

**Direction des bibliothèques**

**AVIS**

Ce document a été numérisé par la Division de la gestion des documents et des archives de l'Université de Montréal.

L'auteur a autorisé l'Université de Montréal à reproduire et diffuser, en totalité ou en partie, par quelque moyen que ce soit et sur quelque support que ce soit, et exclusivement à des fins non lucratives d'enseignement et de recherche, des copies de ce mémoire ou de cette thèse.

L'auteur et les coauteurs le cas échéant conservent la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent ce document. Ni la thèse ou le mémoire, ni des extraits substantiels de ce document, ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans l'autorisation de l'auteur.

Afin de se conformer à la Loi canadienne sur la protection des renseignements personnels, quelques formulaires secondaires, coordonnées ou signatures intégrées au texte ont pu être enlevés de ce document. Bien que cela ait pu affecter la pagination, il n'y a aucun contenu manquant.

**NOTICE**

This document was digitized by the Records Management & Archives Division of Université de Montréal.

The author of this thesis or dissertation has granted a nonexclusive license allowing Université de Montréal to reproduce and publish the document, in part or in whole, and in any format, solely for noncommercial educational and research purposes.

The author and co-authors if applicable retain copyright ownership and moral rights in this document. Neither the whole thesis or dissertation, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms, contact information or signatures may have been removed from the document. While this may affect the document page count, it does not represent any loss of content from the document.

**Université de Montréal**

**Mesure de la capacité de travail anaérobie au moyen  
d'un dynamomètre isocinétique**

**Par**

**Kenan Gouadec**

**Département de kinésiologie**

**Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures et postdoctorales  
en vue de l'obtention du grade de Maîtrise  
ès sciences (M.Sc.)  
en sciences de l'activité physique**

**Mai 2008**

**© Kenan Gouadec, 2008**



**Université de Montréal**  
**Faculté des études supérieures**

Ce mémoire intitulé :  
**Mesure de la capacité de travail anaérobie au moyen d'un  
dynamomètre isocinétique**

Présenté par :  
Kenan Gouadec

.....  
a été évalué par un jury composé des personnes suivantes  
Luc Léger

.....  
**Président-rapporteur**

Laurent Bosquet

.....  
**Directeur de recherche**

Jean-Louis Croisier

.....  
**Membre du jury**

## Résumé

L'évaluation des qualités physiques est une étape importante du processus d'entraînement sportif. Elle permet de prescrire les intensités de travail, de prédire la performance, de classer les individus, ou encore de vérifier l'effet des méthodes d'entraînement utilisées. Cela nécessite au préalable d'utiliser des tests qui sont valides, reproductibles et accessibles.

La capacité de travail anaérobie peut être définie comme étant la quantité maximale de travail (ou distance maximale) réalisée lors d'un effort épuisant de courte durée qui stimule maximalelement la production d'ATP des voies anaérobies. Les dynamomètres isocinétiques sont de plus en plus utilisés, tant dans le milieu sportif que celui de la réadaptation. Bien qu'ils soient utilisés la plupart du temps pour mesurer le pic de force, ils permettent cependant de mesurer la capacité de travail anaérobie.

L'objectif de la présente étude est de valider un test de mesure de la capacité de travail anaérobie au moyen d'un dynamomètre isocinétique.

Vingt cyclistes amateurs ( $30.1 \pm 6.2$  ans), au moins de niveau provincial, sont inclus dans cette étude. Ils participent dans un ordre aléatoire à un test sur dynamomètre isocinétique qui consiste à effectuer 30 répétitions maximales de flexion/extension du genou à une vitesse angulaire de  $180^\circ/s$ , un test de Wingate 30s précédé d'un test force vitesse et un test incrémenté sur ergocycle.

Les résultats indiquent qu'il y a une corrélation significative de 0.83 ( $p < 0.05$ ), 0.70 ( $p < 0.05$ ) et 0.79 ( $p < 0.05$ ) entre la  $P_{\text{moy}}$  obtenue au test de Wingate 30 s et la  $P_{\text{moy}}$  obtenue au test isocinétique pour les extenseurs, fléchisseurs et la somme extenseurs/fléchisseurs, respectivement. Le test que propose cette étude entre parfaitement dans les paramètres proposés pour la mesure de la capacité de travail anaérobie. La corrélation entre ce test et le test Wingate, test le plus reconnu pour la mesure de la capacité de travail anaérobie, renforce la notion que le test isocinétique proposé dans cette étude est une mesure valide de la capacité de travail anaérobie.

**Mots clés :** capacité de travail anaérobie, isocinétisme, mesure, puissance, wingate

## **Abstract**

The evaluation of athletic and physical qualities is an important step in the training process. Proper evaluation is influential in prescribing the proper work intensities, predicting performance, the ranking of individuals, as well as monitoring the effect of various training methods. It is important to use testing methods that are valid, reliable and accessible. Anaerobic work capacity can be defined as the maximal amount of work (or distance) that can be performed during a short exhaustive work bout stimulating a maximal production of ATP by the anaerobic system. Isokinetic dynamometers are used increasingly in both the athletic and the rehabilitation fields. They are used most of the time to measure peak torque, but they are also capable of measuring anaerobic work capacity.

The aim of this study was to establish a valid test of anaerobic work capacity, using an isokinetic dynamometer.

Twenty amateur cyclists ( $30.1 \pm 6.2$  years), competing at least at the provincial level where included in this study. Each of the participants were assigned a random testing order. The three testing sessions each consisted of one of the following tests: an isokinetic dynamometer test consisting of 30 maximal flexion/extension of the knee at an angular velocity of  $180^\circ/\text{s}$ , a 30 s Wingate test preceded by a force-velocity test, and an incremental cycle ergometer test.

Results indicate a significant correlation of 0.83 ( $p < 0.05$ ), 0.70 ( $p < 0.05$ ) and 0.79 ( $p < 0.05$ ) between the average power obtained on the Wingate test, and the average power obtained on the isokinetic test for knee extensors, flexors, and the sum of flexors/extensors respectively. The isokinetic test used in the present study is well within the different parameters proposed for the proper measurement of anaerobic work capacity. The significant correlation between the isokinetic test and the Wingate test determined to be the most reliable test of anaerobic work capacity, reinforces the notion that the isokinetic test proposed in this study is a valid measure of anaerobic work capacity.

**Key words: anaerobic work capacity, isokinetic, test, power, wingate**

## Table des matières

<b>PAGE TITRE</b> .....	<b>I</b>
<b>PRÉSENTATION DU JURY</b> .....	<b>II</b>
<b>RÉSUMÉ</b> .....	<b>III</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>IV</b>
<b>TABLE DES MATIÈRES</b> .....	<b>V</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>VII</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>VIII</b>
<b>LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS</b> .....	<b>IX</b>
<b>REMERCIEMENTS</b> .....	<b>X</b>
<b>1 RECENSEMENT DES ÉCRITS</b> .....	<b>1</b>
1.1 INTRODUCTION .....	1
1.1.1 <i>Déterminants de la performance anaérobie</i> .....	1
1.1.2 <i>La capacité anaérobie</i> .....	2
1.1.3 <i>La capacité de travail anaérobie</i> .....	3
1.2 CAPACITÉ DE TRAVAIL ANAÉROBIE.....	5
1.2.1 <i>Mesure de la performance</i> .....	5
1.2.2 <i>Ergomètres de laboratoire</i> .....	7
1.2.3 <i>Reproductibilité et validité</i> .....	8
1.2.3.1 <i>Reproductibilité des tests de performance</i> .....	8
1.2.3.2 <i>Validité des tests de performance</i> .....	9
1.2.4 <i>Mesures de la CTA et leurs limites</i> .....	10
1.2.4.1 <i>Test à puissance ou charge constante</i> .....	10
1.2.4.2 <i>Test à travail constant</i> .....	11
1.2.4.3 <i>Test à durée constante</i> .....	11
1.2.4.4 <i>Test incrémenté</i> .....	13
1.2.5 <i>Modes de contraction musculaire</i> .....	14
1.2.5.1 <i>Mode iso-inertiel</i> .....	14
1.2.5.2 <i>Mode isocinétique</i> .....	15
1.2.5.3 <i>Mode isométrique</i> .....	16
1.3 ISOCINÉTISME .....	16
1.3.1 <i>Isocinétisme définition et place croissante dans l'évaluation des sportifs</i> .....	16
1.3.2 <i>Mesures isocinétiques</i> .....	17
1.3.2.1 <i>Exploration de la force musculaire</i> .....	17
1.3.2.2 <i>Analyse des paramètres chiffrés</i> .....	18
1.3.2.3 <i>Analyse des courbes</i> .....	19
1.3.3 <i>Mesures isocinétiques en milieu sportif</i> .....	23
1.3.3.1 <i>Paramètres normatifs des fléchisseurs et extenseurs du genou</i> .....	23
1.3.4 <i>Mesure de la capacité de travail anaérobie</i> .....	26
QUESTION DE RECHERCHE : .....	27
<b>2 MÉTHODOLOGIES</b> .....	<b>28</b>
2.1 SUJETS.....	28

2.2	MESURES.....	29
2.2.1	<i>Test isocinétique</i> .....	29
2.2.2	<i>Test incrémenté</i> .....	30
2.2.3	<i>Test force-vitesse</i> .....	30
2.2.4	<i>Test de Wingate</i> .....	30
2.2.5	<i>Mesure des paramètres mécaniques</i> .....	31
2.2.6	<i>Mesure des paramètres ventilatoires</i> .....	31
2.3	MÉTHODE D'ANALYSE DES PARAMÈTRES MESURÉS.....	31
2.3.1	<i>Test isocinétique</i> .....	31
2.3.2	<i>Test incrémenté</i> .....	32
2.3.3	<i>Test de Wingate</i> .....	32
2.3.4	<i>Analyse statistique</i> .....	32
<b>3</b>	<b>RÉSULTATS.....</b>	<b>34</b>
3.1	MESURES AU TEST DE WINGATE.....	34
3.2	MESURES ISOCINÉTIQUES FLÉCHISSEURS/EXTENSEURS.....	34
3.3	CORRÉLATION ENTRE LA PUISSANCE MOYENNE ISOCINÉTIQUE DES EXTENSEURS ET LA PUISSANCE MOYENNE AU WINGATE.....	36
3.4	CORRÉLATION ENTRE LA PUISSANCE MOYENNE ISOCINÉTIQUE DES FLÉCHISSEURS ET LA PUISSANCE MOYENNE AU WINGATE.....	36
3.5	CORRÉLATION ENTRE LA SOMME DE LA PUISSANCE MOYENNE ISOCINÉTIQUE DES FLÉCHISSEURS ET EXTENSEURS ET LA PUISSANCE MOYENNE AU WINGATE.....	37
<b>4</b>	<b>DISCUSSION.....</b>	<b>39</b>
4.1	MESURES DE PUISSANCE AU TEST DE WINGATE.....	39
4.2	MESURE DE LA PUISSANCE AU TEST ISOCINÉTIQUE.....	41
4.3	CORRÉLATION ENTRE LA PUISSANCE AU TEST DE WINGATE ET AU TEST ISOCINÉTIQUE.....	41
4.4	LIMITES.....	43
4.5	CONCLUSION ET APPLICATIONS PRATIQUES.....	44
	<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>45</b>

## Liste des tableaux

Tableau 1: Facteurs limitants introduisant un biais dans l'évaluation des différentes aptitudes anaérobies au moyen d'épreuves de performance (adapté de Léger, 1994 [4]).....	6
Tableau 2: Normes masculines pour le pic de force pour les fléchisseurs (F) et extenseurs (E) du genou (emprunté de Freedson et al. 1993 [70]).....	24
Tableau 3: Normes féminines pour le pic de force pour les fléchisseurs (F) et extenseurs (E) du genou (emprunté de Freedson et al. 1993 [70]).....	24
Tableau 4: Équation de prédiction de différents paramètres isocinétiques pour les extenseurs du genou (Neder et al. 1999 [71]) .....	25
Tableau 5: Équation de prédiction de différents paramètres isocinétiques pour les fléchisseurs du genou (Neder et al. 1999 [71]) .....	25
Tableau 6: Valeurs extrêmes pour les paramètres isocinétiques : limite inférieure (<) pour le MFM/kg et le rapport fléchisseur/extenseur; limite supérieure (>) pour la différence bilatérale en pourcentage (emprunté à Croisier et Crielaard, 1999 [54]).....	26
Tableau 7: Données anthropométriques (n=20). Données rapportées sous forme de moyenne (écart type) .....	29

