
- [80] **Hintzy F, Belli A, Rouillon J-D, Grappe F.** Effet d'un plateau non circulaire sur la relation force-vitesse obtenue lors de sprints sur cycloergomètre. *Sci Mot* 2000; 40: 42-47.
- [81] **Hue O, Chamari K, Damiani M, Blonc S, Hertogh C.** The use of an eccentric chainring during an outdoor 1km all-out cycling test. *J Sci Med Sport* 2007; 10: 180-186.
- [82] **Hue O, Racinais S, Chamari K, Damiani M, Hertogh C, Blonc S.** Does an eccentric chainring improve conventional parameters of neuromuscular power? *J Sci Med Sport* 2008; 11: 264-270.

- [83] **Hull ML**, Williams M, Williams K, Kautz S. Physiological response to cycling with both circular and noncircular chainrings. *Med Sci Sports Exerc* 1992; 24 (10): 1114-1122.
- [84] **Illingworth CM**. Injuries to children riding BMX bikes. *Br Med J* 1984; 289: 956-957.
- [85] **Izquierdo M**, Häkkinen K, Gonzalez-Badillo JJ, Ibanez J, Gorostiaga EM. Effects of long-term training specificity on maximal strength and power of the upper and lower extremities in athletes from different sports. *Eur J Appl Physiol* 2002; 87: 264-271.
- [86] **Izquierdo M**, Häkkinen K, Gonzalez-Badillo JJ, Ibanez J, Gorostiaga EM. Effects of long-term training specificity on maximal strength and power of the upper and lower extremities in athletes from different sports. *Eur J Appl Physiol* 2002; 87: 264-271.
- [87] **Izquierdo M**, Häkkinene K, Anton A, Garrues M, Ibanez J, Ruesta M, Gorostiaga EM. Maximal strength and power, endurance performance, and serum hormones in middle-aged and elderly men. *Med Sci Sports Exerc* 2001; 33 (9): 1577-1587.
- [88] **Izquierdo M**, Ibanez J, Gorostiaga E, Garrues M, Zuniga A, Anton A, Larrion JL, Häkkinen K. Maximal strength and power characteristics in isometric and dynamic actions of the upper and lower extremities in middle-aged and older men. *Acta Physiol Scan* 1999; 167: 57-68.
- [89] **Izquierdo M**, Ibanez J, Häkkinen K, Kraemer WJ, Ruesta M, Gorostiaga EM. Maximal strength and power, muscle mass, endurance and serum hormones in weightlifters and road cyclists. *J Sports Sci* 2004; 22: 465-478.
- [90] **Jeukendrup AE**, Martin J. Improving cycling performance: How should we spend our time and money. *Sports Med* 2001; 31 (7): 559-569.

-
- [91] **Jidovtseff B**, Crielaard J-M, Cauchy S, Croisier J-L. Validité et reproductibilité d'un dynamomètre inertiel basé sur l'accélérométrie. *Sci Sports* 2008a; 23: 94-97.
- [92] **Jidovtseff B**, Croisier J-L, Crielaard J-M. Influence de la modalité du développé couché sur la performance iso-inertielle. *Sci Sports* 2006; 21: 159-162.
- [93] **Jidovtseff B**, Croisier J-L, Demoulin C, Crielaard J-M. Evaluation inertielle : état de la question et perspectives. *Sci Sports* 2008b; 23: 107-117.
- [94] **Jidovtseff B**, Quièvre J, Hanon C, Crielaard J-M. Les profils musculaires inertiels permettent une définition plus précise des charges d'entraînement. *Sci Sports* 2009; 24: 91-96.
- [95] **Johnson DL**, Bahamonde R. Power output estimate in university athletes. *J Strength Cond Res* 1996; 10: 161-166.
- [96] **Kautz SA**, Hull ML. A theoretical basis for interpreting the force applied to the pedal in cycling. *J Biomech* 1993; 26 (2): 155-165.
- [97] **Knapik JJ**, Staab JS, Harman EA. Validity of an anthropometric estimate of thigh muscle cross-sectional area. *Med Sci Sports Exerc* 1996; 28 (12): 1523-1530.
- [98] **Knudson DV**. Correcting the use of the term "power" in the strength and conditioning literature. *J Strength Cond Res* 2009; 23: 1902-1908.
- [99] **Koshida S**, Urabe Y, Miyashita K, Iwai K, Kagimori A. Muscular outputs during dynamic bench press under stable versus unstable conditions. *J Strength Cond Res* 2008; 22 (5): 1584-1588.
- [100] **Kraemer WJ**, Hatfield DL, Fleck SJ. Types of muscle training. In: Brown LE editor. *Strength Training* 2007. Champaign (IL): Human kinetics: 45-72.
- [101] **Kraemer WJ**, Ratamess NA. Fundamentals of resistance training: progression and exercise prescription. *Med Sci Sports Exerc* 2004; 36 (4): 674-688.

- [102] **Kraemer WJ**. Construct validity of the Myotest in measuring force and power production. *J Strength Cond Res* 2010; 24 (S1): 1-1.
- [103] **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: 131–135.
- [104] **Li L**, Caldwell GE. Muscle coordination in cycling: effect of surface incline and posture. *J Appl Physiol* 1998; 85 (3): 927-934.
- [105] **Markovic G**, Dizdar D, Jukic I, Cardinale M. Reliability and factorial validity of squat and countermovement jump tests. *J Strength Cond Res* 2004; 18 (3): 551-555.
- [106] **Martin JC**, Davidson CJ, Pardyjak ER. Understanding Sprint-Cycling performance: The integration of muscle power, resistance, and modeling. *Int J Sports Physiol Perform* 2007; 2: 5-21.
- [107] **Martin JC**, Gardner AS, Barras M, Martin DT. Modeling sprint cycling using field-derived parameters and forward integration. *Med Sci Sports Exerc* 2006; 38: 592-597.
- [108] **Martin JC**, Miliken DL, Cobb JE, McFadden KL, Coggan AR. Validation of a mathematical model for road cycling power. *J Appl Biomech* 1998; 14: 276-291.
- [109] **Martin JC**, Spirduso WW. Determinants of maximal cycling power: crank length, pedaling rate and pedal speed. *Eur J Appl Physiol* 2001; 84: 413-418.
- [110] **McBride JM**, Triplett-McBride T, Davie A, Newton RU. A comparison of strength and power characteristics between power lifters, Olympic lifters and sprinters. *J Strength Cond Res* 1999; 13: 58-66.
- [111] **McBride JM**, Triplett-McBride T, Davie A, Newton RU. The effect of heavy- vs. light-load jump squats on the development of strength, power, and speed. *J Strength Cond Res* 2002; 16: 75-82.

-
- [112] **Medbo JI**, and Tabata I. Anaerobic energy release in working muscle during 30 s to 3 min of exhausting bicycling. *J Appl Physiol* 1993; 75: 1654-1660.
- [113] **Mendez-Villanueva A**, Bishop D, Hamer P. Reproducibility of a 6-s maximal cycling sprint test. *J Sci Med Sport* 2007; 10: 323-326.
- [114] **Millet GP**, Candau R. Mechanical factors of the energy cost in three human locomotions. *Sci Sports* 2002; 17: 166-176.
- [115] **Minahan C**, Wood C. Strength training improves supramaximal cycling but not anaerobic capacity. *Eur J Appl Physiol* 2008; 102: 659-666.
- [116] **Morin J-B**, Belli A. Facteurs mécaniques de la performance en sprint sur 100 m chez des athlètes entraînés. *Sci Sports* 2003; 18: 161-163.
- [117] **Morin J-B**, Hintzy F, Belli A, Grappe F. Relations force-vitesse et performances en sprint chez des athlètes entraînés. *Sci Sports* 2002; 17: 78-85.
- [118] **Nevill AM**, Atkinson G. Assessing agreement between measurements recorded on a ration scale in sports medicine and sports science. *Br J Sports Med* 1997; 31: 314-318.
- [119] **Nevill AM**. Why the analysis of performance variables recorded on a ration scale will invariably benefit from a log transformation. *J Sports Sci* 1997; 15: 457-458.
- [120] **Newton RU**, Kraemer WJ, Häkkinen K, Humphries BJ, Murphy AJ. Kinematics, kinetics, and muscle activation during explosive upper body movements. *J Appl Biomech* 1996; 12: 31-43.
- [121] **Newton RU**, Kraemer WJ. Developing explosive muscular power: Implications for a mixed methods training strategy. *Strength Cond J* 1994; 16 (5): 20-31.
- [122] **Newton RU**. Expression and development of maximal muscle power. *Thèse* 1997. Université du Queensland, Australie.

- [123] **Oggiano L**, Troynikov O, Konopov I, Subic A, Alam F. Aerodynamic behaviour of single sport jersey fabrics with different roughness and cover factors. *Sports Eng* 2009; 12 (1): 1-12.
- [124] **Olds TS**, Norton KI, Craig NP. Mathematical model of cycling performance. *J Appl Physiol* 1993; 75 (2): 730-737.
- [125] **Olds TS**, Norton KI, Lowe ELA, Olive S, Reay F, Ly S. Modeling road-cycling performance. *J Appl Physiol* 1995; 78: 1596-1611.
- [126] **Olds TS**, Olive S. Methodological considerations in the determination of projected frontal area in cyclists. *J Sports Sci* 1999; 17: 335-345.
- [127] **Padilla S**, Mujika L, Angulo F, Goiriena JJ. Scientific approach to the 1-h cycling world record: A case study. *J Appl Physiol* 2000; 89: 1522-1527.
- [128] **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: 297-299.
- [129] **Patterson C**, Raschner C, Platzner H-P. Power variables and bilateral force differences during unloaded and loaded squat jumps in high performance alpine ski racers. *J Strength Cond Res* 2009; 23: 779-787.
- [130] **Pugh LGCE**. Oxygen intake in track and treadmill running with observations on the effect of air resistance. *J Physiol* 1970; 207: 823-835.
- [131] **Pugh LGCE**. The influence of wind resistance in running and walking and the mechanical efficiency of work against horizontal or vertical forces. *J Physiol* 1971; 213: 255-276.
- [132] **Rahmani A**, Dalleau G, Viale F, Belli A, Lacour JR. Mesure de la force dynamique par un test balistique. *Sci Sports* 1998; 13: 241-242.

- [133] **Rahmani A**, Viale F, Dalleau G, Lacour J-R. Force/velocity and power/velocity relationships in squat exercise. *Eur J Appl Physiol* 2001; 84: 227-232.
- [134] **Rankin JW**, Neptune RR. A theoretical analysis of an optimal chainring shape to maximize crank power during isokinetic pedaling. *J Biomech* 2008; 41: 1494-1502.
- [135] **Ratel S**, Duché P, Hautier CA, Williams CA, Bedu M. Physiological responses during cycling with noncircular “Harmonic” and circular chainrings. *Eur J Appl Physiol* 2004; 91: 100-104.
- [136] **Ravier G**, Grappe F, Rouillon JD. Application of force-velocity cycle ergometer test and vertical jump tests in functional assessment of karate competitor. *J Sports Med Phys Fitness* 2004; 44: 349-355.
- [137] **Reiser II RF**, Maines JM, Eisenmann JC, Wilkinson JG. Standing and seated wingate protocol in human cycling. A comparison of standard parameters. *Eur J Appl Physiol* 2002; 88: 152-157.
- [138] **Rodriguez-Marroyo JA**, Garcia-Lopez J, Chamari K, Cordova A, Hue O, Villa JG. The rotor pedalling system improves anaerobic but not aerobic cycling performance in professional cyclists. *Eur J Appl Physiol* 2009; 106:87-94.
- [139] **Rønnestad BR**, Hansen EA, Raastad T. Effect of heavy strength training on thigh muscle cross-sectional area, performance determinants, and performance in well-trained cyclists. *Eur J Appl Physiol* 2010; 108 (5): 966-975.
- [140] **Ruben RM**, Molinari MA, Bibbee CA, Childress MA, Harman MS, Reed KP, Haff GG. The acute effects of an ascending squat protocol on performance during horizontal plyometric jumps. *J Strength Cond Res* 2010; 24 (2): 358-369.
- [141] **Samozino P**, Morin J-B, Hintzy F, Belli A. A simple method for measuring force, velocity and power output during squat jump. *J Biomech* 2008; 41: 2940-2945.

-
- [142] **Sapega AA**, Drillings G. The definition and assessment of muscular power. *J Orthop Sports Phys Ther* 1983; 5, 7-9.
- [143] **Sheperd C**, McLagan J, Olson N, Taylor S, Gilliland L, Kline D, Detwiler A, Griswold S, Caruso J. Anthropometry as a predictor of front squat performance in college football players. *J Strength Cond Res* 2010; 24(S1): 1-1.
- [144] **Sheppard JM**, Cormack S, Taylor K-L, McGuigan MR, Newton RU. Assessing the force-velocity characteristics of the leg extensors in well-trained athletes: the incremental load power profile. *J Strength Cond Res* 2008; 22: 1320-1326.
- [145] **Shuter B**, Aslani A. Body surface area: Du Bois and Du Bois revisited. *Eur J Appl Physiol* 2000; 82: 250-254.
- [146] **Siegel JA**, Gilders RM, Staron RS, Hagerman FC. Human muscle power output during upper- and lower-body exercises. *J Strength Cond Res* 2002; 16 (2): 173-178.
- [147] **Siri WE**. Body composition from fluid space and density. In: J Brozek & A Hanschel eds. *Techniques for measuring body composition*. Washington, DC: National Academy of Sciences 1961: 223-244.
- [148] **Slade JM**, Miszko TA, Laity JH, Agrawal SK, Cress ME. Anaerobic power and physical function in strength-trained and non-strength-trained older adults. *J Gerontol* 2002; 57A: M168-M172.
- [149] **Sleivert G**, Taingahue M. The relationship between maximal jump-squat power and sprint acceleration in athletes. *Eur J Appl Physiol* 2004; 91: 46-52.
- [150] **Sogabe A**, Iwasaki S, Gallagher PM, Edinger S, Fry AC. Influence of stance width on power production during the barbell squat. *J Strength Cond Res* 2010; 24(S1): 1-1.

- [151] **Stone MH**, O'Bryant HS, McCoy L, Coglianese R, Lehmkuhl M, Schilling B. Power and maximum strength relationships during performance of dynamic and static weighted jumps. *J Strength Cond Res* 2003; 17: 140-147.
- [152] **Stone MH**, Sands WA, Carlock J, Callan S, Dickie D, Daigle K, Cotton J, Smith SL, Hartman M. The importance of isometric maximum strength and peak rate-of-force development in sprint cycling. *J Strength Cond Res* 2004; 18 (4): 878-884.
- [153] **Swain DP**, Richard J, Clifford PS, Milliken MC, Stray-Gundersen J. Influence of body size on oxygen consumption during bicycling. *J Appl Physiol* 1987; 62: 668-672.
- [154] **Swinton PA**, Lloyd R, Agouris I, Stewart A. Contemporary training practices in elite british powerlifters: survey results from an international competition. *J Strength Cond Res* 2009; 23 (2): 380-384.
- [155] **Thompson CJ**, Bembien MG. Reliability and comparability of the accelerometer as a measure of muscular power. *Med Sci Sports Exerc* 1999; 31 (6): 897-902.
- [156] **UCI**. Règlement UCI 2010– 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>).
- [157] **Vandewalle H**, Peres G, Heller J, Panel J, Monod H. Force-velocity relationship and maximal power on a cycle ergometer. *Eur J Appl Physiol* 1987; 56: 650-656.
- [158] **Watt J**, Reiser II RF, Walrath DE, Peterson ML. Quantifying power output using cycling frame strain. *The Engineering of Sport* 2004; 5 (1): 522-528.
- [159] **Weiss LW**, Fry AC, Wood LE, Relyea GE, Melton C. Comparative effects of deep versus shallow squat and leg-press training on vertical jumping ability and related factors. *J Strength Cond Res* 2000; 14 (3): 241-247.

- [160] **Wilson GJ**, Lyttle AD, Ostrowski KJ, Murphy AJ. Assessing dynamic performance: a comparison of rate of force development tests. *J Strength Cond Res* 1995; 9 (3): 176-181.
- [161] **Wilson GJ**, Newton RU, Murphy AJ, Humphries BJ. The optimal training load for the development of dynamic athletic performance. *Med Sci Sports Exerc* 1993; 25: 1279-1286.
- [162] **Winchester J**, McGuigan MR, Nelson AG, Newton M. The relationship between isometric and dynamic strength in college aged males. *J Strength Cond Res* 2010; 24 (s1): 1-1.
- [163] **Winchester JB**, Erickson TM, Blaak JB, McBride JM. Changes in bar-path kinematics and kinetics after power-clean training. *J Strength Cond Res* 2005; 19 (1): 177-183.
- [164] **Wong P-L**, Chamari K, Wisloff U. Effects of 12-Week on-field combined strength and power training on physical performance among U-14 young soccer players. *J Strength Cond Res* 2010; 24 (3): 644-652.
- [165] **Zabala M**, Requena B, Sanchez-Munoz C, Gonzalez-Badillo JJ, Garcia I, Oopik V, Paasuke M. Performance and perceptual responses in a laboratory-simulated BMX cycling qualification series. *J Strength Cond Res* 2008; 22 (5): 1645-1653.
- [166] **Zatsiorsky VM**, Kraemer W. *Science and Practice of Strength Training* (2nd edition) 2006. Champaign, IL: Human Kinetics
- [167] **Zink AJ**, Perry AC, Robertson BL, Roach KE, Signorile JF. Peak power, ground reaction forces, and velocity during the squat exercise performed at different loads. *J Strength Cond Res* 2006; 20: 658-664.

IX. LISTE DES FIGURES

Figure I-1 – Présentation schématique des déterminants de la performance en BMX.....	25
Figure II-1 – Piste de BMX des Jeux Olympiques de Pékin 2008	27
Figure II-2 – Rampe de départ de la piste de BMX des Jeux Olympiques de Pékin 2008..	28
Figure II-3 – Mesures de vitesse de déplacement et de puissance mécanique produite à l'aide d'un PowerTap lors d'un départ d'entraînement sur la piste de BMX des J.O. de Pékin [Service expertise et optimisation de la performance, FFC].	29
Figure II-4 – Exemples de vitesses maximales atteintes par un pilote de BMX masculin de haut niveau lors de départs d'entraînement effectués sur une butte de départ identique à celle des Jeux Olympiques de 2008 [Service expertise et optimisation de la performance, FFC].	30
Figure II-5 – Exemples de production de puissance maximale chez deux pilotes (1 femme et 1 homme) en fonction du temps sur les 5 premiers mètres lors de départs d'entraînement effectués sur une butte de départ identique à celle des Jeux Olympiques de 2008 [Service expertise et optimisation de la performance, FFC].	30
Figure II-6 – Mesure de la cadence de pédalage à l'aide d'un PowerTap lors d'un départ d'entraînement sur la piste de BMX des J.O. de Pékin [Service expertise et optimisation de la performance, FFC].	31
Figure II-7 – Présentation schématique des déterminants de la performance en BMX.	34
Figure III-1 – Relations Force – Vitesse et Force – Puissance pour le muscle squelettique. $F F_0^{-1}$: Force normalisée par rapport à la force isométrique maximale. $v v_0^{-1}$: Vitesse de	

raccourcissement normalisée par rapport à la vitesse maximale. P_{MAX} : Puissance maximale [D'après Newton, 1997].	44
Figure III-2 – Exemple de relation « Charge – Puissance » lors d'un mouvement de Squat contre différentes charges relatives au 1RM. La charge optimale est égale à 50 % du 1RM pour cet athlète de force de niveau international [Données personnelles].	46
Figure III-3 – Illustration du Squat Jump réalisé sur une machine spécifique (A) d'après Harris et al. [2008], et illustration du Power Clean (B) d'après Duba et al. [2009].	49
Figure III-4 – Exemple de relations « Charge – Puissance » pour 2 sujets (A et B) en $\frac{1}{2}$ Squat Concentrique avec la masse corporelle incluse (Avec 88% de m_c) et exclue (Sans m_c) du calcul de la puissance maximale pour les même essais [Données personnelles].	53
Figure III-5 – Exemple d'un profil de la puissance produite (A) et d'un profil de la cadence de pédalage (B) en fonction du temps lors d'un test de Wingate de 30s chez un pilote de BMX.	55
Figure III-6 – Relation typique Cadence – Puissance pour un cycliste sur route lors d'un test de « Force – Vitesse » sur cyclo-wattmètre contre 3 résistances de friction 0,4, 0,6 et 0,8 Nkg ⁻¹ . Cette relation permet de déterminer P_{MAX} (W) et Cad_{Opt} (rpm).	57
Figure III-7 – Relation typique Cadence – Force pour un cycliste sur route lors d'un test de « Force – Vitesse » sur cyclo-wattmètre contre 3 résistances de friction 0,4, 0,6 et 0,8 Nkg ⁻¹ . Cette relation permet de déterminer v_0 (rpm) et F_0 (N).	58
Figure III-8 – Les différentes phases du cycle de pédalage : 1) la phase motrice principale (45 – 135°), 2) le point mort bas (135 – 225°), 3) la phase de récupération (225 – 315°), et 4) le point mort haut (315 – 45°) [D'après Henke 1998].	60
Figure III-9 – Exemples de systèmes de pédaliers conçus pour améliorer le cycle de pédalage : le pédalier « Biopace » (Shimano) (A), le pédalier non-circulaire « Harmonic »	

(O.Symetry, France) (B), le système Rotor (Rotor Bike Components, Madrid, Espagne) (C) et le système « Pro-Race » (D) d'après Hue et al. [2007].	61
Figure III-10 – Présentation schématique des déterminants de la performance en BMX. ..	67
Figure III-11 – Position de départ (Angle cuisse – jambe à environ 90°) de la phase concentrique en ½ Squat.	74
Figure III-12 – Accéléromètre 3 axes sans fil Myotest® (Myotest SA, Suisse).	74
Figure III-13 – Home-trainer SRM-Basic (A) équipé d'un capteur de puissance SRM modèle Scientifique (B).	77
Figure III-14 – Vitesses moyennes (Myo v_{moy} , ms^{-1}) en fonction des différentes charges relatives au 1RM en ½ Squat lors de la phase concentrique (Ch_{rel} , % 1RM). *Différence significative ($p < 0,05$) avec la Ch_{rel} 15% de 1RM.	80
Figure III-15 – Forces moyennes (Myo F_{moy} , N) en fonction des différentes charges relatives au 1RM en ½ Squat lors de la phase concentrique (Ch_{rel} , % 1RM). **Différence significative ($p < 0,01$) avec la Ch_{rel} 80% de 1RM.	81
Figure III-16 – Puissances moyennes produites (Myo P_{moy} , W) en fonction des différentes charges relatives au 1RM en ½ Squat lors de la phase concentrique (Ch_{rel} , % 1RM). *Différence significative ($p < 0,05$) avec la Ch_{rel} 60% de 1RM.	82
Figure III-17 – Exemple de relations Charge relative – Vitesse et Charge relative – Puissance définies à partir du profil musculaire inertiel lors d'un mouvement de ½ Squat concentrique d'un cycliste sur route. Myo : Myotest ; v : Vitesse ; P : Puissance ; Ch_{rel} : Charge relative au 1RM ; v_0 : Vitesse maximale théorique ; Ch_{Opt} : Charge optimale ; v_{Opt} : Vitesse optimale.	83
Figure III-18 – Relation typique entre la vitesse de pédalage (SRM v , rpm) et la puissance (SRM P , W) produite au cours de trois sprints contre des résistances de 0,4, 0,6 et 0,8 Nkg ⁻¹ sur bicyclette ergométrique.	85

Figure III-19 – Relation entre l'aire de section musculaire de la cuisse (AM_{Cuisse} , cm^2) et la masse corporelle élevée à la puissance 0,67 ($m_c^{0,67}$, $\text{kg}^{0,67}$) chez des cyclistes sur route (n = 10).	91
Figure III-20 – Relation entre l'aire de section musculaire des cuisses (AM_{Cuisse} , cm^2) et la puissance maximale produite lors d'un test « Force – Vitesse » (SRM P_{MAX} , W) chez des cyclistes sur route (n = 10).	91
Figure III-21 – Exemple de zones d'entraînements selon un profil inertiel musculaire pour un cycliste sur route.	97
Figure III-22 – Accéléromètre 2 axes Myotest [®] (Myotest SA, Suisse).	101
Figure III-23 – Le système Optojump (Microgate SLR, Italie).	102
Figure III-24 – PowerTap , modèle Professional, CycleOps, Etats-Unis	103
Figure III-25 – Vitesses moyennes (Myo v_{moy} , ms^{-1}) en fonction des différentes charges absolues en ½ Squat lors de la phase concentrique (Ch_{abs} , kg). *Différence significative ($p < 0,05$) avec la Ch_{abs} 10 kg.	105
Figure III-26 – Forces moyennes (Myo F_{moy} , N) en fonction des différentes charges absolues en ½ Squat lors de la phase concentrique (Ch_{abs} , kg). *Différence significative ($p < 0,05$) avec la Ch_{abs} 100 kg.	106
Figure III-27 – Puissances moyennes produites (Myo P_{moy} , W) en fonction des différentes charges absolues en ½ Squat lors de la phase concentrique (Ch_{abs} , kg). *Différence significative ($p < 0,05$) avec la Ch_{abs} 10 kg.	107
Figure III-28 - Exemple de relations Charge absolue – Vitesse et Charge absolue – Puissance définies à partir du profil musculaire inertiel lors d'un mouvement de ½ Squat concentrique d'un pilote de BMX. Myo : Myotest ; v : Vitesse ; P : Puissance ; Ch_{abs} : Charge absolue ; v_0 : Vitesse maximale théorique ; Ch_{Opt} : Charge optimale ; v_{Opt} : Vitesse optimale.	108

Figure III-29 – Exemple de zones d’entraînements selon un profil inertiel musculaire pour un pilote de BMX.	117
Figure III-30 – Schéma du système d’assistance lors du Squat Jump avec charge [D’après Patterson et al., 2009].	123
Figure III-31 – Cellules photoélectriques Racetime 2 (Microgate, Italie).....	125
Figure III-32 – Comparaison des puissances moyennes relatives à la masse corporelle ($\text{Myo } P_{\text{moy}} m_c^{-1}$, Wkg^{-1}) (A), des vitesses moyennes ($\text{Myo } v_{\text{moy}}$, ms^{-1}) (B) et des forces moyennes relatives à la masse corporelle ($\text{Myo } F_{\text{moy}} m_c^{-1}$, Nkg^{-1}) (C) des BMX_{HN} , des Cyclistes sur route et des athlètes de force. ⁺ Différence significative ($p < 0,05$) comparé aux athlètes de force, ^{a,b} Différence significative ($p < 0,05$) comparé aux Cyclistes sur route.	128
Figure III-33 – Comparatif des profils de force et de vitesse maximales théoriques moyennes chez les 4 groupes testés.....	133
Figure III-34 – Force isométrique en fonction du temps indiquant la force maximale et le taux maximale de développement de force (RFD_{MAX} , Ns^{-1}) chez des athlètes non entraînés, entraînés en force maximale et entraînés en « force explosive », d’après Newton et Kraemer [1994].....	138
Figure III-35 – Illustration du Soulevé de Terre (SDT) (A) d’après Graham [2000a], et illustration du Power Clean (B) d’après Duba et al. [2009].	139
Figure III-36 – Présentation schématique des déterminants de la performance en BMX.	141
Figure IV-1 – Exemples de vitesses maximales atteintes par un pilote de BMX masculin de haut niveau lors de départs d’entraînement effectués sur une butte de départ identique à celle des Jeux Olympiques de 2008 [Service expertise et optimisation de la performance, FFC].....	142

Figure IV-2 – Influence de la vitesse de l'air (v_f , ms^{-1}) sur l'aire frontale effective ($A_p C_D$, m^2) pour un cycliste de haut-niveau en position traditionnelle aérodynamique (TAP) sur une bicyclette de route standard en soufflerie [D'après Grappe, 2009].	147
Figure IV-3 – Position aérodynamique traditionnelle (TAP)	148
Figure IV-4 – Influence de la vitesse de l'air (v_f , ms^{-1}) sur l'aire frontale effective ($A_p C_D$, m^2) pour trois cyclistes sur piste en position de compétition sur des bicyclettes de piste, en soufflerie [D'après Grappe, 2009].	148
Figure IV-5 – Evolution de la puissance mécanique produite (P , W) en fonction de la vitesse de déplacement (v , ms^{-1}) pour un cycliste sur une bicyclette de piste dans un vélodrome en position aérodynamique traditionnelle (TAP) dans deux conditions : avec traitement et sans traitement [D'après Grappe, 2009].	149
Figure IV-6 – Aire frontale d'un cycliste et de sa bicyclette (A_p , m^2) représentée par la zone aux contours oranges.	152
Figure IV-7 – Photographie en laboratoire d'un cycliste sur sa bicyclette avec une zone de calibration dont l'aire est connue placée à ses côtés.	154
Figure IV-8 – Planimètre polaire (A) et la représentation graphique de la façon de mesurer une aire à l'aide de cet instrument (B).	156
Figure IV-9 – Positions représentatives des positions classiques adoptées en cyclisme sur route.	157
Figure IV-10 – Digitaliseur manuel (A) et image exportée sous Scion Image Release Alpha 4.0.3.0.2 for Windows (B).	158
Figure IV-11 – Exemple d'aire frontale projetée d'un cycliste et de sa bicyclette (A_p , m^2) avec zone de calibration (A) et dispositif de prise de la photographie en laboratoire (B).	163
Figure IV-12 – Exemple de photographies dans les deux positions testées : Position redressée (UP) (A) et position traditionnelle aérodynamique (TAP) (B).	164