## Liste des figures

Figure 1: Glycolyse anaérobie (adapté de Bosquet, 2006).....	2
Figure 2: Durée de l'effort à vitesse maximale en fonction de la filière énergétique (adapté de Léger, 1994, [4]) .....	3
Figure 3: Lien entre la Capacité anaérobie et la Capacité de travail anaérobie (adapté de Green [7]).....	5
Figure 4: Cinétique des différentes filières énergétiques (emprunté à Gastin, 2001 [2]) .....	6
Figure 5: Pourcentage des apports énergétiques des filières aérobie et anaérobie en fonction du temps.....	12
Figure 6: Test wingate découpé en blocs de 5 s par rapport à la mesure moyenne par révolution de pédale (emprunté à MacIntosh et al, 2003 [17]).....	13
Figure 7: Courbe isocinétique normale en mode concentrique .....	20
Figure 8: Courbe isocinétique normale en mode excentrique.....	20
Figure 9: Exemples de non-superposition des courbes, (emprunté à Croisier et Crielaard, 1999 [62]) .....	21
Figure 10: Anomalie de courbes (emprunté à Croisier et Crielaard, 1999 [62]).....	22
Figure 11 Anomalie de courbes (emprunté à Croisier et Crielaard, 1999 [62]) .....	22
Figure 12: Relation entre échantillonnage du test de Wingate à 5 Hz et 0.2 Hz .....	34
Figure 13: Résultats des tests isocinétiques .....	35
Figure 14: Puissance moyenne développée lors du test isocinétique et du test de Wingate ....	35
Figure 15: (A) Graphique de corrélation extenseurs et Wingate. (B) Graphique de Bland et Altman.....	36
Figure 16: (A) Graphique de corrélation fléchisseurs et Wingate. (B) Graphique de Bland et Altman.....	37
Figure 17: (A) Graphique de corrélation somme fléchisseurs/extenseurs et Wingate. (B) Graphique de Bland et Altman .....	38

## Liste des sigles et abréviations

Adénosine triphosphate : ATP  
American College of Sports Medicine : ACSM  
Angle d'efficacité maximale : AEM  
Capacité anaérobie : CA  
Capacité de travail anaérobie : CTA  
Coefficient de variation : CV  
Concentration de lactate sanguin :  $[La]_b$   
Consommation maximale d'oxygène :  $VO_2max$   
Counter Mouvement Jump : CMJ  
Force de freinage maximale :  $F_0$   
Lactate : La  
Moment de force maximale : MFM  
Maximal Anaerobic Running Test : MART  
Phosphate énergétique rapide :  $\approx P$   
Phosphocréatine : PC  
Pic de puissance :  $P_{max}$   
Puissance : P  
Puissance aérobie maximale : PAM  
Puissance moyenne :  $P_{moy}$   
Puissance critique : CP  
Temps :  $t$   
Travail : W  
Travail total :  $W_{total}$

## Remerciements

*« La confiance est un élément majeur : sans elle, aucun projet n'aboutit. »*  
Éric Tabarly - Extrait de ses *Mémoires du large*

Depuis plus d'une semaine, sachant que ce serait par cette page de remerciements que se terminera la rédaction de ce mémoire, je me demande comment les mots suffiront pour remercier les personnes qui m'ont permis de réaliser ce travail.

Avant tout, je remercie Laurent Bosquet, mon directeur de recherche. Sans lui je n'aurais même pas eu l'occasion de commencer ce travail. Que dire de sa disponibilité hors pair pour ses étudiants, son calme, sa patience et la rigueur qu'il démontre dans tout ce qu'il fait. Il m'a permis de progresser non seulement sur le plan académique, mais aussi sur le plan humain. Ce fut un honneur de travailler avec lui. Merci!

Yvette, ma mère, qui sans le savoir en 2002, m'a soutenu et permis de faire mes premiers pas (une seconde fois!), mais cette fois-ci, c'était vers ce mémoire de maîtrise. Merci!  
Loïc, mon père, toujours disponible pour discuter ou pour la relecture, souvent in extremis. Merci!  
Meiwen, mon grand frère, de la relecture de mon premier devoir universitaire à aujourd'hui, toujours disponible pour donner conseil. Merci!

Nicolas Berryman, pour ses tests Wingate et isocinétiques en jeans, et à froid, Merci!

Louise Béliveau, directrice du Département de kinésiologie à mon arrivée. Merci!

Cyril Duclos, pour ses précieux conseils sur l'utilisation du Biodex. Merci!

Arthur Long, Chantal Daigle, et François Lecot et l'ensemble de la clinique de kinésiologie, pour l'accès au laboratoire et leur disponibilité. Merci d'avoir répondu à mes SOS pour des problèmes de mesures ou des participants mal en point.

Le local 227 et ses locataires: bureau, mais grand lieu de discussion. Que dire du nombre d'heures passées dans ce local sans fenêtres, jamais une journée ne s'écoule sans un fou rire général. On y retrouve une motivation qui se transmet des uns aux autres. Merci à tous!

Aux participants de l'étude, vos efforts n'ont pas été vains et votre sueur est mêlée à l'encre de ce mémoire. Merci!

# 1 Recensement des écrits

## 1.1 Introduction

### 1.1.1 Déterminants de la performance anaérobie

La compétition sportive est le meilleur moyen de mesurer la performance, que ce soit de façon subjective, dans une épreuve jugée (artistique), ou de façon objective en mesurant le temps ou la distance, c'est le meilleur moyen de quantifier la capacité physique du corps humain. Les facteurs déterminants de la performance dans une discipline donnée doivent être en lien direct avec les capacités physiques et physiologiques de l'athlète afin de lui permettre la réalisation d'une performance optimale. Le facteur physique le plus important permettant à l'athlète d'atteindre cette performance optimale est sa composition génétique. Que ce soit son génotype ou la réponse de son corps à l'entraînement, les facteurs génétiques représentent environ 70 % de la force maximale, puissance maximale ou de la capacité athlétique générale du corps humain [1].

Pour un exercice de faible intensité ou de longue durée, la filière aérobie est le facteur déterminant de la performance. La filière aérobie tire son énergie de la dégradation de glucides, de matières grasses et parfois de protéines, en présence d'oxygène [2]. La puissance aérobie peut être suivie tout au long de l'exercice en mesurant la consommation d'oxygène de l'individu. Par contre, pour un exercice intense de courte durée, la filière anaérobie joue un rôle primordial. Contrairement à la filière aérobie, il n'existe pas de mesure de référence permettant de déterminer le potentiel énergétique de la filière anaérobie [3]. Comme l'aptitude aérobie, l'aptitude anaérobie peut être subdivisée en trois composantes : la puissance anaérobie ou la vitesse à laquelle l'énergie métabolique est produite, l'endurance anaérobie ou la durée pendant laquelle un effort dont l'énergie provient de la filière anaérobie peut être soutenu et, finalement, le rendement anaérobie ou l'efficacité d'utilisation par le corps d'une quantité d'énergie donnée provenant de cette même filière. Le système anaérobie peut être divisé en deux voies énergétiques différentes, l'aptitude anaérobie alactique et l'aptitude anaérobie lactique. La première utilise directement les réserves de phosphocréatine (PC) et d'adénosine triphosphate (ATP) stockées dans le muscle. La seconde tire son énergie de la glycolyse anaérobie, c'est-à-dire la dégradation non aérobie (sans apport d'oxygène) de glucides, essentiellement sous forme de glycogène, ce qui produit du lactate (La)[2, 4]. Les filières anaérobies sont capables de régénérer de l'ATP très rapidement,

ce qui permet de produire de très grandes puissances de travail. La capacité du système anaérobie est donc déterminée par le potentiel du corps à régénérer de l'ATP.

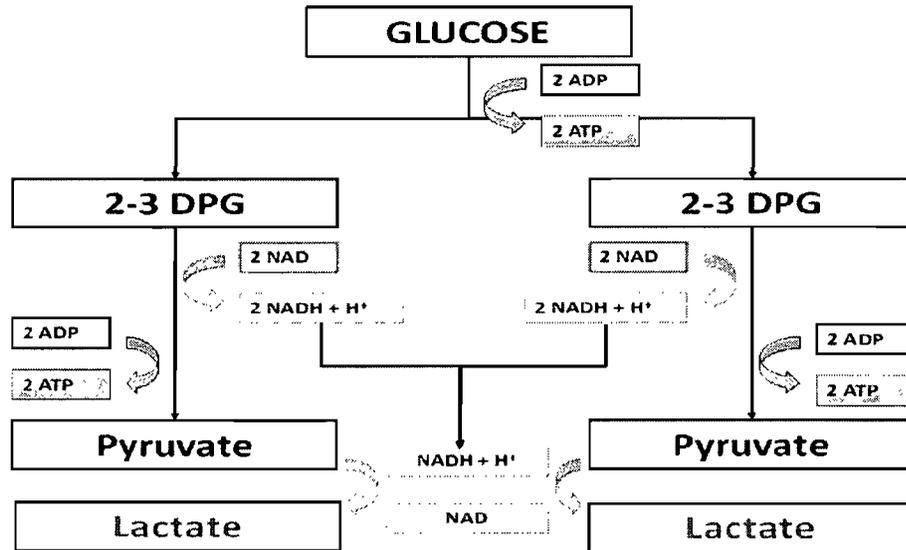
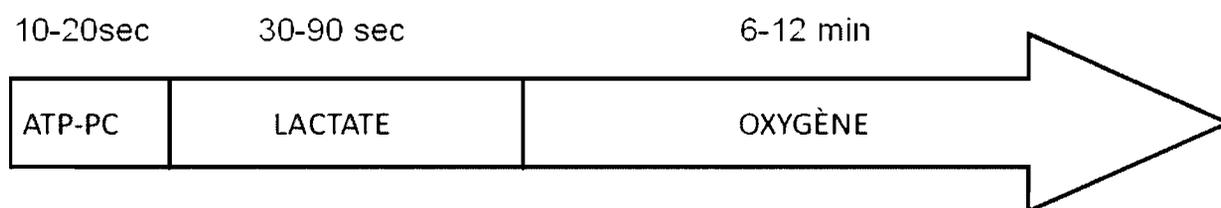


Figure 1: Glycolyse anaérobie (adapté de Bosquet, 2006)

### 1.1.2 La capacité anaérobie

La régénération anaérobie de l'ATP est la composante déterminante de la capacité anaérobie. Comme pour la définition de l'aptitude anaérobie, la capacité anaérobie (CA) est composée de deux différentes voies métaboliques de régénération de l'ATP. La première voie métabolique de régénération d'ATP peut être définie comme étant la capacité anaérobie alactique. Elle représente la quantité totale d'ATP synthétisée, pendant un exercice, par l'hydrolyse des phosphates énergétiques rapides (P), tels que la PC, et les nucléotides d'adénine [5]. La capacité anaérobie alactique représente environ 20 % de l'apport énergétique anaérobie total lors d'un effort épuisant de courte durée [6]. La seconde voie métabolique anaérobie tire son énergie de la dégradation du glycogène stocké dans le muscle sans l'apport d'oxygène, appelé la glycolyse anaérobie (figure 1). Cette dernière a pour produit final le lactate, qui est ensuite régénéré en ATP. C'est pourquoi cette voie est communément appelée la voie lactique [3]. La quantité d'ATP régénérée par cette voie métabolique représente donc la capacité anaérobie lactique. Cette dernière représente environ 80 % de l'apport énergétique anaérobie total lors d'un effort épuisant de courte durée [6]. La somme de ces deux composantes représente la capacité anaérobie, c'est la quantité maximale d'ATP régénérée par le corps lors d'un exercice

épuisant de courte durée [7]. L'importance du rôle que jouent ces différentes capacités anaérobies pour la performance varie grandement en fonction du type, de l'intensité et de la durée de l'effort requis. Il est toutefois important de noter que la contribution énergétique de chacune des filières n'est jamais exclusive, on observe un chevauchement des filières aérobie et anaérobies tout au long de l'exercice (figure 4)[2, 4]. Le pourcentage d'utilisation d'une filière par rapport à une autre varie en fonction de la durée de l'effort, on parle donc d'une filière énergétique principale lors de différentes durées d'efforts [4]. Par exemple, la capacité alactique est sollicitée maximale lors d'une activité très courte et explosive, où un maximum de puissance doit être développé sur une période d'environ 5 à 15 secondes. La performance réalisée lors d'un exercice épuisant de cette durée n'est pas exclusivement dépendante de la filière alactique, les filières lactique et aérobie sont également sollicitées. Il en est de même pour la capacité lactique qui, elle, prend de l'importance lorsque l'effort se prolonge, jusqu'à environ 90 secondes, au-delà de quoi la filière aérobie fournit plus de cinquante pour cent de l'apport énergétique total (figure 2 et 4) [2]. La CA est donc un facteur important de la performance dans des épreuves où elle est sollicitée à son maximum, tel que le kilomètre en cyclisme sur piste, le 800m en course à pied, ou le 1000m en patin de vitesse courte piste.



**Figure 2: Durée de l'effort à vitesse maximale en fonction de la filière énergétique (adapté de Léger, 1994, [4])**

### 1.1.3 La capacité de travail anaérobie

Quelle que soit la filière maximale utilisée, aérobie ou anaérobie, cette filière fournit au muscle un apport énergétique sous forme d'énergie chimique. Cette énergie chimique

provient de l'hydrolyse de l'ATP, ou de substrats stockés dans le muscle (P) et représente la source d'énergie majeure nécessaire à la contraction musculaire. Cette énergie chimique devient donc de l'énergie musculaire ou de la puissance musculaire. L'énergie musculaire représente le potentiel énergétique du muscle, c'est-à-dire la capacité anaérobie [8]. L'énergie musculaire dépend essentiellement du rendement énergétique musculaire, c'est-à-dire du travail total réalisé en fonction de l'énergie chimique qui est disponible dans le muscle, et ce, entre le moment de la contraction et le retour du muscle à son état d'origine, comme expliqué par Woledge [9]. La conversion de cette énergie musculaire en énergie mécanique ou puissance externe, dépend ensuite du rendement biomécanique du mouvement. La capacité de travail anaérobie (CTA) est la durée pendant laquelle cette puissance mécanique peut être maintenue. Cette notion de CTA fut proposée par Maison et Broeker [10]. La CTA représente le travail mécanique qui peut être réalisé pendant un effort stimulant la CA. Le travail mécanique ou CTA est donc directement dépendant de la CA [7] (figure 3). La CTA peut être définie de façon plus exacte comme étant la quantité maximale de travail (ou distance maximale) réalisée lors d'un effort épuisant de courte durée qui stimule maximalelement la production d'ATP des voies anaérobies [11]. Afin que l'énergie utilisée pour réaliser ce travail provienne essentiellement des voies anaérobies, la quantité d'ATP produite par les voies anaérobies doit être supérieure à la production d'ATP de la filière aérobie [7]. Les différentes mesures de l'aptitude anaérobie tentent d'estimer de façon quantitative la capacité anaérobie ou de fournir la mesure d'une distance ou de la quantité de travail accompli lors d'un effort épuisant de courte durée. La capacité de travail anaérobie repose essentiellement sur la mesure de performances. Elle offre donc un moyen intéressant pour l'évaluation de l'aptitude anaérobie.

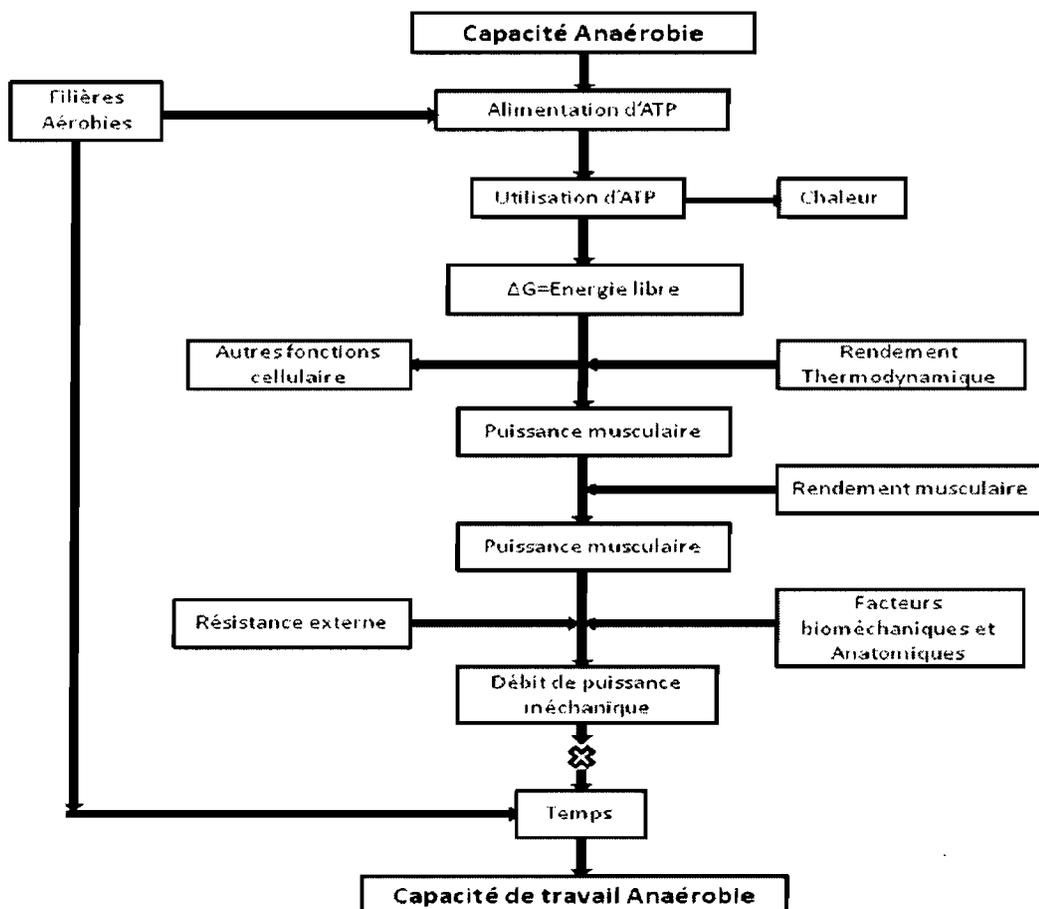


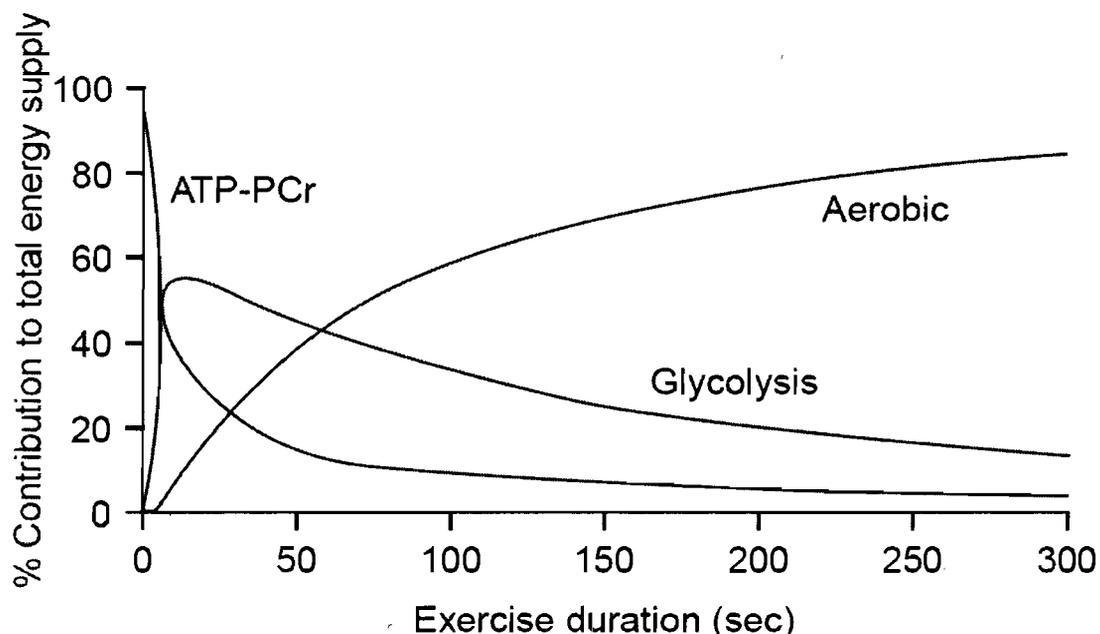
Figure 3: Lien entre la Capacité anaérobie et la Capacité de travail anaérobie (adapté de Green [7])

## 1.2 Capacité de travail anaérobie

### 1.2.1 Mesure de la performance

La mesure des aptitudes anaérobies peut être problématique lorsque les approches biochimiques ou respiratoires sont utilisées, car elles sont souvent coûteuses et effractives [7]. C'est pour cette raison que les spécialistes en évaluation de la condition physique se sont tournés vers des mesures directes de la performance pendant des activités qui utilisent essentiellement la filière anaérobie. La performance réalisée lors d'un test de la CTA peut exprimer de façon quantitative la capacité d'utilisation des  $\approx P$ , c'est-à-dire la capacité alactique, mais aussi la capacité de production d'énergie de la glycolyse anaérobie, soit la capacité lactique. Il est également possible de mesurer la combinaison des deux, c'est-à-dire

l'expression de la CA [11]. En fonction de la cinétique des différents systèmes énergétiques du corps humain, les systèmes alactiques et lactiques sont sollicités au maximum par des exercices épuisants durant de 10 à 15 secondes et de 30 à 90 secondes respectivement (figures 3 et 4). Il est à noter par contre que cette performance ne dépend pas uniquement des filières anaérobies en raison des chevauchements des différentes filières.



**Figure 4: Cinétique des différentes filières énergétiques (emprunté à Gastin, 2001 [2])**

Il est par contre important de noter que certains facteurs limitants peuvent intervenir dans la mesure de la CTA au moyen de tests de performance. Un test de performance ne mesure pas spécifiquement une certaine aptitude anaérobie. Par exemple, la performance lors d'un exercice épuisant de dix secondes ne dépend pas uniquement de l'aptitude anaérobie alactique. Il faut donc prêter attention aux différents facteurs limitants qui pourraient fausser la validité, ou la reproductibilité des tests (table 1) [4].

1. Motivation
2. Aptitude aérobie
3. Chevauchement de la mobilisation des filières anaérobie alactique et lactique et de la filière aérobie
4. Chevauchement des systèmes métabolique et neuromusculaire
5. Apprentissage, surtout pour les tâches complexes
6. Insuffisance de normalisation dans la tâche à exécuter

**Tableau 1: Facteurs limitants introduisant un biais dans l'évaluation des différentes aptitudes anaérobies au moyen d'épreuves de performance (adapté de Léger, 1994 [4])**

Certains facteurs physiologiques tels que la capacité aérobie du participant supérieure à la moyenne, le chevauchement des filières énergétiques ou des systèmes métaboliques et neuromusculaires pourraient causer une surestimation de la CA en raison de l'impact direct de ces facteurs sur la performance. Il existe également des facteurs extérieurs qui peuvent influencer la performance du participant. Le phénomène d'apprentissage est le premier facteur à surveiller, on observe un coefficient de variation 1,3 fois supérieur entre le premier et le deuxième essai d'un même test par rapport au coefficient de variation entre les essais suivants [12]. Il est donc très important de se servir d'une procédure de familiarisation avec le protocole. Il est également possible que l'un des appareils de mesure gêne les participants, d'où l'importance du processus de familiarisation [13]. L'encouragement verbal peut jouer un rôle important sur la motivation du participant, il est même démontré que le participant déploie plus de force lorsqu'il est encouragé que lorsque le test se déroule sans encouragements [14]. L'information donnée au participant est également importante, car cela peut influencer sa perception de l'effort [13]. Il est en effet possible que les variations de la puissance développée lors d'efforts intenses chronométrés, soient essentiellement dues à la perception du participant [15]. Il faut donc prêter attention au protocole de mesure, s'assurer que ce dernier est normalisé afin de pouvoir reproduire les mêmes conditions de tests pour chacun des participants.