Figure IV-13 – Démonstration de la mesure de l'aire frontale projetée totale du cycliste et de sa bicyclette à l'aide d'une nouvelle méthode de terrain. L' A_p est délimitée (A) puis extrudée (B) et mesurée en mm^2 (C).....	165
Figure IV-14 – Exemple d'une découpe de zone représentant l' A_p du cycliste et de la zone de calibration (A) et la balance Metler Toledo AB 204 ($\pm 0,001$ gramme de sensibilité) (B) utilisée pour peser ces zones.	166
Figure IV-15 – Exemple d'une image noircie représentant l' A_p totale et la zone de calibration, utilisée dans le logiciel Scion Image Release Alpha 4.0.3.2 for Windows (Scion Corporation, Frederick, Md., Etats-Unis).....	167
Figure IV-16 – Exemple de photographie prise en condition de terrain sans pose de zone de calibration. La référence utilisée pour remettre la photographie à l'échelle est la largeur du guidon (0,582 m) (A). L' A_p totale du sujet est ensuite mesurée à l'aide d'un logiciel de C.A.O. (B).....	168
Figure IV-17 – PowerTap, modèle Professional, CycleOps, Etats Unis.	169
Figure IV-18 – Valeurs prédites de la nouvelle méthode (NM) en fonction des valeurs résiduelles.	172
Figure IV-19 – Différence entre les données logarithmiquement transformées de l' A_p corporelle mesurée avec NM et WP, selon Bland et Altman [1986].....	172
Figure IV-20 – Selon Bland et Altman, la différence entre les données logarithmiquement transformées de l' A_p totale mesurée avec NM et DM.	173
Figure IV-21 – Evolution du coefficient de traînée (C_D) en fonction de l'aire frontale projetée (A_p) totale pour des cyclistes sur vélo tout-terrain (A) et pour des cyclistes lors d'un record de l'heure [Padilla et al., 2000] (B).	177
Figure IV-22 – Présentation schématique des déterminants de la performance en BMX.	180

Figure V-1 – Exemple de l'aire frontale projetée totale (A_T , m ²) d'un sujet sur sa propre bicyclette mesurée lors d'un sprint de 80 m.	183
Figure V-2 – Dispositif de prise de la photographie pour la mesure de l'aire frontale projetée totale sur le terrain lors de sprints.	183
Figure V-3 – Illustration du maintien des pilotes par un expérimentateur lors des départs arrêtés.	184
Figure V-4 – Exemples de relations Couple – Cadence de pédalage (A) et Puissance – Cadence de pédalage (B) lors de sprints de 80 m. Détermination de la cadence théorique maximale (Cad_0), du couple théorique maximale (C_0), de la puissance maximale (P_{MAX}) et de la cadence optimale (Cad_{Opt}).	185
Figure V-5 – Relation entre la vitesse maximale sur 80 m (v_{80}) et la puissance maximale produite relative à l'aire frontale projetée totale ($P_{MAX}A_p^{-1}$).	187
Figure V-6 – Exemple de détermination pour un pilote de la puissance produite à cadence moyenne sur 80 m (P_{Cadmoy}) à l'aide de la relation Puissance – Cadence de pédalage.	190
Figure V-7 – Illustration de l'aire frontale projetée lors du pédalage en BMX. L'aire frontale projetée totale est égale à 0,519 m ² pour ce pilote.	192
Figure V-8 – Réduction de 27% de l'aire frontale projetée totale lors d'une phase de non-pédalage.	193
Figure V-9 – Exemples de vitesses maximales atteintes par un pilote de BMX masculin de haut niveau lors de départs d'entraînement effectués sur une butte de départ identique à celle des Jeux Olympiques de 2008 [Service expertise et optimisation de la performance, FFC].	194
Figure VI-1 – Schéma récapitulatifs des déterminants de la performance étudiée dans cette thèse.	196
Figure VII-1 – Pédales instrumentées avec des capteurs dynamométriques 3 axes.	199

Figure VII-2 – Exemple des vitesses atteintes et des puissances produites lors d’un tour de piste en BMX. La ligne continue rouge représente la vitesse optimale du pilote de BMX.	200
Figure VII-3 – Dérailleur Nexus de Shimano (A) et dérailleur Speedhub de Rohloff (B) intégré directement dans le moyeu de la roue arrière.	201
Figure VII-4 – Exemple de casque utilisé lors des compétitions de BMX. Il présente une visière (A) et une grande ouverture au niveau du visage (B).	202
Figure VII-5 – Représentation des zones subissant les plus grandes déformations (zones sombres) dans un cadre de BMX.	203

X. LISTE DES TABLEAUX

Tableau III-1 – Comparaison de la littérature et des différentes méthodes utilisées pour calculer la production de puissance musculaire.....	37
Tableau III-2 – Charges qui maximisent la production de puissance moyenne ou maximale pour les membres inférieurs lors d'un mouvement d'extension.....	47
Tableau III-3 – Constantes dépendantes du sexe et de l'âge (<i>C</i> et <i>M</i>) dans le calcul de la densité corporelle (<i>D_c</i>). D'après Durnin et Womersley [1974].	71
Tableau III-4 – Données anthropométriques et 1RM en ½ Squat d'un échantillon de cyclistes sur route (n=10). Valeurs moyennes ± Ecart-Type.....	79
Tableau III-5 – Valeurs individuelles maximales ± Ecart-Type des variables principales mesurées lors de tests sur un échantillon de cyclistes sur route (n = 10).	85
Tableau III-6 – Matrice de corrélations des données anthropométriques et des données issues du Myotest pour les tests du profil musculaire inertiel et de Squat Jump, et du SRM pour les tests de « Force – Vitesse ».	87
Tableau III-7 – Matrice de corrélations des données issues du Myotest pour les tests du profil musculaire inertiel et du SRM pour les tests de « Force – Vitesse ».	88
Tableau III-8 – Matrice de corrélations des données issues du Myotest (Myo) pour les tests du profil musculaire inertiel et du Squat Jump (SJ).....	88
Tableau III-9 – Matrice de corrélations des données issues du SRM pour les tests de « Force – Vitesse » (SRM) et du Myotest pour le Squat Jump (SJ).	89
Tableau III-10 – Valeurs individuelles maximales ± Ecart-Type des variables principales mesurées lors de tests sur un échantillon de pilotes de BMX (n = 10).....	109

Tableau III-11 – Matrice de corrélations des données issues du Myotest (Myo) pour les tests du profil musculaire inertiel et du PowerTap pour les tests de « Force – Vitesse » (FV) et de Wingate (WIN).....	110
Tableau III-12 – Matrice de corrélations des données issues du Myotest (Myo) pour les tests du profil musculaire inertiel et du Squat Jump (SJ).	111
Tableau III-13 – Matrice de corrélations des données issues du PowerTap pour les tests de « Force – Vitesse » (FV) et de Wingate (WIN) et du Myotest pour le Squat Jump (SJ). .	111
Tableau III-14 – Données anthropométriques d’athlètes de différentes disciplines sportives. Valeurs moyennes $\pm$ Ecart-Type.....	121
Tableau III-15 – Résultats du 1RM et $1RMm_c^{-1}$ chez des athlètes de différentes disciplines sportives. Valeurs moyennes $\pm$ Ecart-Type.	127
Tableau III-16 – Comparaison des données représentatives du $\frac{1}{2}$ Squat et du Squat entre un groupe de Cyclistes sur route, d’athlètes de force (AF), de Pilotes de BMX de haut niveau (BMX_{HN}) et de niveau régional à national (BMX_{RN}).	130
Tableau III-17 – Comparaison des données représentatives du Squat Jump entre les 4 groupes de sujets. Valeurs moyennes $\pm$ Ecart-Type.	131
Tableau IV-1 – Influence de la masse volumique de l’aire sur la traînée Aérodynamique	146
Tableau IV-2 – Photographies unicolores développées sur papier (17 x 12.7 cm) et pesées à l’aide d’une balance Metler Toledo AB 204 ($\pm 0,001$ gramme de sensibilité).	155
Tableau IV-3 – Aires frontales projetées (A_p) totale et corporelle moyennes ($\pm$ ET) de cyclistes mesurées dans deux positions avec la méthode de pesage des photographies (WP), la nouvelle méthode de terrain (NM) et la méthode de digitalisation (DM).....	171
Tableau V-1 – Valeurs moyennes des variables mécaniques mesurées lors de sprints sur 80 m à l’aide d’un PowerTap chez des pilotes de BMX de haut niveau.	186

Tableau V-2 – Données anthropométriques et Aire frontale projetée totale de pilotes de BMX de haut niveau (n = 7).	193
--	-----

New Method to Estimate the Cycling Frontal Area

Authors

P. Debraux, W. Bertucci, A. V. Manolova, S. Rogier, A. Lodini

Affiliation

LACM-DTI (EA 4302 LRC CEA 0534), Université Reims Champagne-Ardenne, France

Key words

- projected frontal area
- bicycling
- aerodynamic drag
- validation
- performance

Abstract

The purpose of this study was to test the validity and reliability of a new method to estimate the projected frontal area of the body during cycling. To illustrate the use of this method in another cycling speciality (i.e. mountain bike), the NM data were coupled with a powermeter measurement to determine the projected frontal area and the coefficient of drag in actual conditions. Nine male cyclists had their frontal area determined from digital photographic images in a laboratory while seated on their bicycles in two positions: Upright Position (UP) and Traditional Aerodynamic Position (TAP). For each position, the projected frontal area for the body of the cyclist as well as the cyclist and his bicycle were measured

using a new method with computer aided-design software, the method of weighing photographs and the digitizing method. The results showed that no significant difference existed between the new method and the method of weighing photographs in the measurement of the frontal area of the body of cyclists in UP ($p=0.43$) and TAP ($p=0.14$), or between the new method and the digitizing method in measurement of the frontal area for the cyclist and his bicycle in UP ($p=0.12$) and TAP ($p=0.31$). The coefficients of variation of the new method and the method of weighing photographs were 0.1% and 1.26%, respectively. In conclusion, the new method was valid and reliable in estimating the frontal area compared with the method of weighing photographs and the digitizing method.

accepted after revision
October 12, 2008

Bibliography

DOI 10.1055/s-0028-1105940
Published online:
February 6, 2009
Int J Sports Med 2009; 30:
266–272 © Georg Thieme
Verlag KG Stuttgart · New York
ISSN 0172-4622

Correspondence

P. Debraux, PhD, Student

LACM
UFR STAPS
Bâtiment 6
Campus Moulin de la Housse
51687 Reims
France
Tel.: +33/3/26 91 31 74
Fax: +33/3/26 91 38 06
pierre.debraux@etudiant.
univ-reims.fr

Introduction

Performance in cycling is dependent on the human physiology and on technologic parameters of the bicycle. Performance has been modelled mathematically to understand the parameters of success [13, 14]. The major performance parameter in cycling (i.e. velocity of the cyclist: v , in $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) is the ratio of the power output generated by the cyclist (P , in Watts) to the total resistive forces (R_T , in N):

$$v = \frac{P}{R_T} \quad (1)$$

At the same power output, velocity is greatly dependent on the total resistive forces. When cycling on level ground with a constant velocity, the total resistive forces are composed of three factors which oppose forward motion: 1) aerodynamic drag (R_D), 2) rolling resistance (R_R), and 3) friction resistance (R_F). However, the loss of power from R_F represents only 3–5% of the total power [21, 23] and can be assumed to be negli-

ble in comparison to the R_R . Therefore, we will discuss only R_D and R_R .

For racing speeds greater than $\sim 14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, R_D represents about 90% of the overall resistive forces [5]. R_D is directly proportional to the projected area of the cyclist and bicycle combined (A_p , in m^2), the coefficient of drag (C_D), air density (ρ , in $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), and the square of the velocity of the cyclist (v) [23]:

$$R_D = 0.5 \times \rho \times C_D \times A_p \times v^2 \quad (2)$$

To estimate R_D , C_D and Total A_p have to be evaluated. These parameters can be evaluated in actual conditions coupled with measurements of power output and velocity using a powermeter (e.g. SRM, PowerTap, Ergomo, Max One) [3, 15, 20]. They can also be determined by the deceleration method where the decrease in velocity over a specified distance is used to measure aerodynamic drag [5].

A third method involves the use of a wind-tunnel. The subject being tested either rests on a

stationary force plate or is driven on a treadmill that is incorporated into the floor of the wind-tunnel and positioned on force plates. Wind is artificially generated onto the subject being tested, and the forces acting on the subject are quantified through the force plate measurements [5]. Both variables (C_D and Total A_p) depend upon the position of the cyclist and his equipment. The Total A_p depends on body mass and body height [11,26,27] and the rider's position on bicycle [16–18].

Two major techniques have been used to measure A_t : the method of weighing photographs [6,7,12,16,27–29] and the digitizing method [10,16,17]. The first consists of taking photographs of a subject and of a calibration frame with a known area. Subject and calibration frame images are cut from the photograph and weighed using an accurate balance to calculate the actual Total A_p in square meters. For the second method, the photograph of the subject and the calibration frame are digitized to establish the actual Total A_p using a computer-based image analysis software application (Scion Image Release Alpha 4.0.3.2 for Windows, Scion Corporation, Frederick, Md., USA). In both methods, the area of the cyclist is multiplied by the calibration area to obtain a determination of the actual Total A_p in square meters. Only after the Total A_p is known can the C_D be determined using a power meter, the deceleration method or in a wind tunnel.

Many authors have established mathematical models to estimate the power output during a race (e.g. [9,20,21,26–28]). Martin et al. [20] established a model for predicting the power output with aerodynamic drag as an important parameter using a power-meter. They showed that values of aerodynamic drag area recorded in field tests ($0.258 \pm 0.006 \text{ m}^2$) were equivalent to values measured in wind tunnel ($0.261 \pm 0.006 \text{ m}^2$). Thus, the more precise the determination of C_D and Total A_p is, the more the mathematical model will reflect what actually happens in a race. Jeukendrup and Martin [19] showed the importance of aerodynamics, in particular of the body position, in determining the accuracy of the calculations. Under similar conditions, an amelioration of just 0.015 m^2 in the $C_D A_p$ resulted in an improvement of 1 min in a 40 km time-trial using their mathematical model.

To provide the most accurate estimation of performance, it would be advantageous to establish the best position of the rider relative to the bicycle to maximize efficiency and reduce the R_p , which depends on v and $C_D A_p$. Since the calculation of C_D is highly dependent on an accurate determination of Total A_p , it is vital to establish the most valid and reliable method of measuring the Total A_p of the rider.

Therefore, the aim of this study was to test the validity and reliability of a new method that permits the projected frontal area measurement of the body in actual conditions. The validity and reliability of NM were tested in comparison with the method of weighing photographs [6,7,12,16,27–29] and with the digitizing method [10,16,17] using Scion Image software.

A group of cyclists specialized in mountain bike riding was chosen to illustrate the interest and the use of this method to measure A_p in actual conditions. Coupled with a powermeter measurement the coefficient of drag (C_D) was determined.

Methods

Subjects

Nine competitive male cyclists (regional to national level) volunteered as subjects for this study. Basic anthropometric data include: mean ($\pm$ SD) age 26.7 ($\pm$ 13.9) yrs, body mass (m_b) 72.7 ($\pm$ 8.6) kg, body height (h_b) 1.89 ($\pm$ 0.06) m, competitive cycling experience 13.3 ($\pm$ 9.8) yrs. Each subject read and signed an informed consent form prior to their involvement in the study. This research was approved by our academic Human Subjects Review Committee.

Measurement protocol in laboratory conditions

Each personal bicycle was mounted on a stationary indoor trainer (Tacx Basic, Netherlands), levelled prior to all measurements, and positioned against a white background. Subjects placed their right foot forward (i.e. 90° crank position, where 0° is top-dead-center), and their left foot back (270° crank position). A calibration frame of known area (0.110148 m^2) was located midway between the hips and shoulders of the subjects, face to the camera. A tripod mounted camera was levelled 5.0 m in front of the subject and 1.1 m above the ground surface [16,17].