### **1.2.2 Ergomètres de laboratoire**

La mesure d'une performance en laboratoire, quel que soit l'ergomètre utilisé, permet une estimation de la CTA. Il est toutefois important de reproduire le plus fidèlement possible l'effort que l'athlète doit effectuer dans son sport. C'est pourquoi de nombreux différents ergomètres de laboratoire ont vu le jour. Il est maintenant possible d'utiliser des ergomètres au moyen desquels une charge mécanique peut être appliquée, simulant l'aviron, le kayak, le ski de fond ou la natation, et qui permettent de mesurer avec précision la charge de travail. Une grande partie des tests de la CTA peuvent être adaptés aux différents ergomètres disponibles. Les deux ergomètres les plus utilisés restent toujours les tapis roulants et les ergocycles. Différents protocoles s'appliquent aux tapis roulants, que ce soit pour des tests à l'horizontale (pente 0%), ou avec des pourcentages de pente plus élevés. Toutefois, seul le travail vertical peut être estimé lors de tests sur tapis [11].

$$kg \times 9.81 \times \%incline \times (m/s) \times min \quad (1)$$

Sans pouvoir calculer le travail horizontal, le travail vertical à lui seul ne représente pas une mesure précise pour l'évaluation de la CTA, car cette dernière se voit sous-estimée [11, 16]. L'ergocycle est un outil très sécuritaire, surtout quand on doit travailler à des puissances très élevées. Il est aussi facile à utiliser que ce soit pour l'expérimentateur que pour le sujet. Par contre, il existe plusieurs types d'ergocycles de laboratoire, ce qui peut porter à confusion et produire des données différentes. L'un des facteurs responsables de l'écart des valeurs obtenues pour un même test sur deux ergomètres différents est la fréquence d'échantillonnage des divers modèles d'ergocycles. Par exemple, deux des ergocycles de laboratoire les plus utilisés sont le Monark (Monark AB, Varbeg, Suède), et le Lode Excalibur (Lode Medical Technology, Groningen, Hollande). Le Monark a une fréquence d'échantillonnage de 0.2 Hz (moyenne sur 5 s), alors que celle du Lode Excalibur est fixée à 5 Hz (0.2 s). La fréquence d'échantillonnage plus rapide du Lode donne donc des valeurs de pic de puissance plus élevées, ce qui aurait tendance à surévaluer le pic de puissance [17]. La fréquence d'échantillonnage idéale afin d'estimer correctement le pic de puissance et la puissance moyenne sur un ergocycle serait de 2 Hz (moyenne sur 0.5 s) c'est-à-dire la moyenne de la puissance développée sur une révolution de pédale. En effet, lorsque le pédalier se retrouve en position verticale la force appliquée est plus faible, c'est ce qu'on appelle le point mort, retrouvé à chaque rotation du pédalier et qui empêche le sujet de développer une puissance constante. Il est donc préférable de mesurer la puissance sur une rotation de pédale afin de déterminer la puissance Maximale [18].

### **1.2.3 Reproductibilité et validité**

#### **1.2.3.1 Reproductibilité des tests de performance**

La reproductibilité d'un test représente sa capacité à être répété tout en obtenant des résultats constants. Il s'agit d'un facteur très important, surtout dans l'optique de pouvoir suivre la progression de la performance ou de certaines de ses composantes à l'issue d'un programme d'entraînement [19]. Il existe deux types importants de reproductibilité : la fidélité relative et la fidélité absolue [20]. La fidélité relative représente à quel point un individu peut conserver son classement dans un groupe après plusieurs répétitions de la même mesure, exprimée le plus souvent par un coefficient de corrélation. Plus cette valeur

est proche de 1, plus la corrélation est bonne et donc, le test reproductible [19]. La fidélité absolue, représente la variation de la performance réalisée par un sujet lors de différents essais d'un même test. Cette forme de fidélité peut être exprimée par des mesures directes [20], sous forme de coefficient de variation (CV) [12], ou selon la méthode des limites d'agrément à 95 % de Bland et Altman [20]. Deux autres facteurs qui peuvent affecter la reproductibilité d'une mesure sont les erreurs aléatoires et le biais systématique. Les erreurs aléatoires peuvent être causées par une erreur de mesure provenant de l'appareil ou de l'expérimentateur. Plus l'échantillon est grand, plus cette erreur est petite [13, 20]. Le biais systématique, quant à lui, est une augmentation ou une diminution de la moyenne mesurée sur plusieurs essais, causé par exemple par l'apprentissage du test, ou l'effet de l'entraînement [19].

### **1.2.3.2 Validité des tests de performance**

La validité d'un test représente à quel point le protocole du test simule la performance qui doit être mesurée. Trois sortes de validités s'appliquent aux protocoles de tests de performance. La validité de fait ou rationnelle, la validité critériée et la validité de construit. La validité de fait vérifie si un test mesure adéquatement les valeurs recherchées, par exemple, un test de consommation maximale d'oxygène ( $VO_{2max}$ ) démontre une validité rationnelle, car c'est une mesure adéquate de la capacité aérobie. La validité de fait est habituellement difficile à établir [21]. La validité critériée, peut être divisée en deux, la validité concourante, c'est-à-dire, le degré avec lequel différentes mesures permettent de prédire les mêmes facteurs, par exemple comparer une performance en laboratoire à une performance en compétition. Le deuxième type de validité critériée est la validité prédictive, c'est-à-dire l'utilisation d'un protocole de test en laboratoire pour prédire une performance en compétition. Afin d'établir la validité critériée d'une mesure, il faut pouvoir comparer les résultats de cette mesure à une mesure unanimement reconnue. Le dernier type de validité est la validité de construit. Il s'agit d'établir à quel point les valeurs obtenues avec un protocole de mesure se rapprochent de la performance [21]. Cette validité peut être établie en comparant les résultats de deux groupes ayant des aptitudes anaérobies différentes ou en comparant les résultats obtenus dans différents tests de l'aptitude anaérobie ou de la performance de courte durée. En plus de la reproductibilité et de la validité, il faut également prendre en compte la sensibilité d'une mesure. Dans le cas des tests de performance, la

sensibilité représente la capacité d'un test à détecter des changements minimes de la performance [13]. Ces facteurs ne sont pas indépendants. Il y a donc une interaction entre la validité, la reproductibilité et la sensibilité d'une mesure. Chacun de ces facteurs doit être pris en compte pour élaborer une mesure adéquate de la performance. Il est par contre à noter que si la reproductibilité des tests actuels mesurant la CA et la CTA est bonne, montrant de bons coefficients de corrélation, la validité des tests est plus difficile à établir puisqu'il n'existe pas encore un seul et unique test (mesure de référence, ou gold standard) capable de mesurer tous les déterminants de la performance anaérobie [22-24].

## **1.2.4 Mesures de la CTA et leurs limites**

### **1.2.4.1 Test à puissance ou charge constante**

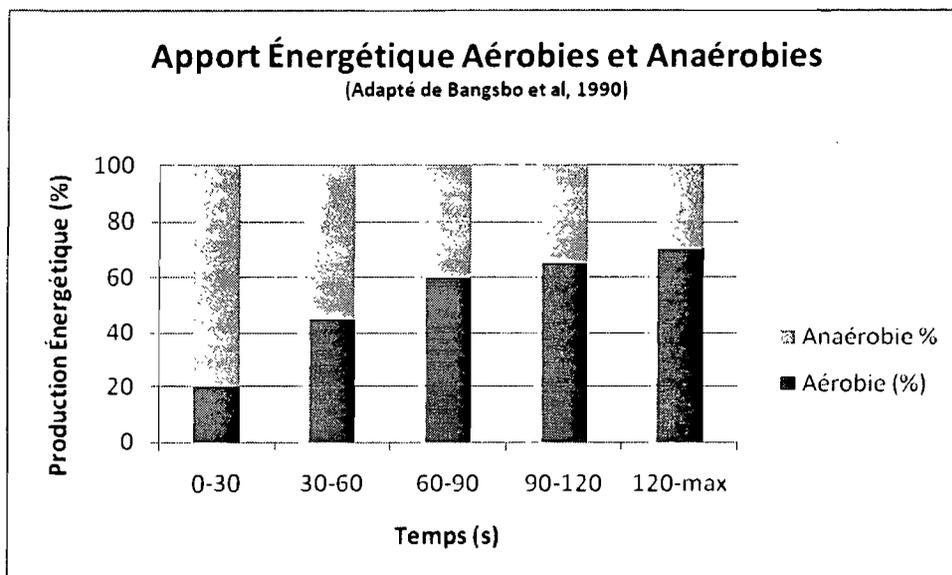
Un test à charge ou puissance constante, également connu sous le nom de temps limite, consiste à maintenir le plus longtemps possible une charge ou puissance prédéterminée, jusqu'à épuisement complet. Les différents critères d'épuisement sont atteints lorsque le participant n'est plus capable de maintenir une puissance, vitesse ou cadence prédéterminée (dans le cas de tests sur ergocycles) [12]. Pour que ce type de test soit une mesure valide de la CTA, la charge imposée doit être supérieure à la puissance atteinte à  $VO_2\text{max}$  [24-28]. La charge sélectionnée doit provoquer l'épuisement du sujet en moins d'une minute d'effort [11]. Ce type de protocole est utilisé régulièrement pour la mesure de la CTA sur tapis, la charge est modulée soit par la vitesse du tapis, la pente, ou une combinaison des deux. L'un des tests les plus utilisés sur tapis est le « anaerobic speed test » qui consiste à courir à 13 km/h sur une pente de 20 %, le plus longtemps possible [29]. Ce test démontre une validité de construit car les athlètes sprinteurs obtiennent de meilleures performances que les athlètes endurants, par contre les performances réalisées par des athlètes de haut niveau dépassent souvent les 60 secondes et peuvent même aller jusqu'à 120 secondes [30]. Des tests de cette durée ne mesurent probablement plus spécifiquement la CTA, puisque la contribution du système aérobie dépasse les 50 % [2, 6, 11]. Il faut donc que le pourcentage de pente ou la vitesse soit ajusté afin de pouvoir atteindre l'épuisement en moins d'une minute [11].

#### **1.2.4.2 Test à travail constant**

Un test à travail constant est aussi connu sous le nom de contre-la-montre. Le participant doit réaliser une quantité de travail ou parcourir une distance prédéfinie le plus rapidement possible. Ce test est un bon moyen de reproduire l'effort nécessaire à la performance en compétition, car il est souvent composé de plusieurs efforts plus ou moins longs à des charges sous maximales, suivis de sprints à très haute intensité à différents intervalles de l'exercice. Il est donc surtout utile pour observer la capacité du participant à gérer son effort ou pour prédire la CTA disponible à la fin d'une épreuve d'endurance [12].

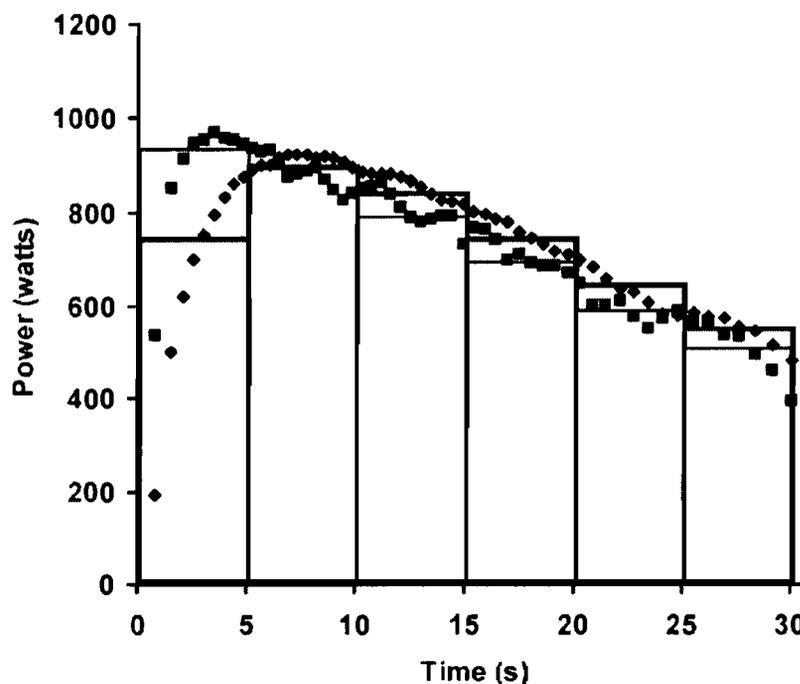
#### **1.2.4.3 Test à durée constante**

Le test à durée constante se rapproche du test à travail constant, mais le participant doit dans ce cas-ci produire le plus de travail ou couvrir la plus grande distance possible dans un délai prédéterminé [31]. Le test de Wingate se retrouve dans cette catégorie de tests. C'est le test le plus utilisé pour la mesure de la CTA. Il permet de déterminer le pic de puissance du participant ainsi que la puissance moyenne et le coefficient de diminution de la performance. La durée normale est de 30 s mais le test peut être modifié et durer 20, 45, voire 120 secondes, les résultats obtenus à ces différents tests étant fortement corrélés [27, 32, 33]. Le protocole est le même quelle que soit la durée du test. Le participant doit augmenter sa cadence au maximum sans résistance, ce qui prend environ 3 à 5 secondes. Une charge permettant de produire une puissance maximale [25], prédéterminée en fonction du poids du participant, est appliquée à l'ergomètre. Le participant doit ensuite maintenir la cadence de pédalage la plus élevée, possible pendant toute la durée du test [27]. L'une des limites de ce test est sa difficulté. Lorsqu'un participant doit répéter un test de plus de 30 secondes, l'effort est tellement difficile que la reproductibilité du test n'est pas bonne, car le participant a tendance à gérer son effort, ce qui fausse l'interprétation des données [27]. Il est également à noter que, à l'instar du test à charge constante, un test dépassant les 60 secondes ne mesure probablement plus spécifiquement la CTA (figures 4 et 5) [2, 6, 11].