Measurements of A_t were determined from digital photographic images taken indoors using a digital camera with a resolution of 8 megapixels (Canon EOS 300D, FRANCE). The A_t was determined in two different positions while cyclists sat stationary on their own racing bicycles, without helmet, and looking directly into the camera. The two positions were those commonly used by racing cyclists without aero-handlebars (● Fig. 1):

- Upright position (UP): Where the torso is upright with the hands placed near the stem of the handlebars (● Fig. 1A)

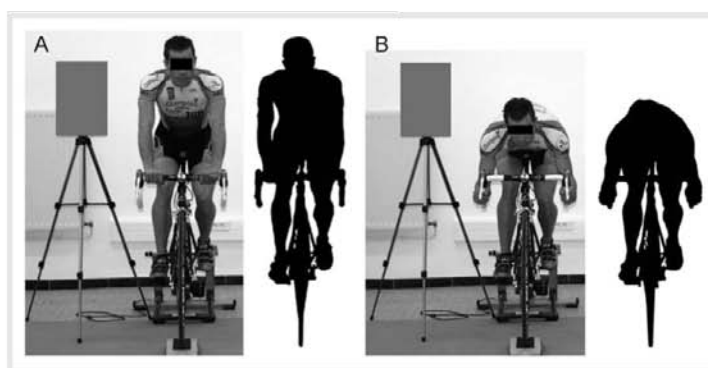


Fig. 1 Example of photographs and the representation of Total A_p with the new method for single subject in the two positions tested: Upright Position (A) and Traditional Aerodynamic Position (B).

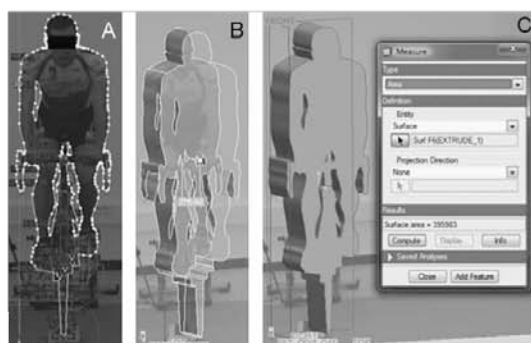


Fig. 2 Determination of the Total A_p with the new method. We started to enclose the area of the cyclist and his bicycle (A), then this area was extruded (B), and measured in square millimetres (C).

- **Traditional Aerodynamic Position (TAP):** Where the torso is parallel to the ground, with the hands in the drop portion of the handlebars and elbow flexed at 90° (◉ Fig. 1B)

All photographic images were transferred to a computer and printed in a classic format (100×130 mm) for analysis.

Computation of the projected frontal area with the new method

Each digital photographic image (3072×2048 pixels) was opened in Computer Aided Design (CAD) software (Pro/ENGINEER® Wildfire™ 2.0) and placed with the "Style tool" on an actual scale with the vertical or horizontal dimension of the calibration frame. The outlines of the area enclosed by the body of the cyclist (i.e. Body A_p), as well as the total area of the cyclist and his bicycle (i.e. Total A_p) were traced with the spline curve tool in a 2D plane, in the sketch mode of the software. Body A_p included the outline of the cleats and clothing of the cyclist, while Total A_p included Body A_p and any observable portions of the bicycle (including wheel spokes, but not derailleur cables). The software can only carry out a measure on a 3D volume, therefore, the enclosed area (in 2D) was extruded to obtain a volume and then measured (◉ Fig. 2).

Determination of Body A_p with the reference method: the method of weighing photographs

To determine Body A_p using the method of weighing photographs, photographs of 100×130 mm of the digital photographic image of the subject and calibration frame were cut from the photographs with scissors and weighed using an accurate balance (Metler Toledo AB 204, ± 0.001 gram sensitivity). The actual Body A_p in square meters was then calculated for each image by multiplying the calibration constant (0.110148 m^2) by the ratio of the Body A_p image weight over the calibration frame image weight [16, 17, 27].

Computation of Total A_p with the digitizing method

In order to compare with a third technique, each numeric photograph (3072×2048 pixels) in format ". JPEG" was modified by a computer-based imaging software (Adobe Photoshop CS2, Adobe, USA). To avoid a grey scale density, each image was converted into black and white, and the cyclist and the calibration frame zones were darkened. Then they were opened with a computer-based image analysis software application (Scion Image

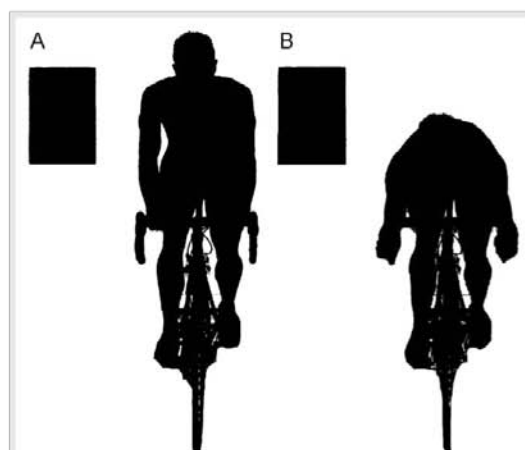


Fig. 3 Example of photographs and the representation of Total A_p with the digitizing method for single subject in the two positions tested: Upright Position (A) and Traditional Aerodynamic Position (B).

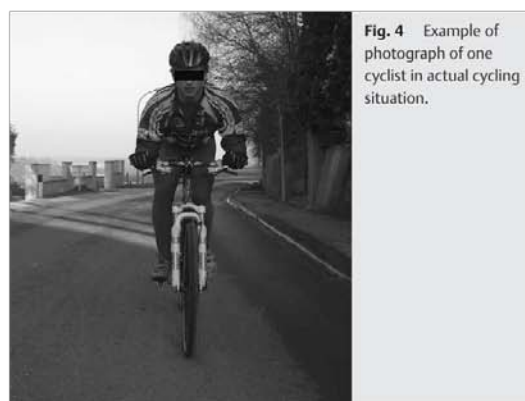


Fig. 4 Example of photograph of one cyclist in actual cycling situation.

Release Alpha 4.0.3.2 for Windows, Scion Corporation, Frederick, Md., USA) to measure Total A_p using the "Magic wand" to select the two darkened zones and to obtain the area in pixels. The actual Total A_p in m^2 of each digitized image was determined by dividing the area of the digitized image by the area of the corresponding calibration image and multiplying by the known area of the calibration frame (0.110148 m^2) (◉ Fig. 3).

Measurement protocol in actual cycling conditions

Example of determination of the $C_D A_p$ in actual condition

The methods to measure the projected frontal area could be useful in actual conditions coupled with the measure of mechanical power output in any speciality of cycling to determine the $C_D A_p$. Seven trained cyclists (regional to national level) volunteered as subjects for this phase of the study. Basic anthropometric data included: mean ($\pm$ SD) age $25.3 (\pm 5.1)$ yrs, m_b $70.5 (\pm 5.4)$ kg and h_b $1.77 (\pm 0.03)$ m. They performed 4 road trials (3 min on a level road without wind) in one position (◉ Fig. 4) at different velocities (6.9 , 8.3 and $9.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) on the same mountain bike (XTC composite Disc 2 2007, Giant, USA) with the following specifications: mass = 11.9 kg, frame size = 0.58 m, diameter for the main

Table 1 Mean (SD) body and total projected frontal area of competitive cyclists in two positions with the method of weighing photographs, the new method and the digitizing method.

	The method of weighing photographs	The new method		The digitizing method
Body position	Body A_p (m ²)	Body A_p (m ²)	Total A_p (m ²)	Total A_p (m ²)
UP	0.432 (0.030)	0.430 (0.031)	0.565 (0.037)	0.533 (0.031)
TAP	0.341 (0.029)	0.338 (0.029)	0.450 (0.040)	0.426 (0.031)

Body A_p : body projected frontal area; Total A_p : Total projected frontal area; UP: Upright position; TAP: Traditional Aerodynamic Position. No significant difference was observed between the method of weighing photographs and the new method, and between the new method and the digitizing method ($p < 0.05$)

tubes of the frame = 0.0318 m, no water bottle, equipped with front wheel (Mavic X 317 Disc) and rear wheel (DT Swiss H 450). All subjects wore a helmet (Air-8 Helmet, Specialized) and the same classical racing clothing during all trials. The hands were placed on the handlebars with the elbow flexed at 90°. Measurements of Total A_p were determined from digital photographic images taken outdoors using a digital camera with a resolution of 7.1 megapixels (Nikon Coolpix S500). The Total A_p was determined using the new method with a known distance calibration (the handlebar's width = 0.582 m). The mechanical power output and the velocity were recorded with a powermeter (PowerTap, CycleOps, USA). We assumed that R_T in these conditions was constituted by R_D and R_R . Based on Eq. 1, R_T was determined by the measurement of the mechanical power output of the cyclist, P (W) at constant v in each road trial as follows:

$$R_T = \frac{P}{v} \quad (3)$$

According to Eq. 3:

$$R_T = 0.5\rho C_D A_p v^2 + R_R \quad (4)$$

With the 2 constants a and b :

$$a = 0.5\rho C_D A_p \quad (5)$$

$$b = R_R \quad (6)$$

$$R_T = av^2 + b \quad (7)$$

With a linear regression analysis, it was possible to determine the $C_D A_p$ value for the position according to Eq. 5 ($C_D A_p = a/0.5\rho$) from the slope a of Eq. 7. We assumed that the effect of air humidity was negligible [6, 9, 15] in the experimental conditions of this study, $\rho = 1.210 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Statistical analyses

The data of the Total A_p and Body A_p were checked for heteroscedasticity by calculating the heteroscedasticity correlation between 1) the absolute differences between the new method and the method of weighing photographs, and the mean Total A_p and 2) between the absolute differences between the new method and the digitizing method and the mean Body A_p , as described by Atkinson and Nevill [2]. Although these analyses showed that heteroscedasticity was not present, the data were logarithmically transformed according to the recommendations by Nevill [25] and Nevill and Atkinson [24]. The 95% limits of agreement of the Body A_p differences between the new method and the method of weighing photographs and the 95% limits of

agreement of the Total A_p differences between the new method and the digitizing method were defined using the method of Bland and Altman [4]. The Total A_p and Body A_p differences were drawn in relation to the mean values and 95% of the differences were expected to lie between the two "limits of agreement" which were calculated as mean difference ± 1.96 standard deviation (SD) of the differences, expressed as bias $\pm$ random error according to Atkinson and Nevill [2]. The 95% confidence interval (95%CI) for the bias were also calculated.

The measure of Body A_p in the two positions ($n = 18$) using the new method was also compared to the method of weighing photographs with a paired t -test, and similarly the measure of Total A_p in the two positions ($n = 18$) using the new method was compared to the digitizing method with a paired t -test.

A Bravais-Pearson correlation coefficient was calculated to determine the significance of the relationships between the methods. Further, the reliability of the new method and of the method of weighing photographs was assessed from the coefficient of variation (CV) on the 30 measurements of the Body A_p of one subject in TAP. In the same session, both methods were tested 30 times with the same photograph. CV was calculated as the standard deviation to mean ratio, multiplied by 100. For the digitizing method, the CV was not calculated because with the employed technique (i.e. clicking with the "Magic Wand" tool on the darkened zone), it would have exactly the same result on the 30 measurements. The level of significance was set at $p < 0.05$. Data were presented as mean values $\pm$ SD.

Results

Mean values for Body A_p and Total A_p for each of the three methods and for each of the two positions evaluated are reported in **Table 1**. Mean values of Body A_p for UP and TAP using the new method were $0.430 (\pm 0.031) \text{ m}^2$ and $0.338 (\pm 0.029) \text{ m}^2$, respectively, and $0.432 (\pm 0.030) \text{ m}^2$ and $0.341 (\pm 0.029) \text{ m}^2$, respectively, using the method of weighing photographs. Mean values of Total A_p for UP and TAP using the new method were $0.565 (\pm 0.037) \text{ m}^2$ and $0.450 (\pm 0.040) \text{ m}^2$, respectively, and $0.533 (\pm 0.031) \text{ m}^2$ and $0.426 (\pm 0.031) \text{ m}^2$, respectively, using the digitizing method.

No significant difference was observed between the new method and the method of weighing photographs for the measurement of Body A_p in UP ($p = 0.43$) or TAP ($p = 0.14$) and between the new method and the digitizing method for the measurement of Total A_p in UP ($p = 0.12$) or TAP ($p = 0.31$).

The correlation between the new method and the method of weighing photographs ($y = 1.0087x - 0.006$), and between the new method and the digitizing method ($y = 0.9444x + 0.0085$) were significant and positive ($r = 0.99$, $p < 0.05$). **Fig. 5** shows a plot of the predicted new method values against their residuals. The ratio limits of agreement of the Body A_p differences between

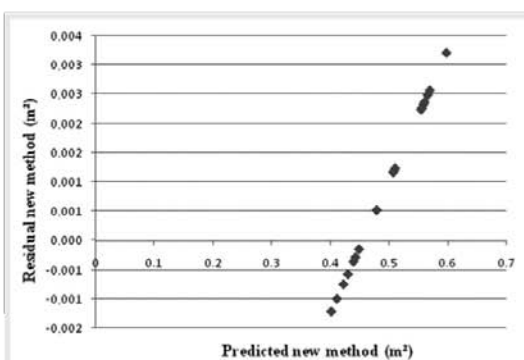


Fig. 5 Plot of predicted new method values against their residuals values.

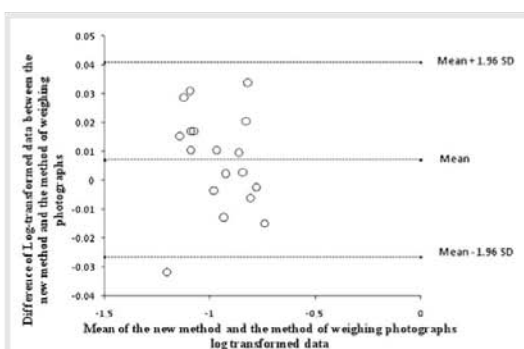


Fig. 6 Bland-Altman plot of difference between the Log-transformed data of the Body A_p measured using the new method and the Body A_p measured using the method of weighing photographs.

the new method and the method of weighing photographs were $1.0071 \times +1.0342$ (95% CI = 0.9737–1.0415) (● Fig. 6). The ratio limits of agreement of the Total A_p differences between the new method and the digitizing method were $1.0399 \times +1.0282$ (95% CI = 1.0114–1.0692) (● Fig. 7). For Body A_p , the mean bias (± 1.96 SD) between the new method and the method of weighing photographs was $0.0071 \pm 0.0336 \text{ m}^2$. For the Total A_p , the mean bias (± 1.96 SD) between the new method and the digitizing method was $0.0392 \pm 0.0278 \text{ m}^2$. The CV for the new method and the method of weighing photographs was 0.1 and 1.26%, respectively.

Concerning the determination of the $C_D A_p$ in the actual condition, the mean values ($\pm$ SD) of the measured Total A_p with the new method was $0.469 (\pm 0.024) \text{ m}^2$. Using the method of linear regression, we determined the mean value ($\pm$ SD) of the $C_D A_p$ to be $0.361 (\pm 0.021) \text{ m}^2$. Thus the mean value ($\pm$ SD) of the C_D was calculated to be equal to $0.771 (\pm 0.054)$.

Discussion

The present study is the first to employ the new method for evaluating the frontal area of cyclists in the two fundamental positions utilized during actual cycling conditions.

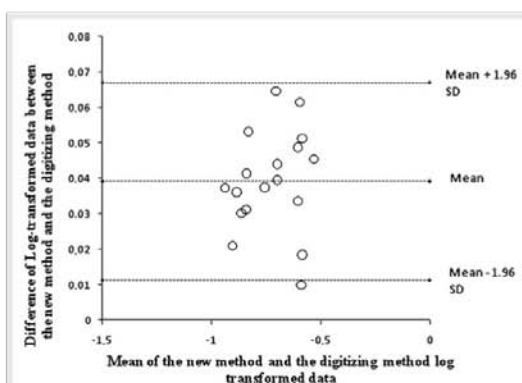


Fig. 7 Bland-Altman plot of difference between the Log-transformed data of the Total A_p measured using the new method and Total A_p measured using the digitizing method.

The Bland and Altman analysis [4] indicated that the ratio limits of agreement of the Body A_p differences between the new method and the method of weighing photographs and of the Total A_p differences between the new method and the digitizing method were small: $1.0071 \times +1.0342$ (95% CI = 0.9737–1.0415) and $1.0399 \times +1.0282$ (95% CI = 1.0114–1.0692) respectively. For Body A_p , the mean bias (± 1.96 SD) between the new method and the method of weighing photographs was $0.0071 \pm 0.0336 \text{ m}^2$. For the Total A_p , the mean bias (± 1.96 SD) between the new method and the digitizing method was $0.0392 \pm 0.0278 \text{ m}^2$. In addition the CV for the new method and the method of weighing photographs was very low (0.1 and 1.26%, respectively). These results suggest that the new method is a valid and reliable method for determining the projected frontal area of a performer in various athletic events.

The two test positions in the present study correspond to two of the four positions studied by Heil [17] with the digitizing method. Anthropometric characteristics of the current subjects were similar to those in the Heil study [17], further indicating the potential for inference of our data to the larger population of racing cyclists. For UP, the mean measurements of projected frontal areas of our subjects with the new method were comparable to those reported by Heil [17] for Body A_p ($0.430 \pm 0.031 \text{ m}^2$ vs. $0.401 \pm 0.0089 \text{ m}^2$, respectively) and Total A_p ($0.533 \pm 0.031 \text{ m}^2$ vs. $0.525 \pm 0.0099 \text{ m}^2$, respectively). For TAP, the mean measurements of projected frontal areas of our subjects with the new method were comparable to those reported by Heil for Body A_p ($0.338 \pm 0.029 \text{ m}^2$ vs. $0.342 \pm 0.0077 \text{ m}^2$, respectively) and Total A_p ($0.426 \pm 0.031 \text{ m}^2$ vs. $0.460 \pm 0.0091 \text{ m}^2$, respectively). The compatibility of these two studies reinforces the potential of the new method for assessing frontal area.

The new method does not require a zone of calibration (m^2) placed near the cyclist. Instead, a scaling is done by the software (Pro/ENGINEER® Wildfire™ 2.0) which requires only knowing a vertical or horizontal distance (m), which can be easily measured on a bicycle (e.g. width of the handlebars, diameter of wheels). It is important to also note that the new method is quite fast and relatively user-friendly and can be done with any Computer Aided Design (CAD) software. Another advantage of this method is that the Total A_p and the Body A_p can be determined. With practice, the new method takes 2–3 min for one subject

and 2 measures (Body A_p and Total A_p). But this method requires a computer and a CAD software which is expensive. The digitizing method also needs a computer, but the software is free and easy to use. However it requires the investigator to correct the photographs (e.g. darken the measured zone, change the extension of the image file) before opening them in the software Scion Image, which takes time and practice. But this method is faster than the new method and the method of weighing photographs if the photographs are taken in appropriate conditions (e.g. with a light source behind the cyclist) [10]. However, using this method, the measure of Body A_p is not possible.

In contrast, the method of weighing photographs does not require a computer but it requires developing prints on photograph paper, precisely cutting around the outline of the subject and the calibration frame images, and weighing using a highly sensitive balance. All these operations takes at least 5–6 min for just one measurement of Body A_p . But the method of weighing photographs does not need a computer and a specified software, and if the photographs are printed in bigger dimensions than usual, it is possible and easier to measure Body A_p and Total A_p . To be sure that colour did not influence the mass of photographs in the method of weighing photographs, we weighed five photographs with 5 different colours (4.682–4.720 g). The density was between 216.86 and 218.62 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$. In comparison, the density for the photographs used in the method of weighing photographs was 250 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ for the calibration area and 250.98 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ for the represented zone of Body A_p . This difference can be explained by the different paper used. We can conclude that colour did not influence the results in the method of weighing photographs in our study. But the results of this technique must be interpreted carefully, because all publications using the method of weighing photographs did not use the same quality of paper, thus the difference in the value of Total A_p can be explained by a technique detail.

The purpose of quantifying Total A_p is to permit more efficient use of existing mathematical models to estimate performance. Total A_p is proportional to the body mass (m_b) and body height (h_b) of the subject [17]. The greater the m_b and h_b , the higher the Total A_p , demonstrating the importance of aerodynamic resistance. Heil [18] assumed that C_D was a function of m_b , and that C_D tended to decrease with an increase in m_b :

$$C_D = 4.45 \times m_b^{-0.45} \quad (8)$$

But C_D also depends on the cyclist's position on the bicycle and the aerodynamic equipment (bicycle, helmet, etc.). We can assume that a higher value of m_b would mean a greater skin surface and a higher Total A_p , since Total A_p is considered to be a constant fraction of the total body surface area [9, 11, 28]. Olds et al. [27] estimated Total A_p to be 18.5% of the total body surface area with the method of weighing photographs when the rider was in the road time-trial position. Anton et al. [1] used this value to evaluate Total A_p and to show that the flat time trial performance was related to absolute maximal workload and anthropometric variables. However, we can assume that changes in the design of the bicycle between 1995 and 2007 would suggest that the estimates of Total A_p as a proportion of total body surface area need to be reconsidered. A greater precision of measuring Total A_p may allow a better estimate of C_D and the $C_D A_p$ product to refine our determination of aerodynamic drag (R_D). This would enhance wind tunnel testing and bring the mathematical model closer to actual road racing conditions.

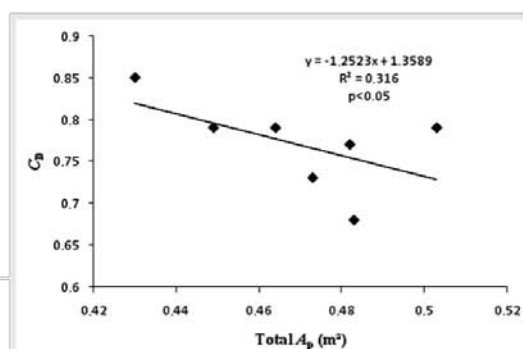


Fig. 8 Evolution of the coefficient of drag (C_D) as a function of the total projected frontal area (Total A_p (m^2)) for cyclists performing a mountain bike exercise.

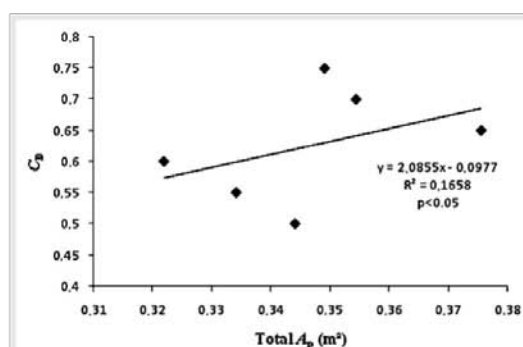


Fig. 9 Evolution of the coefficient of drag (C_D) as a function of the total projected frontal area (Total A_p (m^2)) for cyclists in one-hour cycling record (Padilla et al.) [24].

Indeed, Gonzalez-Haro et al. [13] reported that out of nine theoretical models for estimating the mechanical power output in cycling, only two were correlated with a powermeter (SRM), and only two others were the best at estimating peak power output and $\text{VO}_{2\text{max}}$ in the velodrome. Total A_p can be easily determined in many different positions which then could be tested in actual conditions with a powermeter to obtain the $C_D A_p$.

To provide an application of the new method in actual condition, measurements of $C_D A_p$ were performed on seven mountain bike cyclists for one position using the data obtained with a powermeter. The mean value ($\pm$ SD) was 0.469 ($\pm$ 0.024) m^2 for the Total A_p and 0.771 ($\pm$ 0.054) for the C_D . The values of C_D are comparable to the values reported by Padilla et al. [28]. In comparison to their data, our values showed a non-significant negative correlation between C_D and A_p (○ Fig. 8) whereas the values reported by Padilla et al. [28] showed a non-significant positive correlation (○ Fig. 9) but their publication reported a one-hour cycling record, thus a different position and bike. Also in Padilla et al.'s study [28] the C_D values were estimated from values of the literature for different riding positions and equipment, only two were calculated from measurement in wind tunnel. These results suggest that an optimal Total A_p should be assessed in order to optimize the C_D and therefore the $C_D A_p$.

These methods (the new method, the digitizing method, and the method of weighing photographs) are useful and not expensive to test several positions and postures of the cyclist in order to minimize Total A_p . For high-level athletes, these methods can be useful in order to prepare tests in the actual condition with a powermeter or in a wind tunnel and minimize the cost and the time spent in a laboratory. Or it could be useful in a Time-Trial race to observe if the fatigue could affect the Total A_p and if the cyclists can conserve the efficiency of the posture during the time of the race.

A limit of these three methods is that the projected frontal area can only provide information in one plane (2D), therefore it cannot assess the complex shape and the aerodynamic of the entire body. This could be done in a further study using the 3D Computational Fluid Dynamics Method [22].

Conclusion



The main result of our study indicates that the new method is a valid and reliable technique for determining the frontal area of the cyclist and of the equipment utilized in laboratory and in actual condition. We have shown that this method is effective in determining Body A_p and Total A_p as well as other existing techniques (i.e., the digitizing method and the method of weighing photographs), especially for use in actual conditions in the field in order to assess training or races. Each method can determine Body A_p and/or Total A_p in a different way, with more or less time. The non-significant difference between the new method and the method of weighing photographs and between the new method and the digitizing method, and the excellent agreement between them offer strong support for use of the new method in various sports where resistance offered by the frontal area of the subject is a major concern. Using these techniques, coupled with a powermeter or with the deceleration method, trainers or scientists can evaluate aerodynamic parameters easily and inexpensively.

In a further study, it would be very interesting to perform the same measurements (C_D and A_p from power output and the new method data) on a sample of road cyclists with road bicycles and drop handlebars or on a sample of track cyclists (e.g. pursuit or the one-hour cycling record).

Acknowledgements



We are grateful to Professor Jerry L. Mayhew for his advice. The cooperation of the subjects is greatly appreciated.

References

- Anton MM, Izquierdo M, Ianez J, Asiain X, Mendiguchia J, Gorostiaga EM. Flat and uphill climb time trial performance prediction in elite amateur cyclists. *Int J Sport Med* 2007; 28: 306–313
- Atkinson G, Nevill AM. Statistical methods for assessing measurement error reliability in variables relevant to sports medicine. *Sports Med* 1998; 26: 217–238
- Bertucci W, Duc S, Villerius V, Pernin JN, Grappe F. Validity and reliability of the Power Tap mobile cycling powermeter when compared with the SRM device. *Int J Sports Med* 2005; 26: 868–873
- Bland JM, Altman DG. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *Lancet* 1986; 1: 307–310
- Candau R, Grappe F, Ménard M, Barbier B, Millet GP, Hoffman M, Belli AR, Rouillon JD. Simplified deceleration method for assessment of resistive forces in cycling. *Med Sci Sports Exerc* 1999; 31: 1441–1447
- Capelli C, Rosa G, Butti F, Ferretti G, Veicsteinas A, di Prampero PE. Energy cost and efficiency of riding aerodynamic bicycles. *Eur J Appl Physiol* 1993; 67: 144–149
- Davies CTM. Effect of air resistance on the metabolic cost and performance in cycling. *Eur J Appl Physiol* 1980; 45: 245–254
- di Prampero PE, Cortilli G, Mognoni P, Saibene. Equation of motion of a cyclist. *J Appl Physiol* 1979; 47: 201–206
- di Prampero PE. Cycling on Earth, in space, on the Moon. *Eur J Appl Physiol* 2000; 82: 345–360
- Dorel S, Hautier CA, Rambaud O, Rouffet D, Praagh E Van, Lacour JR, Bourdin M. Torque and power-velocity relationships in cycling: Relevance to track sprint performance in world-class cyclists. *Int J Sports Med* 2005; 26: 739–746
- Du Bois D, Du Bois EF. Clinical calorimetry: a formula to estimate the approximative surface area if height and weight be known. *Arch Intern Med* 1916; 17: 863–871
- Garcia-Lopez J, Rodriguez-Marroyo JA, Juneau C-E, Peleteiro J, Cordova Martinez A, Villa JG. Reference values and improvement of aerodynamic drag in professional cyclists. *J Sports Sci* 2008; 26: 277–286
- Gonzalez-Haro C, Galilea Ballarini PA, Soria M, Drobnic F, Escanero JF. Comparison of nine theoretical models for estimating the mechanical power output in cycling. *Br J Sports Med* 2007; 41: 506–509
- Gonzalez-Haro C, Galilea PA, Escanero JF. Comparison of different theoretical models estimating peak power output and maximal oxygen uptake in trained and elite triathletes and endurance cyclists in the velodrome. *J Sports Sci* 2008; 26: 591–601
- Grappe F, Candau R, Belli A, Rouillon JD. Aerodynamic drag in field cycling with special reference to the Obree's position. *Ergonomics* 1997; 40: 1299–1311
- Heil DP. Body mass scaling of frontal area in competitive cyclists not using aero-handlebars. *Eur J Appl Physiol* 2002; 87: 520–528
- Heil DP. Body mass scaling of projected frontal area in competitive cyclists. *Eur J Appl Physiol* 2001; 85: 358–366
- Heil DP. Body size as a determinant of the 1-h cycling record at sea level and altitude. *Eur J Appl Physiol* 2005; 93: 547–554
- Jeukendrup AE, Martin J. Improving cycling performance. How should we spend our time and money? *Sports Med* 2001; 31: 559–569
- Martin JC, Gardner AS, Barras M, Martin DT. Modeling sprint cycling using field-derived parameters and forward integration. *Med Sci Sports Exerc* 2006; 38: 592–597
- Martin JC, Milliken DL, Cobb JE, MacFadden KL, Coggan AR. Validation of a mathematical model for road cycling power. *J Appl Biomech* 1998; 14: 245–259
- Mertins R, Elsholz E, Barakat S, Colak B. 3D viscous flow analysis on wing-body-aileron-spoiler configurations. *Aerospace Science and Technology* 2005; 9: 476–484
- Millet GP, Candau R. Facteurs mécaniques du coût énergétique dans trois locomotions humaines: Mechanical factors of the energy cost in three human locomotions. *Sci Sports* 2002; 17: 166–176
- Nevill AM, Atkinson G. Assessing agreement between measurements recorded on a ration scale in sports medicine and sports science. *Br J Sports Med* 1997; 31: 314–318
- Nevill AM. Why the analysis of performance variables recored on a ration scale will invariably benefit from a log transformation. *J Sports Sci* 1997; 15: 457–458
- Olds TS, Norton KI, Craig NP. Mathematical model of cycling performance. *J Appl Physiol* 1993; 75: 730–737
- Olds TS, Norton KI, Lowe ELA, Olive S, Reay F, Ly S. Modeling road-cycling performance. *J Appl Physiol* 1995; 78: 1596–1611
- Padilla S, Mujika I, Angulo F, Goiriena JJ. Scientific approach to the 1-h cycling world record: a case study. *J Appl Physiol* 2000; 89: 1522–1527
- Swain DP. Influence of body size on oxygen consumption during bicycling. *J Appl Physiol* 1987; 62: 668–672

XII. ANNEXE B

2^{ème} Journée Gilles Cometti – La préparation physique : Du laboratoire au terrain
19-20 Novembre 2010, Dijon, France

Déterminants musculaires de la performance lors d'exercices à intensité maximale :

Application en BMX

P. Debraux*, A.V. Manolova, W. Bertucci

LACM-DTI EA 4302 LRC CEA 05354, UFR STAPS Reims Champagne-Ardenne

*pierre.debraux@power2.fr

Introduction

Discipline olympique depuis les Jeux de Pékin 2008, le BMX se pratique sur une piste spécifique parcourue en 30-40s. Bertucci et al. [2007] ont montré que la phase de départ apparaît décisive dans le classement final et que la performance chronométrique lors de la première ligne droite est significativement corrélée à la puissance mécanique produite lors de tests de force-vitesse. Le but de cette étude est d'identifier les déterminants de la performance en étudiant les corrélations entre des tests sur cyclo-ergomètre et un exercice de ½ squat concentrique chez des pilotes de BMX.