**Figure 5: Pourcentage des apports énergétiques des filières aérobie et anaérobie en fonction du temps.**

Par contre, un test de 30 secondes est trop court pour entièrement épuiser la CA [24, 26, 34-36]. Il est cependant corrélé à la proportion de fibres de type II dans le vaste externe [37], ce qui est un facteur déterminant de la capacité anaérobie [7, 11]. Si l'objectif d'un test de CTA demeure de bien représenter la CA, il n'est donc pas primordial d'épuiser entièrement les réserves de la filière anaérobie [11]. Le test de Wingate présente une autre limite : il utilise plusieurs groupes musculaires, donc il représente l'effort fait sur vélo et ne peut pas isoler un mouvement précis. Par conséquent, il faut se servir d'ergomètres différents afin de pouvoir mieux identifier la CTA spécifique d'un sport [27]. Le travail total réalisé au cours de ce type de test est aussi directement lié à la relation force-vitesse. Il faut donc choisir une charge adaptée au sujet qui lui permettra de réaliser le plus grand travail possible au cours de son effort [11]. L'utilisation d'un test force-vitesse permettant de déterminer la résistance qui permet de produire un pic de puissance maximale est donc intéressante, puisque le pic de puissance maximale est atteint à une résistance proche de celle nécessaire à la production de la puissance moyenne la plus élevée [38]. Traditionnellement la courbe du test Wingate a été divisée en blocs de 5 secondes et les moyennes obtenues au cours de ces blocs sont utilisées pour déterminer le pic de puissance (généralement le premier bloc) et le travail total (Figure 6).



**Figure 6: Test wingate découpé en blocs de 5 s par rapport à la mesure moyenne par révolution de pédale (emprunté à MacIntosh et al, 2003 [17])**

Selon MacIntosh et al. [17], cette méthode a toutefois tendance à sous-estimer le pic de puissance ainsi que le travail total, puisqu'il est possible qu'il y ait un intervalle de 5 secondes débutant entre l'un de ces blocs, qui aurait un pic de puissance plus élevé. Selon MacIntosh et al. [18], il faut donc utiliser les valeurs directes, et non les moyennes sur 5 secondes.

#### 1.2.4.4 Test incrémenté

Il est possible d'utiliser des tests incrémentés pour la mesure de la CTA. Ces tests sont comparables à ceux utilisés pour déterminer la consommation maximale d'oxygène. Le Maximal Anaerobic Running Test (MART) [39] est un exemple de ce type de mesure sur tapis. Le MART consiste à exécuter, jusqu'à épuisement, des sprints de 20 secondes sur tapis, avec 100 secondes de récupération entre chacun des essais. La pente du tapis est fixée à 4 °, et la vitesse initiale du tapis est de 3 à 5 m/s, dépendant du niveau de performance du sujet. La vitesse du tapis est ensuite augmentée de 0.38 m/s à chaque répétition, jusqu'à épuisement. La  $VO_2$  est mesurée tout au long du test, et la  $[La]_b$  est mesurée à la 40<sup>e</sup> seconde de chaque intervalle de repos. Le test est également précédé de 3 counter movement jumps (CMJ) où le temps de vol est mesuré. Tout de suite après la fin du dernier palier, ainsi qu'à 2.5 et 5

minutes, une prise  $[La]_b$  est effectuée, ainsi que 3 CMJ. La puissance mécanique étant difficile à mesurer sur tapis, la puissance est exprimée sous forme de demande en oxygène en utilisant la formule de l'American College of Sports Medicine (ACSM) [39, 40] :

$$\text{Demande } O_2 \text{ (ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}) = 12\cdot v \text{ (}\cdot\text{s}^{-1}) + 54\cdot \text{pente}\cdot v \text{ (m}\cdot\text{s}^{-1}) + 3.5 \quad (3)$$

La fiabilité du test est bonne avec une reproductibilité de  $r = 0.92$  ( $p < 0.001$ ) pour la puissance maximale [39]. Le MART a également été comparé au test de Wingate. Certaines des valeurs telles que la puissance maximale, la concentration de lactate maximale, la hauteur de saut au CMJ et la mesure du déficit en oxygène, ont un bon coefficient de corrélation avec les valeurs équivalentes au Wingate. Le MART est donc une mesure valide de la CTA sur tapis [40]. Le protocole du MART a été adapté pour les ergocycles, la puissance maximale mesurée sur ergocycle correspondant à celle obtenue sur tapis [41].

## 1.2.5 Modes de contraction musculaire

### 1.2.5.1 Mode iso-inertiel

Le mode de contraction «iso-inertiel» consiste à avoir une force gravitationnelle constante appliquée sur toute l'amplitude du mouvement. Il est à noter que le terme iso-inertiel est utilisé pour décrire un mouvement effectué avec un poids demeurant constant, mais que les forces appliquées lors de ce mouvement ne le sont pas. La majorité des mouvements sportifs sont de natures «iso-inertielle» [42]. La mesure de la force «iso-inertielle» représente donc un outil intéressant pour l'élaboration de programmes d'entraînement. Les contractions iso-inertielles peuvent être répertoriées sous deux grandes catégories, la force maximale et la puissance maximale. La force maximale «iso-inertielle» est souvent mesurée par des exercices de musculation à basses répétitions, tels que le test de 1 répétition maximale (1 RM) qui consiste à soulever la charge la plus élevée possible sur une seule répétition. Les tests de force maximale sont généralement effectués à vitesse lente et manquent donc de spécificité pour le sport. La mesure de la puissance «iso-inertielle» offre une avenue plus intéressante, puisque la composante de vitesse est prise en compte. Les méthodes de mesures sont nombreuses : on y retrouve le test Wingate, les différentes mesures force-vitesses, ainsi que plusieurs tests de saut [43]. Ces derniers représentent probablement la forme la plus simple de tests de puissance. Un effort maximal explosif est réalisé soit contre le poids

corporel, soit contre une charge supplémentaire. Traditionnellement on mesure la distance verticale ou horizontale. L'utilisation d'un ergomètre spécialisé permet d'obtenir des mesures instantanées du pic de puissance, du travail ainsi que la puissance moyenne sur plusieurs répétitions. Ces tests fournissent une mesure valide de la puissance, mais sont en général trop courts pour pouvoir mesurer adéquatement la CTA [24, 26, 34-36]. Le test de Bosco est un exemple de test de saut pouvant servir à la mesure de la capacité anaérobie [22]. Le test de Bosco consiste à sauter maximale pendant 60 secondes, d'une position de départ genoux fléchis à 90°, en gardant les mains sur les hanches. Le coefficient de reproductibilité de ce test a été établi à  $r = 0.95$  [22]. Le test de bosco a également été comparé au test de Wingate. Une corrélation a été établie entre certaines valeurs comparables des tests de Wingate et de Bosco, pour la puissance maximale absolue ( $r=0.89$ ,  $p<0.001$ ), ainsi que pour la puissance moyenne absolue ( $r=0.88$ ,  $p<0.001$ ) chez les hommes [44]. Le test de Bosco est donc un test intéressant qui pourrait fournir une mesure plus spécifique de puissance et de CA pour des athlètes sauteurs [44].

### **1.2.5.2 Mode isocinétique**

Le mode de contraction musculaire isocinétique consiste à maintenir une vitesse de mouvement constante sur toute l'amplitude de mouvement. Les dynamomètres isocinétiques fixent précisément la vitesse de mouvement et la résistance est assujettie à la capacité du sujet. Ces appareils permettent d'effectuer des mesures dans un grand nombre de conditions différentes [45]. Ils autorisent la sélection de la vitesse angulaire, l'amplitude de mouvement, le mode de contraction et permettent également d'isoler un groupe musculaire précis. Les dynamomètres isocinétiques mesurent le moment de force maximalé (MFM), le pic de puissance, la puissance moyenne ainsi que le travail total. Ils permettent d'effectuer des efforts maximaux dans un environnement très sécuritaire et représentent une approche intéressante pour l'évaluation physique des sportifs [45-48]. Les mesures isocinétiques sont traitées plus en détail dans la section 1.3.

### **1.2.5.3 Mode isométrique**

Le mode de contraction isométrique correspond à une contraction musculaire contre une charge qui ne se déplace pas. Les mesures isométriques exigent généralement que le sujet effectue une contraction maximale contre une résistance immobile. La force produite est mesurée au moyen d'une plateforme de force ou d'un tensiomètre. Les mesures isométriques permettent de quantifier la force maximale, ainsi que la vitesse à laquelle cette force maximale est produite. Bien que cette méthode de mesure soit simple, sécuritaire et très reproductible, la contraction isométrique ne reflète pas bien la capacité fonctionnelle du muscle, il est donc préférable de mesurer la performance musculaire de façon dynamique [49].

## **1.3 Isocinétisme**

### **1.3.1 Isocinétisme définition et place croissante dans l'évaluation des sportifs**

Un mouvement isocinétique est un exercice qui se fait à vitesse fixe, mais à résistance variable. La résistance s'adapte en fonction de l'effort du participant; plus la force développée par le participant est grande, plus la résistance de l'appareil augmente. Ce mode d'exercice permet d'accomplir un mouvement à une vitesse prédéterminée en fonction de l'exercice choisi. L'exploration isocinétique est utilisée dans la mesure de la performance depuis plus de 30 ans [46]. Le concept de l'isocinétisme pour l'entraînement et la mesure de la performance a été présenté par Hislop et Perrine [50]. L'utilisation d'un dynamomètre isocinétique est maintenant une méthode commune d'évaluation de la performance musculaire dynamique pour la population saine ou symptomatique [51]. Le dynamomètre isocinétique permet d'isoler un mouvement spécifique et de mesurer avec précision la force maximale de contraction volontaire, la relation force vitesse, la puissance maximale, ainsi que le travail. Il sert également à identifier les déséquilibres agonistes-antagonistes [46, 48, 52]. Le dynamomètre isocinétique est donc un outil de choix permettant l'évaluation des qualités musculaires et la prévention de blessures. Puisque le dynamomètre isocinétique permet d'effectuer des mouvements dynamiques dans un environnement sécuritaire et très contrôlé, il est un outil indispensable à la réadaptation et à l'évaluation de différentes conditions

pathologiques [48]. Plusieurs dynamomètres isocinétiques sont disponibles sur le marché, tels que le Cybex II, le Kin-Com ou le Biodex. Il est important de noter que la reproductibilité en mode concentrique est bonne, mais essentiellement pour des mesures effectuées sur un même type d'appareil [48, 52, 53]. Chacun de ces dynamomètres a besoin d'être étalonné de façon périodique afin de s'assurer de la reproductibilité et de la variabilité de la mesure [47].

## **1.3.2 Mesures isocinétiques**

### **1.3.2.1 Exploration de la force musculaire**

Le rôle des dynamomètres isocinétiques est de mesurer de nombreux différents paramètres, en isolant des chaînes musculaires et des mouvements spécifiques. La plupart des dynamomètres isocinétiques permettent des mesures à des vitesses comprises entre 0°/s (mesure isométrique) et 500°/s en mode concentrique et entre 0°/s et 300°/s en mode excentrique. L'amplitude de mouvement est contrôlée au moyen de butées électroniques choisies lors de la calibration [52]. Les différents paramètres mesurés sont traités en détail dans la section suivante, Analyse des paramètres chiffrés. Cette revue traitera essentiellement des fléchisseurs et extenseurs des genoux. L'un des avantages principaux du dynamomètre isocinétique est son adaptabilité. Cependant, une grande rigueur méthodologique est nécessaire pour garantir la validité et la reproductibilité des résultats [53]. L'échauffement, la position du sujet, l'absence d'information visuelle, ainsi que le poids du segment sont tous des facteurs importants dont l'examineur doit tenir compte [53]. Le dynamomètre isocinétique permet le développement d'un moment de force maximale (MFM) sur toute l'amplitude du mouvement, ce qui n'est pas possible avec un appareil isotonique. De plus, l'un des avantages importants des dynamomètres isocinétiques est leur utilisation pour des évaluations excentriques. L'appareil joue un rôle moteur en imposant un mouvement à une vitesse fixe auquel le sujet doit résister. Ce type d'évaluation apparaît intéressant pour l'étude des lésions au ligament antérieur croisé ou aux ischiojambiers [53-55]. L'évaluation de la force musculaire au moyen de dynamomètres isocinétiques permet de mesurer très précisément le travail dynamique lors d'un mouvement musculaire isolé. C'est donc une forme de mesure intéressante pour l'évaluation physique générale [52].

### 1.3.2.2 Analyse des paramètres chiffrés

Les dynamomètres isocinétiques de différentes marques fournissent en général les mesures suivantes : le MFM ou *Peak torque* en anglais, exprimé en newton-mètre (N·m) représente le moment de force le plus élevé produit au cours du mouvement isocinétique. Le MFM est le paramètre le plus utilisé et le plus reproductible dans l'exploration isocinétique [53]. Le travail total (W) correspond à l'intégrale de la surface sous la courbe. Il dépend de l'amplitude totale du mouvement. Les amplitudes extrêmes de mouvements sont à éviter puisque on y retrouve des erreurs importantes de mesure [48]. Le travail maximum est bien reproductible lorsque les amplitudes de travail sont respectées d'un test à l'autre [53, 54]. La puissance maximale ( $P_{\max}$ ), exprimée en watts, correspond au travail effectué par unité de temps :

$$P_{\max} = W \cdot t^{-1} \quad (4)$$

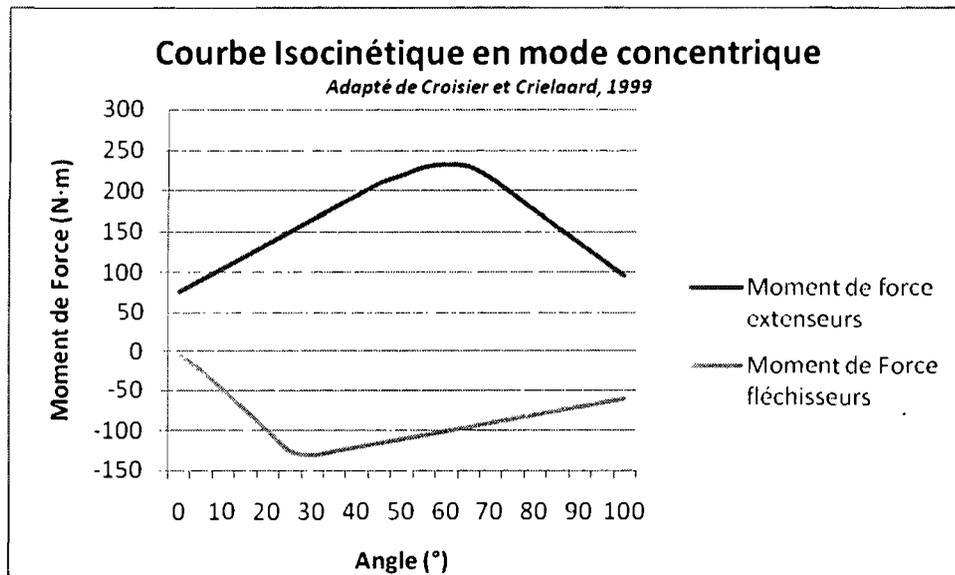
$$W_{\text{total}} = P_{\text{moy}} \cdot t \quad (5)$$

La puissance est également bien reproductible, mais puisque la composante de temps est intégrée il faut veiller à ce qu'un étalonnage précis de la vitesse soit réalisé avant la mesure [53, 54]. L'angle d'efficacité maximale (AEM), est, quant à lui, une mesure plus controversée possédant une reproductibilité moyenne sur le mouvement global [56], surtout pour les extrêmes de l'amplitude de mouvement [48]. Par contre, l'AEM des muscles extenseurs du genou présente une reproductibilité satisfaisante avec un coefficient de variation proche de 10 % [54]. Le rapport agonistes/antagonistes, dans le cas de l'articulation du genou, représente le rapport fléchisseurs/extenseurs, il est exprimé en pourcentage et est généralement calculé en fonction des MFM. Ce rapport peut aussi être calculé en fonction du travail et de la puissance. Il est important de noter que pour ce calcul, le mode de contraction et la vitesse angulaire doivent être les mêmes pour le mouvement de flexion et d'extension [54]. Ce rapport pour un effort concentrique/concentrique offre une variabilité assez élevée, et une reproductibilité moyenne [48], cela pourrait s'expliquer par la grande variabilité de mesure entre les différents dynamomètres isocinétiques [55, 57], ou par la reproductibilité moyenne des fléchisseurs du genou en mode concentrique [58]. Par contre, tel que proposé par Aagaard et al. [59, 60], en calculant le rapport fléchisseurs excentriques/extenseurs concentriques du genou on obtient une reproductibilité beaucoup plus élevée [55, 60]. La différence bilatérale entre les groupes musculaires se calcule quant à elle à partir de la mesure du MFM de chaque côté et s'exprime en pourcentage. Cette mesure permet la

détection précise de déséquilibres fonctionnels entre les groupes musculaires bilatéraux [46]. La dernière mesure obtenue est la durée d'accélération, exprimée en secondes, elle représente le temps requis pour arriver à la vitesse angulaire fixée par l'appareil. Cette mesure a par contre un coefficient de variation très élevé (plus de 50%) et ne doit donc pas être utilisée pour une interprétation scientifique [54]. Il est à noter que la variation observée entre deux épreuves isocinétiques, bien que faible, pourrait être affectée en grande partie soit : par la motivation du sujet, soit par l'apprentissage neuromoteur du mouvement [54]. Afin de pouvoir reproduire un effort dans les mêmes conditions, il est à noter qu'il est préférable de accorder une période de 48 heures entre deux mêmes mesures d'effort de type concentrique [61]. Par contre, puisque des sensations importantes de courbature, ou *delayed onset muscle soreness* (DOMS), surviennent suite à un effort de type excentrique, il est important d'accorder une récupération plus longue, soit jusqu'à deux semaines avant de pouvoir reproduire ce même type d'effort [54].

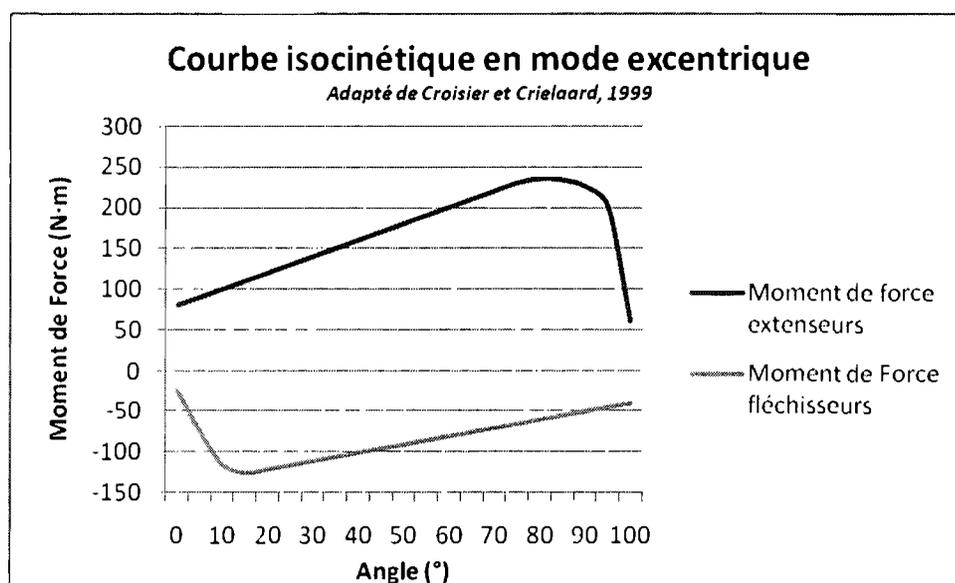
### **1.3.2.3 Analyse des courbes**

Les courbes obtenues lors d'un mouvement effectué sur un dynamomètre isocinétiques sont une illustration de l'efficacité de la contraction musculaire. Elles permettent de mettre en évidence les relations de force-vitesse et de tension-longueur du muscle in vivo [48, 62]. Les courbes isocinétiques mettent en relation la force développée (N·m) et la position angulaire (en degrés) du membre au cours du mouvement. Une courbe isocinétique normale pour les extenseurs et fléchisseurs du genou met en évidence, sur la partie supérieure, les muscles extenseurs du genou et, sur la partie inférieure, les muscles fléchisseurs du genou (Figure 7 et 8).



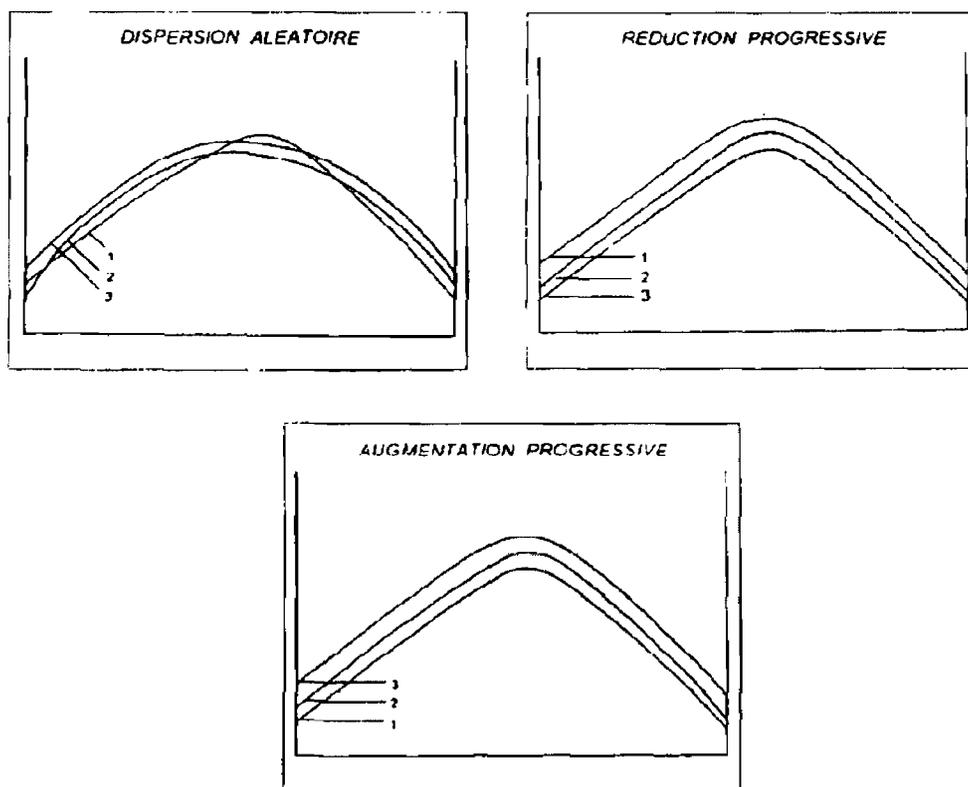
**Figure 7: Courbe isocinétique normale en mode concentrique**

Une courbe concentrique (figure 7) est en forme de parabole. Le MFM se situe vers le milieu de la courbe, traduisant un allongement musculaire moyen qui permet le plus de contact entre les filaments d'actine et de myosine. Pour une courbe excentrique (Figure 8), on observe un développement progressif de la force. Le MFM se retrouve donc vers la fin du mouvement en raison de l'utilisation des structures élastiques du muscle.



**Figure 8: Courbe isocinétique normale en mode excentrique**

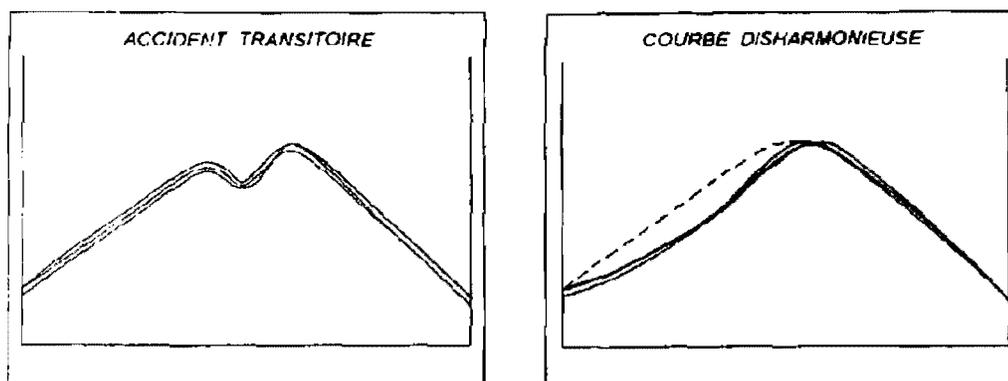
L'analyse de ces courbes, répertoriée sur des bases cliniques, permet de déceler des anomalies dans le mouvement. Les différentes courbes peuvent donc aider à diagnostiquer différents troubles pathologiques. La première de ces anomalies facilement décelables est la non-superposition des courbes (Figure 9). Ce phénomène peut être expliqué soit une mauvaise compréhension du protocole par le sujet dans le cas d'une dispersion aléatoire, soit par un mauvais apprentissage du mouvement par le sujet. Dans le cas d'un échauffement incomplet, on peut observer une augmentation progressive des courbes. À l'opposé, on peut constater une diminution progressive des courbes et cela peut être dû soit à la présence d'une pathologie soit, simplement à une fatigue physiologique en raison du type d'effort réalisé [62].