Méthode

Dix pilotes de BMX masculins de niveau régional à national ont participé à cette étude. Pour chaque sujet, un profil musculaire inertiel [Jidovtseff et al., 2009] avec incrémentation de la charge en ½ squat concentrique a été réalisé à l'aide d'un accéléromètre (Myotest SA, Suisse) et des tests de force-vitesse ($0,4$ et $0,8 \text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}$) et de Wingate ($0,8 \text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}$) ont été réalisés sur cyclo-ergomètre à l'aide d'un wattmètre (PowerTap, CycleOps, Etats-Unis). Pour l'analyse des données, une matrice de corrélation Bravais-Pearson a été utilisée entre les tests sur cyclo-ergomètre et le ½ squat concentrique.

Résultats

La matrice de corrélation montre des corrélations significatives ($p < 0,05$) entre la puissance maximale produite lors du test de force-vitesse et la force maximale théorique développée en ½ squat concentrique ($r = 0,65$) et entre la puissance moyenne produite lors du test de Wingate et la force maximale théorique développée en ½ squat concentrique ($r = 0,64$).

Discussion et conclusion

Ces corrélations montrent que plus la force maximale théorique développée lors d'une phase concentrique de ½ Squat est grande et plus les puissances maximales et moyennes produites, respectivement, lors des tests de force-vitesse et de Wingate seront importantes. Lors de ces tests sur cyclo-ergomètres, les départs sont réalisés à l'arrêt. Pour vaincre l'inertie, les pilotes doivent développer une force plus importante lors des premiers coups de pédales. Un entraînement régulier des membres inférieurs en musculation, avec pour objectif de développer la force maximale, pourrait permettre d'améliorer la capacité à appliquer une force plus importante dès les premiers coups de pédale. L'utilisation des profils musculaires inertiels permettrait de personnaliser la charge à l'athlète. Ce travail pourrait conduire à une optimisation des départs en compétition. Les effets d'un tel programme pourront par la suite être quantifiés sur le terrain à l'aide d'une bicyclette instrumentée de pédales dynamométriques.

Références

Bertucci W, Hourde C, Manolova A, Vettoretti F. Facteurs mécaniques de la performance lors de la phase d'accélération en BMX chez des pilotes entraînés. *Sci Sports* 22: 179-181, 2007.
Jidovtseff B, Quièvre J, Hanon C, Crielaard J-M. Les profils musculaires inertiels permettent une définition plus précise des charges d'entraînement. *Sci Sports* 24: 91-96, 2009.

XIII. ANNEXE C



SEMINAIRE DES ENTRAINEURS ET DES CADRES TECHNIQUES DU CYCLISME
13 - 14 Novembre 2009, CREPS de Bourges, FRANCE

RÉSISTANCES A L'AVANCEMENT EN CYCLISME THEORIE ET APPLICATIONS

Pierre DEBRAUX[✉], William BERTUCCI

UFR STAPS, LACM – DTI (EA 4302 LRC CEA 0534), Université de Reims Champagne - Ardenne

Email : pierre.debraux@power2.fr Tél. : 06 08 53 75 72

Site web : www.power2.fr

INDEX

Introduction.....	1
Résistance due à la gravité.....	2
Résistance de roulement.....	2
Résistance aérodynamique.....	2
Méthode d'évaluation de R_A	3
Évaluation d' $A_p C_D$	3
1. Soufflerie.....	3
2. Méthode par régression linéaire.....	3
3. Méthode de remorquage.....	4
4. Méthode de décélération.....	4
Évaluation d' A_p	5
1. Méthode de pesée des photographies.....	5
2. Planimétrie.....	5
3. Méthode de digitalisation.....	5
4. Méthode basée sur la C.A.O.....	5
Conclusion.....	6
Références.....	6

INTRODUCTION

En cyclisme, la vitesse de déplacement du système cycliste - bicyclette (v , m·s⁻¹) est le paramètre fondamental de la performance. Elle est le ratio de la puissance mécanique produite par le cycliste (P , Watts) sur les résistances totales à l'avancement (R_T , N) :

$$v = \frac{P}{R_T} \quad (1)$$

Plus la vitesse de déplacement sera élevée plus les forces opposées à l'avancement seront importantes. Pour une même production de puissance mécanique, il paraît alors important de minimiser R_T .

Lors de son déplacement, le cycliste est confronté à 3 résistances : la résistance de roulement (R_R), la traînée aérodynamique (R_A),

et la résistance due à la gravité (R_G) lorsqu'il évolue sur un terrain à dénivelé positif.

En montée, R_G représente la résistance due au poids du système cycliste - bicyclette et au degré d'inclinaison de la pente. R_R représente le contact des roues avec le terrain. Et R_A caractérise la résistance de l'air sur le système cycliste - bicyclette en déplacement. R_T s'exprime donc ainsi :

$$R_T = R_G + R_R + R_A \quad (2)$$

La connaissance de ces trois forces est primordiale dans l'optimisation de la performance en cyclisme. Il est essentiel de comprendre les paramètres influençant chacune de ces forces.

L'objectif de cette intervention est de présenter les différentes forces qui s'opposent à l'avancement en cyclisme, ainsi que leur méthode d'évaluation.

RÉSISTANCE DUE À LA GRAVITÉ

Dans une montée, R_G est la résistance principale qui s'oppose à l'avancement. Elle est due à la gravité. C'est donc une force verticale orientée vers le bas.

Cette résistance est influencée par le poids du système cycliste – bicyclette ($\vec{P}$, N) et la pente (caractérisée par un angle d'inclinaison ou un pourcentage). Plus ces deux facteurs seront importants, plus R_G sera grande. R_G s'exprime de la façon suivante :

$$R_G = M \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (3)$$

Où M (kg) est la masse du système cycliste – bicyclette, g ($m \cdot s^{-2}$) est l'accélération gravitationnelle, et α ($^\circ$) est l'angle d'inclinaison de la pente.

RÉSISTANCE DE ROULEMENT

Pour des vitesses de déplacement faibles ($\sim 25 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$), R_R représente environ 30 % de R_T , contre 10% quand ces vitesses sont supérieures ou égales à $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. R_R est dépendante du contact bicyclette – sol et de la masse du système cycliste – bicyclette :

$$R_R = C_R \cdot M \cdot g \quad (4)$$

Où le C_R , le coefficient de roulement (sans unité), caractérise la magnitude de la déformation du pneu au contact de la route.

R_R est influencée par la pression de gonflage (P_R , kPa), le type de pneumatique, la nature du sol (enrobé, pavés, terre, herbe, etc.) et le poids du système cycliste – bicyclette.

Les valeurs de C_R peuvent varier entre 0.001 et 0.008. Grappe et al. [1999b] ont montré que 97 % des variations de C_R peuvent être expliquées en fonction de P_R selon l'équation :

$$C_R = 0.1071 \cdot P_R^{-0.477} \quad (5)$$

Plus la pression de gonflage est élevée, plus le C_R diminue. Pour P_R égal à 600 kPa et 1200 kPa, le C_R est égal à 0.0056 et 0.0036, respectivement. Cela représente une diminution de la vitesse de déplacement d'environ 1.5 %.

Sur une route en asphalte, le C_R peut être égale à environ 0.008 et sur une piste synthétique de vélodrome, il peut être égal à 0.003. Pour une même puissance développée, et une même R_A , sur piste synthétique, un cycliste gagnerait environ $1.58 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ comparé à la route en asphalte.

RÉSISTANCE AÉRODYNAMIQUE

La résistance aérodynamique est composée de deux forces : la portance et la traînée aérodynamiques.

Lors du déplacement du système cycliste – bicyclette, on considère que la portance (qui est une force qui contribue à « attirer » le corps vers le haut) est quasiment nulle, et que seule la traînée aérodynamique (R_A) s'oppose à l'avancement.

Sur terrain plat, à des vitesses de déplacement supérieures à $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, la traînée aérodynamique est la principale résistance qui s'oppose à l'avancement. Environ 90 % de la puissance mécanique produite par le cycliste est dépensée pour lutter contre R_A [Candau et al. 1999 ; di Prampero 2000 ; Martin et al. 2006 ; Millet et Candau 2002].

R_A est directement proportionnelle à l'aire frontale projetée du cycliste et de son équipement (A_p , m^2), au coefficient de traînée (C_D , sans unité), à la masse volumique de l'air (ρ , $kg \cdot m^{-3}$) et au carré de la vitesse d'écoulement du fluide sur le corps du cycliste (v_f , $m \cdot s^{-1}$) [Pugh 1974 ; Heil 2001, 2002 ; Millet et Candau 2002] :

$$R_A = 0.5 \cdot \rho \cdot A_p \cdot C_D \cdot v_f^2 \quad (6)$$

Pour une vitesse donnée, R_A est dépendante de la masse volumique de l'air et de l'aire frontale effective ($A_p C_D$, m^2).

La masse volumique de l'air est directement proportionnelle à la pression barométrique du fluide (P_B , mmHg) et inversement proportionnelle à la température absolue du fluide (T , K) [di Prampero 1986] :

$$\rho = \rho_0 \cdot \left(\frac{P_B}{760} \right) \cdot \left(\frac{273}{T} \right) \quad (7)$$

Où ρ_0 est la masse volumique de l'air pour $P_B = 760 \text{ mmHg}$ et $T = 273 \text{ K}$, et donc, $\rho_0 =$

$1.293 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. La masse volumique de l'air est également influencée par l'humidité de l'air, mais son effet peut être négligé. De plus, pour une température donnée, PB diminue avec l'altitude. Pour $T = 273 \text{ K}$, la diminution de PB avec l'altitude (Alt , km) peut être décrite par la relation [di Prampero 2000] :

$$PB = 760 \cdot e^{-0.124 \cdot Alt} \quad (8)$$

Pour des paramètres identiques, l'augmentation de l'altitude diminue R_A d'environ 24% de 0 à 2250 m (Mexico).

Pour une vitesse donnée, le paramètre le plus important est $A_p C_D$. En évaluant $A_p C_D$, il est possible de quantifier le profil aérodynamique d'un athlète et de déterminer la position optimale sur la bicyclette. Ceci permet également de comprendre l'évolution d' $A_p C_D$ en fonction de la vitesse, de la position du cycliste et de l'équipement utilisé.

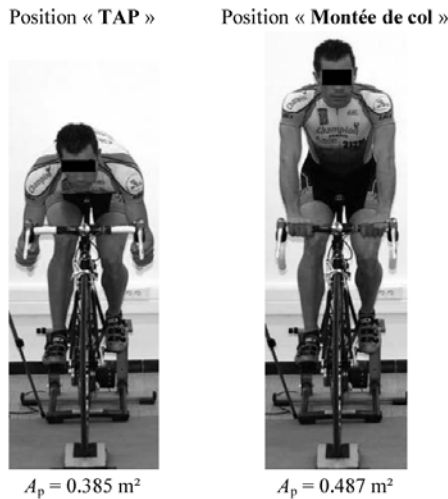


Figure 1. Exemple d'un cycliste dans deux positions différentes : « TAP » (Position aérodynamique traditionnelle) et « Montée de col ».

Pour un même cycliste, le simple changement de position peut permettre une nette amélioration de la vitesse de déplacement. Deux positions différentes sont présentées en Figure 1.

En position « TAP », l' A_p du cycliste est égale à 0.385 m^2 , et en position « Montée de col », l' A_p est égale à 0.487 m^2 .

Par exemple, pour un C_D de 0.55 et une puissance mécanique produite de 400 W, le cycliste aurait une vitesse de déplacement de $51.5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ en position « TAP ». Alors qu'en position « Montée de col », sa vitesse ne serait que de $47.6 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Soit $3.9 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ de différence.

MÉTHODE D'ÉVALUATION DE R_A

En connaissant R_A , il est possible de déterminer $A_p C_D$, et donc d'appréhender avec plus de précisions le profil aérodynamique d'un cycliste. Pour cela, différentes méthodes sont utilisées pour déterminer R_A en conditions de laboratoire ou sur le terrain [Garzia-Lopez et al. 2008].

ÉVALUATION D' $A_p C_D$

1. SOUFFLERIE

La soufflerie est la méthode de référence dans l'évaluation de l'aérodynamisme et d' $A_p C_D$ [Hoerner 1965].

Un vent est artificiellement généré sur le système cycliste – bicyclette, et la détermination de R_A est basé sur la quantification des forces de réaction au sol à l'aide d'une plateforme de force où le vélo repose [Davies 1980 ; Martin et al. 1998 ; Garzia-Lopez et al. 2008].

R_A est une force parallèle et de même direction que le déplacement du fluide. Grâce à la plateforme de force, on obtient R_A , on peut donc déterminer $A_p C_D$ de la manière suivante :

$$A_p C_D = \frac{R_A}{0.5 \cdot \rho \cdot v_f^2} \quad (9)$$

Cette méthode, bien que très coûteuse, est très sensible, et permet une estimation de $A_p C_D$ assez précise. Néanmoins les conditions de mesures en soufflerie ne sont pas forcément représentatives des conditions réelles.

2. MÉTHODE PAR RÉGRESSION LINÉAIRE

Cette méthode consiste à mesurer la puissance mécanique produite par le cycliste et la vitesse de déplacement correspondante, sur différents essais, à différentes vitesses [Grappe et al. 1997 ; Debraux et al. 2009].