**Figure 9: Exemples de non-superposition des courbes, (emprunté à Croisier et Crielaard, 1999 [62])**

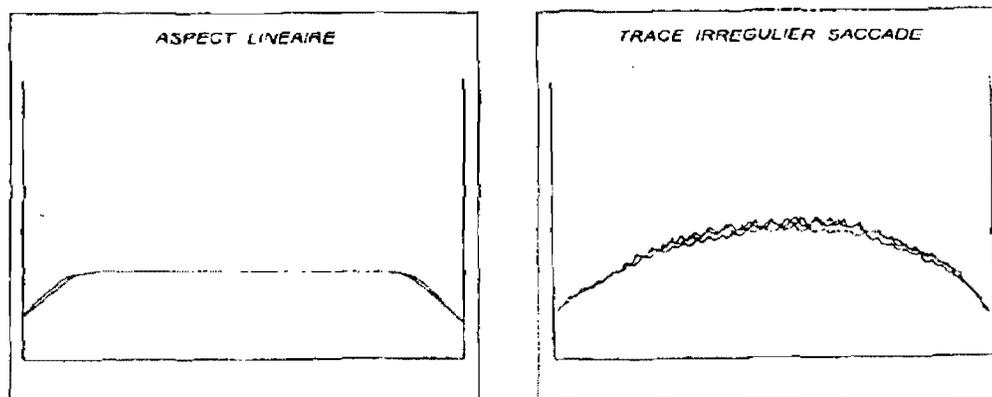
Par contre, lorsque les courbes sont correctement superposées (Figure 10 et 11), témoignant ainsi une bonne reproductibilité de l'effort, on peut observer d'autres anomalies, telles qu'un accident transitoire, c'est-à-dire une perte de force à un endroit précis du mouvement limité à

moins de 40 % de l'amplitude totale. Un accident transitoire est souvent synonyme de syndromes rotuliens. Lorsque cette perte de force est supérieure à 40 % de l'amplitude, on observe une courbe disharmonieuse, synonyme de dysfonction articulaire majeure.



**Figure 10: Anomalie de courbes (emprunté à Croisier et Crielaard, 1999 [62])**

Lorsqu'une perte de force majeure survient, on observe une courbe à l'aspect linéaire (Figure 11). Dans le cas d'un tracé irrégulier ou saccadé (Figure 11), une courbe de ce type peut être synonyme d'une amyotrophie majeure, ou d'une pathologie neurologique.



**Figure 11 Anomalie de courbes (emprunté à Croisier et Crielaard, 1999 [62])**

L'intérêt diagnostique des courbes est assez controversé, mais l'analyse des vitesses ainsi que l'angle auxquel ces anomalies se produisent peuvent être des informations très utiles afin d'établir les différentes modalités de réadaptation [62].

### **1.3.3 Mesures isocinétiques en milieu sportif**

Le dynamomètre isocinétique a été initialement développé essentiellement dans un but de renforcement musculaire en réadaptation. Progressivement, son champ d'action s'est étendu, et on le retrouve maintenant comme un élément central de l'évaluation de la performance musculaire [63]. De plus en plus, l'isocinétisme ne se limite plus à l'évaluation clinique, mais sert également dans les milieux sportifs de haut niveau. Le dynamomètre isocinétique peut servir à la détermination du profil de différentes populations athlétiques [64]. Cometti et al. [65], ont démontré que les joueurs de soccer professionnels de ligue 1 en France, avaient une meilleure force excentrique des fléchisseurs que des joueurs de niveau inférieur. Le Gall et al. [66], ont décrit les paramètres de force isocinétique chez des joueurs de soccer en fonction de leur âge et de leur niveau. Dauty et al. [67], ont, quant à eux, démontré un lien entre la performance au sprint de 10 mètres départ-arrêté et la force isocinétique concentrique à 180°/s des extenseurs de la jambe. Signorile et al. [68], ont démontré une corrélation significative entre la vitesse maximale de déplacement d'une balle au tennis et les mesures de MFM, puissance moyenne et de travail total mesurées sur dynamomètre isocinétique. Özçakar et al. [69], suggèrent l'utilisation de l'évaluation isocinétique musculaire du genou afin d'aider à déterminer la condition physique de joueurs de soccer de haut niveau. Bosquet et al. [58], ont également démontré que, lors d'un test de flexion-extension concentrique du genou, la mesure du travail, du MFM ainsi que de l'index de fatigue des extenseurs était un moyen valide d'évaluer l'endurance musculaire. L'utilisation de l'évaluation isocinétique représente donc une forme de mesure intéressante pour la prédiction de la performance et le suivi physique de l'athlète.

#### **1.3.3.1 Paramètres normatifs des fléchisseurs et extenseurs du genou**

L'utilisation du dynamomètre isocinétique pour l'évaluation musculaire du genou étant très répandue, des mesures de référence ont été établies pour différentes populations. Freedson et al. [70], ont présenté des normes de pic de force des fléchisseurs et extenseurs du genou, classées par groupe d'âge et sexe (Tableau 2 et 3). Ces mesures ont été réalisées aux États-Unis auprès de 4 541 hommes et femmes (de 17 à 62 ans) afin d'établir des normes qui permettraient de prévenir différents types de blessures pour les employés dans le secteur industriel [70].

Angular velocity	Percentile	<21 years		21-30 years		31-40 years		41-50 years		>50 years	
		F	E	F	E	F	E	F	E	F	E
60 °/s	90	163.7	255.2	171.5	267.8	163.5	256.3	159.3	240.0	143.7	222.0
	70	139.0	225.2	149.8	233.2	143.7	218.7	139.0	214.1	129.1	198.0
	50	126.1	203.4	133.6	209.5	130.2	196.6	125.2	189.8	111.9	171.9
	30	113.9	185.1	120.7	188.5	116.1	177.6	118.0	172.5	101.8	152.8
	10	101.8	156.3	103.7	162.7	98.9	152.3	97.1	148.5	88.1	126.9
180 °/s	90	114.9	150.5	118.0	153.2	111.2	142.1	109.7	133.6	94.4	115.7
	70	98.3	129.5	102.4	132.9	96.3	122.0	91.5	111.9	81.8	101.6
	50	89.5	116.6	92.2	118.7	87.5	108.5	83.0	99.7	71.9	90.9
	30	73.9	105.1	82.0	106.4	78.6	95.6	72.5	89.0	67.1	74.2
	10	67.5	90.9	69.2	90.9	63.1	79.3	61.7	73.9	53.3	59.0
300 °/s	90	97.2	107.4	96.7	108.8	90.2	101.0	85.4	92.9	76.3	86.5
	70	81.4	92.9	81.4	91.5	76.6	84.1	73.2	76.6	65.1	70.4
	50	71.9	82.0	71.9	80.7	67.8	72.5	64.4	65.8	59.0	60.7
	30	63.1	72.5	63.7	70.5	59.0	63.1	55.6	56.3	50.3	46.2
	10	51.3	61.0	52.2	58.7	47.4	50.9	43.4	45.4	40.0	34.6

**Tableau 2: Normes masculines pour le pic de force pour les fléchisseurs (F) et extenseurs (E) du genou (emprunté de Freedson et al. 1993 [70])**

Angular velocity	Percentile	<21 years		21-30 years		31-40 years		41-50 years		>50 years	
		F	E	F	E	F	E	F	E	F	E
60 °/s	90	101.2	160.0	108.5	176.3	109.8	167.9	105.8	152.3	93.2	120.4
	70	90.2	144.4	94.2	149.8	94.1	148.2	91.8	129.5	77.0	109.7
	50	82.7	132.9	86.8	135.6	84.1	131.5	84.1	120.7	69.2	106.4
	30	74.6	120.0	79.3	123.4	76.6	118.7	73.9	109.6	55.5	91.8
	10	62.4	103.1	67.8	105.1	64.8	100.8	61.7	98.0	46.5	67.1
180 °/s	90	71.2	90.2	71.2	92.2	69.6	87.5	62.1	75.5	51.1	60.7
	70	60.3	78.0	64.4	80.4	60.3	73.9	55.6	63.7	47.7	51.8
	50	54.9	70.5	57.6	71.9	53.3	65.1	50.2	56.3	39.3	40.0
	30	48.1	65.1	51.5	63.1	47.9	57.0	45.4	50.2	30.4	35.0
	10	40.0	52.9	42.0	52.7	38.6	47.2	36.2	42.8	14.1	23.3
300 °/s	90	57.0	63.1	59.0	63.2	54.9	58.7	50.0	50.0	42.8	42.3
	70	48.8	52.9	50.2	53.6	46.6	47.5	44.3	40.7	39.5	32.5
	50	43.4	46.8	44.7	46.8	40.7	40.7	38.0	38.0	29.2	23.7
	30	37.3	41.4	38.6	40.7	35.9	34.6	33.2	29.8	25.1	19.0
	10	28.5	34.6	31.9	32.5	28.5	27.8	25.8	25.1	11.9	6.8

**Tableau 3: Normes féminines pour le pic de force pour les fléchisseurs (F) et extenseurs (E) du genou (emprunté de Freedson et al. 1993 [70])**

Neder et al. [71] ont déterminé que 84% de la variabilité mesurée lors de tests isocinétiques de puissance ou de MFM du genou était affectée par l'âge, le poids, la taille ainsi que le niveau de forme physique de l'individu. Neder et al. [71], ont également présenté des équations permettant de prédire le MFM, le Travail et la puissance isocinétique pour une population sédentaire âgée de 20 à 80 ans. (Tableaux 4 et 5).

Variable	Sex*	Age (y)	Height (cm)	Weight (kg)	Physical activity score†	Constant	R <sup>2</sup>	SEE
Peak torque (Nm)								
Right Leg (sex, age, height, and weight)‡	34.44	-1.53	1.33	0.75	—§	-66.44	0.815	21.33
Left Leg (sex, age, height, weight, and activity)‡	35.13	-1.27	1.27	0.92	4.75	-116.42	0.847	19.26
Total work (J)								
Right Leg (sex, age, height, and weight)‡	31.81	-1.50	1.90	0.77	—	-150.88	0.777	24.45
Left Leg (sex, age, height, weight, and activity)‡	29.68	-1.28	1.80	0.91	5.07	-192.26	0.823	21.79
Set total work (J)								
Right Leg (sex, age, weight, and activity)‡	468.36	-21.81	—	7.67	73.11	1160.14	0.747	314.09
Left Leg (sex, age, weight and activity)‡	355.55	-19.14	—	11.85	83.83	732.20	0.721	307.62
Average power (W)								
Right Leg (sex and age)‡	79.17	-2.83	—	—	—	280.68	0.575	56.87
Left Leg (sex, age, and weight)‡	55.90	-3.03	—	1.46	—	197.76	0.607	54.44
Torque acceleration energy (Nm)								
Right Leg (sex, age, and height)‡	10.87	-0.39	0.47	—	—	-27.25	0.759	6.28
Left Leg (sex, age, height, and weight)‡	8.86	-0.39	0.45	0.20	—	-35.51	0.811	5.88

R<sup>2</sup> = coefficient of determination; SEE = standard error of the estimate

\* Coded as males = 1 and females = 0

† Sum of occupational, sports, and leisure habits scores by questionnaire

‡ Significant predictors of knee extensor strength

§ Blank spaces indicate a nonsignificant effect for the independent variable in question

**Tableau 4: Équation de prédiction de différents paramètres isocinétiques pour les extenseurs du genou (Neder et al. 1999 [71])**

Variable	Sex*	Age (y)	Height (cm)	Weight (kg)	Physical activity score†	Constant	R <sup>2</sup>	SEE
Peak torque (Nm)								
Right leg (sex, age, height, and weight)‡	25.85	-0.63	0.67	0.37	—§	-37.74	0.740	14.34
Left leg (sex, age, weight and activity)‡	30.32	-0.55	—	0.57	4.71	19.03	0.770	13.75
Total work (J)								
Right leg (sex, age, height, and weight)‡	28.97	-0.87	0.84	0.44	—	-46.72	0.681	20.30
Left leg (sex, age, weight, and activity)‡	34.18	-0.76	—	0.66	6.18	23.47	0.724	18.72
Set total work (J)								
Right leg (sex and age)‡	410.41	-13.62	—	—	—	1261.21	0.578	280.07
Left leg (sex, age, weight and activity)‡	321.72	-10.72	—	4.38	74.07	272.71	0.670	226.96
Average power (W)								
Right leg (sex and age)‡	58.14	-1.71	—	—	—	165.43	0.467	46.49
Left leg (sex, age, and activity)‡	46.66	-1.47	—	—	11.36	74.12	0.580	36.76
Torque acceleration energy (Nm)								
Right leg (sex and age)‡	11.25	-0.26	—	—	—	28.72	0.634	5.73
Left leg (sex, age, height, and activity)‡	7.90	-0.19	0.20	—	1.11	-13.55	0.723	4.46

R<sup>2</sup> = coefficient of determination; SEE = standard error of the estimate

\* Coded as males = 1 and females = 0

† Sum of occupational, sports, and leisure habits scores by questionnaire

‡ Significant predictors of knee flexor strength

§ Blank spaces indicate a nonsignificant effect for the independent variable in question

**Tableau 5: Équation de prédiction de différents paramètres isocinétiques pour les fléchisseurs du genou (Neder et al. 1999 [71])**

Croisier [54] s'est, quant à lui, concentré sur la détermination des normes permettant de différencier des valeurs isocinétiques normales de valeurs pathologiques. Des valeurs

extrêmes pour le MFM, la différence bilatérale et le ratio fléchisseurs/extenseurs sont présentés dans la Tableau 6.