Sur terrain plat, R_T est composée principalement de R_A et R_R :

$$R_T = R_A + R_R \quad (10)$$

$$R_T = 0.5 \cdot \rho \cdot A_p \cdot C_D \cdot v_f^2 + C_R \cdot M \cdot g \quad (11)$$

On peut donc exprimer les résistances totales sous la forme de l'équation d'une droite $f(x) = ax + b$, où a et b sont 2 constantes :

$$a = 0.5 \cdot \rho \cdot A_p \cdot C_D \quad (12)$$

$$b = C_R \cdot M \cdot g \quad (13)$$

$$R_T = av_f^2 + b \quad (14)$$

D'après l'équation (1), on sait que R_T peut s'exprimer sous la forme :

$$R_T = \frac{P}{v} \quad (15)$$

En connaissant la vitesse et la puissance développée à l'aide d'appareils tels que le SRM et le Power Tap, on peut tracer la relation entre R_T et v_f^2 , pour ainsi obtenir la pente de cette courbe : a (Eq. 11). Par transformation on obtient la valeur du coefficient de traînée :

$$A_p C_D = \frac{a}{0.5 \cdot \rho} \quad (16)$$

En prenant l'exemple de la Figure 2 et selon l'Equation 13 et 16, pour un système cycliste – bicyclette dont la masse est égale à 75 kg et pour une masse volumique de l'air de $1.204 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$:

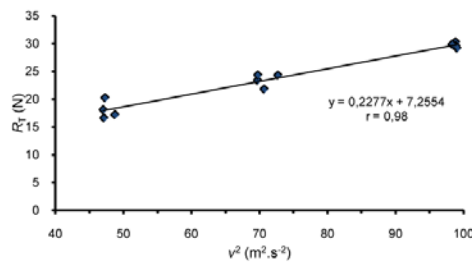


Figure 2. Evolution typique de la résistance totale à l'avancement (R_T , N) en fonction de la vitesse de déplacement au carré (v^2 , $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$). Où la pente $a = 0.2277$ et $b = 7.2554$.

$$C_R = \frac{7.2554}{75 \times 9.80665} = 0.0098$$

$$A_p C_D = \frac{0.2277}{0.5 \times 1.204} = 0.378 \text{ m}^2$$

Cette méthode est très fiable et peut-être utilisée en conditions réelles pour tester différentes positions du cycliste et différents équipements. Les ergomètres comme le SRM permettent une grande précision, grâce à leur fréquence d'échantillonnage élevée.

3. MÉTHODE DE REMORQUAGE

Avec cette méthode [di Prampero et al. 1979 ; Capelli et al. 1993], le système cycliste – bicyclette dans une position fixée au préalable est remorquée par un véhicule motorisé au moyen d'un câble sur terrain plat et à vitesse constante.

R_T est déterminé à l'aide de la résistance de traction mesurée grâce à un dynamomètre monté en série avec le câble de traction. R_T est évaluée sur plusieurs essais à différentes vitesses, pour obtenir une relation R_T en fonction de la vitesse de déplacement.

Grâce à cela, la même méthode que pour celle de la régression linéaire est utilisée pour déterminer $A_p C_D$.

Les turbulences aérodynamiques provoquées par le véhicule de remorquage et l'altération des conditions atmosphériques peuvent être affectées les résultats de cette méthode [Grappe et al. 1999a ; Garzia-Lopez et al. 2008].

4. MÉTHODE DE DÉCÉLÉRATION

Cette méthode [Candau et al. 1999] est basée sur la seconde loi de Newton ($\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a}$), où les résistances totales à l'avancement ($\vec{F}$) sont le produit de la masse (m) et de l'accélération ($\vec{a}$).

Sur terrain plat, dans une position déterminée, le cycliste doit atteindre une vitesse fixée au préalable puis arrête de pédaler. Le cycliste ne change pas sa position sur la bicyclette et peut également pédaler sans transmettre de force à la roue arrière pour simuler les turbulences induites par le pédalage.

Le cycliste passe devant trois cellules, la distance entre les deux premières cellules est de 3 m et la distance entre la seconde et la troisième est de 20 m. Les temps de passages sont enregistrés.

R_T est déterminé, grâce à plusieurs essais (~ 20) à différentes vitesses, par itération avec un modèle mathématique décrivant la décélération de la trajectoire du système cycliste – bicyclette.

En comparaison à des tests en soufflerie, cette méthode permet d'obtenir des mesures d' $A_p C_D$ valides. Néanmoins, cette méthode nécessite de très nombreux essais.

Bien que $A_p C_D$ soit le principal paramètre dans l'évaluation de R_A , il est fortement dépendant de A_p . Pour un C_D constant, l'aérodynamisme du système cycliste – bicyclette est déterminé par A_p .

ÉVALUATION D' A_p

1. MÉTHODE DE PESÉE DES PHOTOGRAPHIES

Cette méthode très utilisée [Olds et al. 1995 ; Capelli et al. 1998 ; Padilla et al. 2000 ; Heil 2001 ; Debraux et al. 2009] consiste à prendre une photographie dans le plan frontal du cycliste et de sa bicyclette, ainsi que d'une zone d'étalonnage dont l'aire est connue et qui est placée à côté du cycliste à mi-distance entre ses épaules et sa hanche.

La photographie est développée, et les zones représentant le cycliste sans sa bicyclette et la zone d'étalonnage sont découpées.

Puis ces deux éléments sont pesés séparément à l'aide d'une balance à haute sensibilité (± 0.001 g).

L' A_p réelle en m^2 est alors calculée en multipliant l'aire de la zone d'étalonnage par le ratio de la masse de l'image du cycliste sur la masse de l'image de la zone d'étalonnage.

Cette méthode nécessite peu de matériels, mais elle ne peut être utilisée qu'en condition de laboratoires et uniquement pour mesurer l' A_p du corps du cycliste.

2. PLANIMÉTRIE

Cette méthode utilisée par Olds et Olive [1999] permet de déterminer l'aire frontale

projetée en traçant les contours sur une photographie d'un cycliste et de sa bicyclette à l'aide d'un planimètre polaire.

Une méthode par triangulation permet de calculer l'aire ainsi délimitée.

3. MÉTHODE DE DIGITALISATION

De même que la méthode de pesage des photographies, cette méthode requiert une zone d'étalonnage à placer à côté du cycliste lors de la prise de la photographie. Néanmoins, cette méthode est numérique, et donc il n'est pas nécessaire de développer et couper les photographies [Heil 2001 ; Dorel et al. 2005 ; Debraux et al. 2009].

Une fois les photographies préparées, elles sont transférées dans un logiciel de traitement d'images (Scion Image Release Alpha 4.0.3.0.2 for Windows, Scion Corporation, Frederick, Md., USA).

Les zones représentant le cycliste et sa bicyclette et la zone d'étalonnage sont sélectionnées, et le logiciel mesure le nombre de pixels qui composent chaque zone.

L' A_p réelle en m^2 est alors calculée en multipliant l'aire de la zone d'étalonnage par le ratio du nombre de pixels de la zone du cycliste et de la zone d'étalonnage.

Cette méthode nécessite un travail conséquent de l'image à analyser. Et elle ne permet pas librement de mesurer l'aire frontale projetée en condition réelle de course.

4. MÉTHODE BASÉE SUR LA C.A.O.

Cette méthode est basée sur l'utilisation d'un logiciel de conception assistée par ordinateur (C.A.O.) [Debraux et al. 2009].

Elle ne requiert pas de zone d'étalonnage à placer à côté du cycliste. Elle peut donc être utilisée en condition réelle de course. L'unique condition est de connaître une longueur verticale ou horizontale pour étalonner l'image.

Cette méthode présente une grande sensibilité, et a l'avantage d'être rapide. Néanmoins, elle nécessite l'utilisation d'un ordinateur et un logiciel informatique dont le coût peut être élevé.

CONCLUSION

Les différentes méthodes présentées restent toujours d'actualité et utilisées pour mettre au point des modèles mathématiques de la performance. Certaines sont plus pratiques que d'autres dans l'évaluation d' $A_p C_D$ sur le terrain.

La méthode par régression linéaire à l'aide d'un SRM couplée à la méthode basée sur la C.A.O. pour mesurer A_p semblerait être la solution la plus pratique pour évaluer $A_p C_D$.

L'évaluation et l'optimisation de l'aérodynamisme du cycliste doivent permettre un gain de performance. Néanmoins, il reste encore de nombreux paramètres à appréhender pour pouvoir comprendre l'aérodynamique du cycliste dans sa globalité.

RÉFÉRENCES

- [1] Candau R, Grappe F, Ménard M, et al. Simplified deceleration method for assessment of resistive forces in cycling. *Med Sci Sports Exerc* 1999; 31 (10): 1441-7.
- [2] Candau R, Grappe F, Ménard M, et al. Simplified deceleration method for assessment of resistive forces in cycling. *Med Sci Sports Exerc* 1999; 31 (10): 1441-7.
- [3] Capelli C, Rosa G, Butti F, et al. Energy cost and efficiency of riding aerodynamics bicycles. *Eur J Appl Physiol* 1993; 67: 144-9.
- [4] Capelli C, Schena F, Zamparo P et al. Energetics of best performances in track cycling. *Med Sci Sports Exerc* 1998; 30 (4): 614-24.
- [5] Davies CTM. Effect of air resistance on the metabolic cost and performance of cycling. *Eur J Appl Physiol* 1980; 45: 245-54.
- [6] Debraux P, Bertucci W, Manolova A, et al. New method to estimate the cycling frontal area. *Int J Sports Med* 2009; 30: 266-72.
- [7] di Prampero PE, Cortili G, Mognoni P, et al. Equation of motion of a cyclist. *J Appl Physiol* 1979; 47 (1): 201-6.
- [8] di Prampero PE. Cycling on Earth, in space and on the Moon. *Eur J Appl of Physiol* 2000; 82: 345-60.
- [9] di Prampero PE. The energy cost of human locomotion on land and in water. *Int J Sports Med* 1986; 7: 55-72.
- [10] Dorel S, Hautier CA, Rambaud O, et al. Torque and power-velocity relationships in cycling: Relevance to track sprint performance in world-class cyclists. *Int J Sports Med* 2005; 26: 739-46.
- [11] Garcia-Lopez J, Rodriguez-Marroyo JA, Juneau C-E, et al. Reference values and improvement of aerodynamic drag in professional cyclists. *J Sports Sci* 2008; 26: 277-86.
- [12] Grappe F, Candau R, Barbier B, et al. Influence of tyre pressure and vertical load on coefficient of rolling resistance and stimulated cycling performance. *Ergonomics* 1999a; 10: 1361-71.
- [13] Grappe F, Candau R, Barbier B, Hoffman M, Belli A, Rouillon JD. Influence of tyre pressure and vertical load on rolling coefficient and simulated cycling performance. *Ergonomics* 1999b; 10: 1361-71.
- [14] Grappe F, Candau R, Belli A, et al. Aerodynamic drag in field cycling with special reference to the Obree's position. *Ergonomics* 1997; 40 (12): 1299-1311.
- [15] Heil DP. Body mass scaling of frontal area in competitive cyclists not using aero-handlebars. *Eur J Appl Physiol* 2002; 87: 358-66.
- [16] Heil DP. Body mass scaling of projected frontal area in competitive cyclists. *Eur J Appl Physiol* 2001; 85: 520-8.
- [17] Hoerner SF. Résistance à l'avancement dans les fluides [in French]. Paris : Gauthier-Villars 1965.
- [18] Martin JC, Gardner AS, Barras M, et al. Modeling sprint cycling using field-derived parameters and forward integration. *Med Sci Sports Exerc* 2006; 38: 592-7.
- [19] Martin JC, Milliken DL, Cobb JE, et al. Validation of a mathematical model for road cycling power. *J Appl Biomech* 1998; 14: 245-59.
- [20] Millet GP, Candau R. Mechanical factors of the energy cost in three human locomotions. *Sci Sports* 2002; 17: 166-76.

- [21] Olds TS, Norton KI, Lowe ELA, et al. Modeling road-cycling performance. *J Appl Physiol* 1995; 78: 1596-1611.
- [22] Olds TS, Olive S. Methodological considerations in the determination of projected frontal area in cyclists. *J Sports Sci* 1999; 17: 335-45.
- [23] Padilla S, Mujika L, Angulo F. Scientific approach to the 1-h cycling world record: A case study. *J Appl Physiol* 2000; 89: 1522-7.
- [24] Pugh LGCE. The relation of oxygen intake and speed in competition cycling and comparative observations on the bicycle ergometer. *J Physiol* 1974; 241: 795 – 808.

XIV.ANNEXE D

Journée Nationale des Cadres Techniques de Cyclisme
18 Novembre 2006, Chateaufort Malabry.

Validation d'une méthode de mesure de l'aire frontale projetée de cyclistes

P. Debraux[✉], W. Bertucci

Laboratoire d'Analyses des Contraintes Mécaniques (L.A.C.M.) LRC CEA EA 3304, Université de Reims, France

INTRODUCTION

En cyclisme sur route, la performance, c'est-à-dire la vitesse (v , $m \cdot s^{-1}$) est le ratio de la puissance produite par le cycliste (P , Watts) par la résistance totale à l'avancement (R_t , N) :

$$v = \frac{P}{R_t} \quad (1)$$

Cette vitesse est grandement dépendante de la minimisation des forces opposées à l'avancement. Sur terrain plat, la résistance totale est composée principalement par 2 résistances, la résistance de traînée (R_x) et la résistance de friction (R_f).

R_x est directement proportionnelle à la surface frontale projetée du cycliste et de son équipement (A_f , m^2), au coefficient de forme (C_x , sans unité), à la masse volumique de l'air (ρ , $kg \cdot m^{-3}$) et au carré de la vitesse d'écoulement du fluide sur le corps du cycliste (v , $m \cdot s^{-1}$) (Heil 2001, 2002 ; Millet et Candau 2002 ; Pugh 1974) :

$$R_x = 0.5 \times \rho \times C_x \times A_f \times v^2 \quad (2)$$

R_f est dépendante en majeure partie des résistances de roulement (R_r) qui sont indépendantes de la vitesse, mais liées notamment à la masse cycliste + cycle (m , kg)

$$R_r = C_r \times m \times g \quad (3)$$

Où C_r représente le coefficient de roulement et g , l'accélération gravitationnelle ($m \cdot s^{-2}$), (Millet et Candau 2002). Les résistances totales sur terrain plat s'expriment donc de la manière suivante :

$$R_t = R_x + R_r \quad (4)$$

$$R_t = 0.5 \times \rho \times C_x \times A_f \times v^2 + C_r \times m \times g \quad (5)$$

On peut donc exprimer les résistances totales sous la forme de l'équation d'une droite $f(x) = ax + b$, où a et b sont 2 constantes :

$$a = 0.5 \times \rho \times C_x \times A_f \quad (6)$$

$$b = C_r \times m \times g \quad (7)$$

$$R_t = av^2 + b \quad (8)$$

D'après l'équation (1), on sait que R_t peut s'exprimer sous la forme :

$$R_t = \frac{P}{v} \quad (9)$$

En connaissant la vitesse et la puissance développée à l'aide d'appareils tels que le SRM et le Power Tap, on peut tracer la relation entre R_t et v^2 , pour ainsi obtenir la pente de cette courbe : a (6). Par transformation on obtient la valeur du coefficient de traînée :

$$C_x A_f = \frac{2a}{\rho} \quad (10)$$

Le coefficient de traînée est donc la valeur déterminante de l'aérodynamisme en cyclisme. Pour l'évaluer, il existe des méthodes plus ou moins précises (en laboratoire ou sur le terrain). Néanmoins ce coefficient est composé de 2 variables : C_x et A_f . Il est possible d'estimer l'aire frontale projetée seule afin de connaître C_x . Les méthodes les plus utilisées sont la méthode de pesage des photographies (Olds et al. 1995 ; Heil 2001, 2002) et la méthode de digitalisation (Heil 2001, 2002 ; Dorel et al. 2005).

Bien que la méthode de digitalisation soit plus récente que la méthode de pesage des photographies, elle comporte néanmoins certaines limites : les photographies ne sont pas prises sur le terrain, et elles nécessitent des zones d'étalonnage fixes.

[✉] Adresse e-mail : neo.trinity@wanadoo.fr
Tél. : 06 08 53 75 72

Le but de cette étude est de tester la validité et la reproductibilité d'une nouvelle méthode numérique de mesure des aires frontales projetées en utilisant le logiciel de CAO Pro/ENGINEER® Wildfire™ 2.0 (Pro/E), en la comparant à une méthode de référence déjà validée : la méthode de pesage des photographies.

METHODE

Des cyclistes ($n=9$) sont placés sur leur propre vélo avec leur équipement de compétition (à l'exception du casque) sur un home trainer. A 5m de la roue avant est placé un appareil photographique numérique. On place à côté des cyclistes et à mi-distance entre les épaules et le bassin une zone d'étalonnage dont l'aire est connue (0.110148m^2). Deux photographies sont prises dans le plan frontal. Elles correspondent à 2 positions différentes : une position dite « montée de col », les mains sont placées au centre de la potence, les bras tendus ; et une position dite « aérodynamique », les mains sont placées dans la partie basse du guidon, avec les avant-bras à l'horizontal.

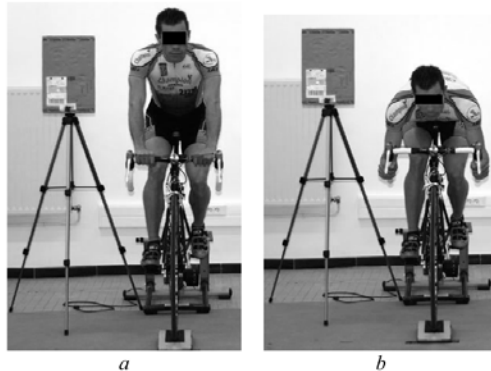


Figure 1 Exemple de photographies des 2 positions étudiées :a) « montée de col » ; b) « aérodynamique »

Les photographies numériques sont ouvertes dans Pro/E. Les photos sont mises à l'échelle 1:1 en connaissant une distance verticale ou horizontale sur le vélo ou le cycliste. On détoure pour chaque position à la fois le cycliste et son vélo (A_t), et le cycliste seul (A_c) à l'aide de courbes de Bézier. On obtient ainsi la valeur de l'aire frontale projetée totale (A_t) et corporelle (A_c).

On compare pour validation cette méthode à la méthode de pesage des photographies. Seules les A_c des 9 sujets dans les 2 positions sont comparées. Pour chaque sujet, 2 photographies, représentant les 2 positions testées des sujets et les zones de calibration, ont été développées ($10 \times 13 \text{ cm}$). A l'aide d'une paire de ciseaux, les

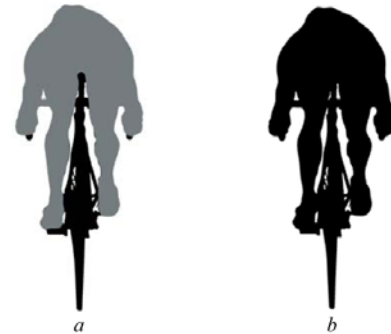


Figure 2 Exemple de détourage numérique : a) en gris l'aire frontale projetée corporelle (A_c) ; b) l'aire frontale projetée totale (A_t)

photos ont été soigneusement découpées pour garder 2 parties distinctes : 1) le cycliste (sans son vélo) 2) la zone de calibration. Ces parties sont pesées individuellement dans une balance Metler Toledo AB 204 ($\pm 0.001 \text{ gr}$ de sensibilité). L' A_c est calculée pour cette méthode en multipliant la surface de l'aire connue (0.110148 m^2) par le ratio de la masse de la photographie du cycliste divisé par la masse de la photographie de la zone de calibration.

Pour déterminer la reproductibilité des 2 méthodes de mesure de l' A_c (méthode de pesage et méthode numérique Pro/E), la même position d'un sujet sans son vélo (A_c) est détournée 30 fois sur Pro/E et la photo correspondante est développée 30 fois. Le processus de découpage et de pesage est répété le même nombre de fois. Nous déterminons alors le coefficient de variation (CV) pour les 2 méthodes, avec ET et m , respectivement, l'écart type et la moyenne de l'ensemble des données, calculé de la manière suivante :

$$CV = \left(\frac{ET}{m} \right) \times 100 \quad (11)$$

Après avoir testé la normalité des données grâce au test de Kolmogorov-Smirnov, les valeurs d' A_c

(n = 18) de la nouvelle méthode ont été comparées à la celles obtenues par la méthode de pesage, à l'aide du test T de Student en séries appariées. Le test de Bland & Altman (Altman and Bland 1983; Bland and Altman 1986; Grenier et al. 2000) a également été effectué. Le biais (moyenne des différences), la limite des concordances (biais $\pm$ 2 ET), ainsi que l'intervalle de confiance à 95 % du biais (IC_{95%}) ont été calculés entre les 2 méthodes. Le lien existant entre les 2 méthodes a été évalué par un calcul de coefficient de corrélation de Bravais – Pearson (r). Le seuil de significativité était fixé à p<0,05.

Application pratique

Pour démontrer l'intérêt de cette méthode, un cycliste réalise sur terrain plat sans vent des allers et des retours de 3 minutes chacun dans la position dite « aérodynamique ». Chaque aller-retour est réalisé à différentes vitesses. Les puissances correspondantes à chaque vitesse sont mesurées à l'aide d'un SRM. On mesure également grâce à la méthode précitée l' A_t de ce cycliste. La température de l'air est 21°C et la densité de l'air est égale à 1.248 kg·m⁻³. La masse vélo + cycliste est égale à 75 kg, et l'accélération gravitationnelle (g) vaut 9.81 m·s⁻². La méthodologie décrite dans l'introduction est utilisée pour déterminer le C_x .

RESULTATS

Concernant la reproductibilité de la méthode Pro/E et de la méthode de pesage, les coefficients de variation ont une valeur de 0.10% et de 1.26%, respectivement. Concernant la validité de la nouvelle méthode par rapport à la méthode de référence, le test T de Student nous indique qu'il n'existe aucune différence significative entre les 2 méthodes de mesure de l' A_c dans la position « Montée de col » (p = 0.43) ainsi que dans la position « Aérodynamique » (p = 0.14).

Concernant le test de Bland & Altman, le biais ($\hat{c}$) entre les 2 méthodes est de 0.003 m², les limites de concordance supérieure et inférieure du biais sont respectivement de 0.015 et - 0.010 m², et enfin les limites supérieure et inférieure de l'IC_{95%} sont respectivement de 0.006 et - 0.001 m². Le calcul du coefficient de corrélation de

Bravais – Pearson (r = 0.99, Es = 0.006 m²) indique que les 2 méthodes sont fortement corrélées. Les valeurs moyennes de l' A_c et de l' A_t pour chacune des 2 positions mesurées sont reportées dans le **tableau 1**.

Tableau 1 Valeurs moyennes des aires mesurées numériquement dans les 2 positions étudiées.

Position	Aire Corporelle (Ac) (m ²)	Aire Totale (At) (m ²)
« Montée de col »	0.430 $\pm$ 0.031	0.533 $\pm$ 0.031
« Aérodynamique »	0.338 $\pm$ 0.029	0.426 $\pm$ 0.031

Concernant l'application pratique démontrant l'intérêt de l' A_t dans la performance en cyclisme, la valeur de l' A_t du cycliste dans la position « Aérodynamique » est 0.385 m². Les vitesses, les puissances correspondantes et les résistances totales sont indiquées dans le tableau 2.

Tableau 2 Vitesses et Puissances correspondantes mesurées lors du test ; et Résistance totale calculée.

Vitesse (m.s ⁻¹)	Puissance (W)	Résistance Totale (N)
6.39	66.5	10.40
5.96	49	8.23
7.66	97.3	12.70
7.73	81	10.47
9.89	150.5	15.21
9.82	138.9	14.15
11.43	238.3	20.85
11.53	283.5	24.58

A partir des données du tableau 2, on établit la relation entre la résistance totale à l'avancement et la vitesse au carré (Figure 1).

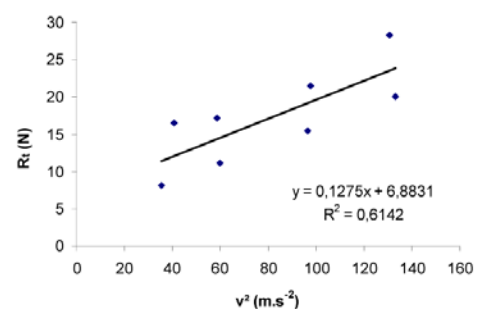


Figure 3 Evolution de la résistance totale à l'avancement (R_t , N) en fonction du carré de la vitesse du cycliste (v ,

m·s⁻¹).

A partir de l'équation de la droite de la figure 3 :

$$y = 0.1275 x + 6.8831 \quad (12)$$

On obtient donc un C_r (qui comprend la friction des pièces mécaniques du vélo entre elles) d'une valeur de 0,0093. On calcule le $C_x A_f$ d'après l'équation 10, et on obtient une valeur de 0.20 m². En connaissant la valeur d' A_f , on détermine C_x seul qui est égal à 0.52.

CONCLUSION

Les deux méthodes comparées sont corrélées fortement et positivement. La reproductibilité de la méthode Pro/E est excellente (0.1%). Il n'existe qu'un biais de 0.003 m² avec la méthode de pesage des photographies. Ces résultats suggèrent donc que la méthode numérique Pro/E est reproductible et valide pour mesurer l'aire frontale projetée par rapport à la méthode de pesage des photographies. De plus, cette méthode est rapide et fonctionne à la fois en condition de laboratoire et de terrain, puisqu'elle ne nécessite pas de zone d'étalonnage fixe. On peut donc lors d'épreuves de terrains si le vélo est équipé d'un système de type SRM ou Power Tap, déterminer à la fois l'aire frontale projetée totale et le coefficient de forme. On pourra également étudier la relation entre A_f et C_x .

RÉFÉRENCES

1. **Altman DG**, Bland JM (1983) Measurement in medicine: the analysis of the method comparison studies. *Statistician* **32**: 307-317.
2. **Bland JM**, Altman DG (1986) Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *Lancet* **1**: 307-310.
3. **Dorel S**, Hautier CA, Rambaud O, Rouffet D, Van Praagh E, Lacour JR, 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.
4. **Grenier B**, Dubreuil M, Journois D (2000) Comparaison de deux méthodes de mesure d'une même grandeur: méthode de Bland et Altman. *Ann Fr Anesth Réanim* **2000** **19**: 128-135.
5. **Heil DP** (2001) Body mass scaling of projected frontal area in competitive cyclists. *Eur J Appl Physiol* **85**: 358-366.
6. **Heil DP** (2002) Body mass scaling of frontal area in competitive cyclists not using aero-handlebars. *Eur J Appl Physiol* **87**: 520-528.

7. **Millet GP**, Candau R (2002) Facteurs mécaniques du coût énergétique dans trois locomotions humaines: Mechanical factors of the energy cost in three human locomotions. *Science Sports* **17**: 166-176
8. **Olds TS**, Norton KI, Lowe ELA, Olive S, Reay F, Ly S (1995) Modeling road-cycling performance. *J Appl Physiol* **78**: 1596-1611.
9. **Pugh LGCE** (1974) The relation of oxygen intake and speed in competition cycling and comparative observations on the bicycle ergometer. *J Physiol* **241**: 795 - 808.

ETUDE DES DETERMINANTS DE LA PERFORMANCE EN CYCLISME : PUISSANCE MUSCULAIRE ET AERODYNAMISME – APPLICATION EN BMX

DETERMINING FACTORS OF PERFORMANCE IN CYCLING: MUSCULAR POWER OUTPUT AND AERODYNAMICS – APPLICATION IN BMX

Résumé – Les compétitions de BMX se déroulent sur une piste spécifique de 300-400 m parsemée de bosses et de virages avec un départ sur plan incliné. Les vitesses atteintes par les pilotes peuvent être supérieures à 70 kmh⁻¹ quelques secondes après le départ. Peu d'études scientifiques ont été consacrées aux paramètres liés à la performance en BMX. Néanmoins une étude a montré que la phase de départ était primordiale et que la puissance maximale musculaire était un des principaux facteurs de la performance lors de cette phase. L'objectif de cette thèse est d'étudier les déterminants de la performance dans cette discipline à partir de deux paramètres essentiels : la production de puissance musculaire des membres inférieurs et une variable de l'aérodynamisme, l'aire frontale projetée. Dans un premier temps, l'étude de la production de puissance musculaire des membres inférieurs au cours de tests de sprints sur cyclo-wattmètre et d'exercices de ½ Squat chez des cyclistes sur route et des pilotes de BMX a montré que l'aire de section musculaire et la force maximale étaient des indicateurs de la performance pour des sprints courts (~ 6-30s). La comparaison des profils musculaires inertiels à des athlètes de force a montré que les pilotes de BMX produisaient une puissance maximale à des charges relatives faibles et qu'il était nécessaire d'augmenter la puissance produite à des charges élevées. Dans un deuxième temps, une nouvelle méthode de terrain pour la mesure de l'aire frontale projetée en cyclisme a été testée, elle est reproductible et valide en comparaison aux méthodes de pesage des photographies et de digitalisation. Cette méthode a permis de mesurer l'aire frontale projetée de pilotes de BMX lors de sprints de 80 m. Ces sprints ont permis de mettre en évidence l'importance de la puissance maximale, de l'aire frontale projetée et de la cadence moyenne de pédalage sur la performance chronométrique, et la nécessité de trouver un braquet optimal pour diminuer la différence entre la cadence moyenne et la cadence optimale. Pour optimiser la performance en compétition chez les pilotes de BMX, il apparaît nécessaire : i) de suivre un entraînement en musculation pour augmenter la masse musculaire et la force maximale des membres inférieurs ; ii) d'adapter le braquet selon le niveau des pilotes ; et iii) d'optimiser l'aire frontale projetée selon les phases de course. Des solutions sont proposées dans cette thèse.

Mots-Clés – BMX · Puissance musculaire · Accélérométrie · Aérodynamisme · Aire frontale projetée

Abstract – The BMX competitions take place on a specific track of 300-400 m with bumps and turns, and with a downhill start. The displacement velocity reached by the riders may be greater than 70 kmh⁻¹ a few seconds after the start. Few scientific studies focused to the parameters related to the performance in BMX. Nevertheless, a study showed that the starting phase was capital and that the maximum muscle power was a major contributor to performance during this phase. The aim of this thesis is to study the determinants of performance in this sport in focusing on two main parameters: the muscular power output of the lower limbs and a variable of aerodynamics, the projected frontal area. Firstly, the study of the muscular power output in lower body during sprints on a cycle ergometer and a ½ Squat among road cyclists and BMX riders showed that the muscle cross-sectional area and maximal muscle strength were indicators of performance for all-out sprints (~ 6-30s). A comparison of muscular inertial profiles has shown that BMX riders produced a maximal power output with relative light loads and it was necessary to increase muscular power output at heavy loads. Secondly, a new field method for measuring the projected frontal area in cycling has been tested. This method is reproducible and valid in comparison to the methods of weighing photographs and digitization. This method was used to measure the projected frontal area of BMX riders during 80 m sprints. These sprints allowed to highlight the importance of the maximal power, the projected frontal area and the average pedaling rate on the chronometric performance and the need to find an optimal gear to decrease the difference between the average pedaling rate and the optimal pedaling rate. To optimize the performance in competition among the BMX riders, it seems necessary: i) to follow a resistance training to increase muscle mass and muscle maximal strength of the lower limbs; ii) to adjust the gear ratio depending on the riders; and iii) to optimize the projected frontal area for some phases of the race. Solutions are proposed in this thesis.

Keywords – BMX · Muscular power output · Accelerometer · Aerodynamics · Projected frontal area