Modes et vitesses	MFM/kg ( $N \cdot m \cdot kg^{-1}$ ) (<)		Différence bilatérale (%) (>)		Ratio FI/Q (<)	
	Q	FI	Q	FI		
Concentrique						
60°·s <sup>-1</sup>	2,09	1,14	14	14	C/C	0,47
240°·s <sup>-1</sup>	1,53	0,82	16	16		0,46
Excentrique						
30°·s <sup>-1</sup>	2,85	1,41	14	18	E/E	0,38
120°·s <sup>-1</sup>	2,92	1,41	18	12		0,36
					E <sub>30</sub> /C <sub>240</sub>	0,80

Q: quadriceps; FI: fléchisseurs; C: mode concentrique; E: mode excentrique.

**Tableau 6: Valeurs extrêmes pour les paramètres isocinétiques : limite inférieure (<) pour le MFM/kg et le rapport fléchisseur/extenseur; limite supérieure (>) pour la différence bilatérale en pourcentage (emprunté à Croisier et Crielaard, 1999 [54])**

Plusieurs normes et paramètres normatifs ont été présentés dans la littérature, mais ces paramètres se consacrent surtout à différencier le pathologique du normal et s'adressent le plus souvent à une population sédentaire. Les mesures isocinétiques sont de plus en plus utilisées dans le domaine sportif, c'est maintenant une méthode de choix pour la mesure de la force musculaire et la détermination de déséquilibres bilatéraux ou agonistes/antagonistes. Il serait donc intéressant de se servir du dynamomètre isocinétique pour mesurer les puissances de travail de différents athlètes.

### 1.3.4 Mesure de la capacité de travail anaérobie

Driss et al. [72], ont démontré une bonne corrélation entre le MFM et  $P_{max}$ , mesuré lors d'une extension isocinétique du genou à 90°/s, 180°/s et 240°/s, et la force de freinage maximale ( $F_0$ ) ainsi que la  $P_{max}$  mesurée lors d'un test force-vitesse utilisant le protocole de Vandewalle et al. [24, 28]. Selon Green [11], la quantité de fibre de type II présente dans le muscle est un facteur important de la CA et de la CTA. La quantité de fibre de type IIA et IIB présente dans le muscle est corrélée avec la puissance moyenne au test de Wingate 30 s [37]. Puisque pour des vitesses élevées (180°/s et plus), il existe une corrélation satisfaisante entre le pic de force et le pourcentage de fibres de type II [53], le dynamomètre isocinétique pourrait être une autre façon intéressante de mesurer la CA et la CTA. Brown, et al. [73] ont comparé un test de

30 secondes de flexion-extension isocinétique bilatérale du genou à  $180^\circ/s$  à un test de Wingate 30 s. Une corrélation importante a été démontrée entre le pic de puissance ( $r=0.84$ ;  $p<0.05$ ), la puissance moyenne ( $r=0.54$ ;  $p<0.05$ ), et le coefficient de diminution en watts par seconde ( $r=0.62$ ;  $p<0.05$ ). L'un des chercheurs associés à ce projet, le Pr Jean Louis Croisier, est spécialisé dans l'évaluation isocinétique des joueurs de soccer professionnels des plus grands clubs européens. En plus des tests classiques, il utilise également un test isocinétique à répétition constante de 30 contractions unilatérales concentriques maximales consécutives en flexion et extension du genou, à une vitesse angulaire de  $180^\circ.s^{-1}$  pour évaluer la CTA. Bien que la validité de fait (*logical validity*) de ce test ne fasse pas de doute (il dure entre 30 et 35 secondes), les résultats obtenus n'ont jamais été comparés à ceux obtenus par les méthodes existantes. L'objectif de la présente étude est de valider ce test. En l'absence de mesure de référence (Gold Standard) de la CA ou de la CTA, les résultats de ces tests seront comparés à la performance au test de Wingate.

### ***Question de recherche :***

Le travail total réalisé au cours de 30 contractions concentriques maximales consécutives en flexion et extension du genou, à une vitesse angulaire de  $180^\circ.s^{-1}$ , est-il une mesure valide de la capacité de travail anaérobie?

## **2 Méthodologies**

### **2.1 Sujets**

Les sujets ont été recrutés par voie d'affichage au département de Kinésiologie et au Centre d'éducation physique et des sports de l'Université de Montréal ainsi que par annonces passées sur le site de la Fédération québécoise de sports cyclistes. Les critères d'inclusion et de non inclusion suivants ont été vérifiés lors d'un contact téléphonique.

#### **Critères d'inclusion**

- Hommes âgés de 18 à 40 ans
- Suivre un entraînement sportif au moins deux fois par semaine
- Être disponible pour toute la durée de l'étude

#### **Critères de non-inclusion**

- Contre-indication médicale à la pratique d'une activité physique
- Antécédents de lésions (ligamentaires, musculotendineuses ou ostéocartilagineuses) à proximité de l'articulation du genou
- Sujets sous traitement médical au cours de l'étude
- Présence d'une pathologie somatique ou psychiatrique évolutive connue

Une réunion d'information a été organisée au préalable afin d'expliquer précisément l'étude aux sujets intéressés et potentiellement admissibles. Les formulaires d'information et de consentement ont été signés par les volontaires qui ont eu l'occasion de demander toutes les explications nécessaires. Vingt-six sujets masculins spécialistes de cyclisme sur route, vélo de montagne ou triathlon (catégorie provinciale ou supérieure) ont accepté de prendre part à l'étude. Vingt sujets ont achevé les tests, 6 ont abandonné avant d'avoir terminé l'étude pour des raisons inconnues. Les données anthropométriques des sujets ayant poursuivi jusqu'à la fin de l'étude sont présentées dans le tableau 7.

<b>Nombre de sujets</b>	n=20
<b>Âge</b>	30.1 (6.2)
<b>Poids (kg)</b>	71.9 (7.7)
<b>Taille (cm)</b>	178.5 (5.6)
<b>Somme 4 plis adipeux (mm)</b>	28.3 (6.6)
<b>Pourcentage Masse Grasse (%)</b>	13.4 (3.1)

**Tableau 7: Données anthropométriques (n=20). Données rapportées sous forme de moyenne (écart type)**

## **2.2 Mesures**

Le test isocinétique a été réalisé à l'école de réadaptation de l'Université de Montréal. Tous les autres tests ont été faits au laboratoire de physiologie de l'exercice du département de Kinésiologie de l'Université de Montréal. Une durée minimale de 48 heures était prévue entre chaque test. L'ordre des tests a été randomisé selon une procédure déterminée par les expérimentateurs et tiré au sort au moment de l'inclusion de chaque sujet lors de la réunion d'information. Compte tenu du fait que le test force-vitesse et celui de Wingate sont réalisés successivement au cours de la même session, nous disposons de 6 combinaisons possibles.

### **2.2.1 Test isocinétique**

Le test isocinétique est réalisé sur un dynamomètre Biodex System 3 (Biodex Medical Systems, Shirley, New York). Les sujets sont assis sur le dynamomètre, le tronc incliné à 85°. Ils sont stabilisés au niveau des épaules, du bassin et de la cuisse au moyen des ceintures prévues à cet effet, fixées sur le dynamomètre. Le test est unilatéral la mesure étant effectuée sur la jambe dominante du sujet. Le point de fixation de la jambe au bras du dynamomètre est ajusté 3 cm au dessus de la malléole; l'axe de rotation du dynamomètre est aligné avec l'axe de rotation du genou lorsque celui-ci est fléchi à 90°. L'amplitude du mouvement est fixée à 100° de flexion à partir de l'extension maximale active. Avant que le test proprement dit ne commence, les sujets réalisent 10 contractions concentriques sous-maximales d'intensité croissante à une vitesse angulaire de 120°.s<sup>-1</sup>. L'objectif est de les familiariser à ce type de tâche particulier et au système. Après une récupération de 1 minute, au cours de laquelle les consignes lui sont données, le sujet effectue une à deux contractions concentriques sous-

maximales afin de se familiariser avec la vitesse angulaire du test ( $180^{\circ}.s^{-1}$ ). Les sujets réalisent ensuite 30 contractions concentriques maximales (en veillant à ce que les premières répétitions soient réellement maximales) consécutives en flexion et extension du genou, à une vitesse angulaire de  $180^{\circ}.s^{-1}$ .

### **2.2.2 Test incrémenté**

Le test incrémenté est réalisé sur une bicyclette ergométrique à freinage électromagnétique (Lode Excalibur Sport, Groningen, Hollande). Après un échauffement de 5 minutes à une puissance de 100 watts et une cadence proche de 100 révolutions par minute (rpm), la puissance est fixée à 150 watts ( $\pm 30$  watts), la puissance augmente ensuite par incréments de 30 watts toutes les 2 minutes jusqu'à épuisement.

### **2.2.3 Test force-vitesse**

Le test force-vitesse est réalisé sur une bicyclette ergométrique à freinage électromagnétique. L'échauffement dure 8 minutes au total. Il comprend une période de 5 minutes à une puissance de 100 watts et une cadence proche de 100 rpm, puis 3 sprints de 3 secondes contre une charge de 0.7, 0.8 et 0.9 Nm/kg de masse corporelle, séparés par 50 secondes de récupération active. Une période de repos de 5 minutes est prévue entre l'échauffement et le test. Il est demandé au sujet de pédaler le plus vite possible pendant 6 secondes contre 4 à 6 charges différentes : 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4 Nm/kg de masse corporelle. Entre chaque exercice, le sujet bénéficie d'une période de repos actif de 2 minutes et d'un repos passif de 3 minutes. Le test prend fin dès qu'une baisse de puissance significative est observée.

### **2.2.4 Test de Wingate**

Le test de Wingate est réalisé sur une bicyclette ergométrique à freinage électromagnétique. Il fait suite au test force-vitesse. Une récupération de 10 minutes est prévue entre les deux tests (2 minutes de récupération active à 100 watts, et 8 minutes de

récupération passive). Il est ensuite demandé au sujet de pédaler le plus vite possible pendant 30 secondes contre la charge qui lui a permis de produire sa puissance maximale au cours du test force-vitesse.

### **2.2.5 Mesure des paramètres mécaniques**

Les mesures de force, de puissance et de travail sont données par les logiciels qui accompagnent les différents ergomètres. Le dynamomètre isocinétique employé pour effectuer ces mesures est un Biodex System 3 (Biodex Medical Systems, Shirley, New York), qui emploie une fréquence d'échantillonnage de 100 Hz. L'ergocycle utilisé (Lode Excalibur Sport, Groningen, Hollande), emploie quant à lui une fréquence d'échantillonnage de 5 Hz.

### **2.2.6 Mesure des paramètres ventilatoires**

Les paramètres ventilatoires et les échanges gazeux sont mesurés en circuit ouvert (Moxus, AEI Technologies, Pittsburgh, États-Unis) au cours du test incrémenté. Le débit ventilatoire ( $\dot{V}E$ ), la consommation d'oxygène ( $\dot{V}O_2$ ) et la production de gaz carbonique ( $\dot{V}CO_2$ ) sont mesurés toutes les 30 secondes.

## ***2.3 Méthode d'analyse des paramètres mesurés***

### **2.3.1 Test isocinétique**

Sur la base de l'épreuve isocinétique de résistance à la fatigue décrite au point 2.2.1, les paramètres suivants ont été analysés : le pic de puissance, le travail maximal, le travail total et la puissance moyenne. Chacun de ces paramètres mesurés sur la jambe dominante du sujet est analysé individuellement pour les extenseurs, les fléchisseurs ainsi que la somme isocinétique des extenseurs et des fléchisseurs. Par exemple pour le pic de puissance : somme isocinétique (fléchisseurs/extenseurs) = pic de puissance extenseurs + pic de puissance fléchisseurs.

### 2.3.2 Test incrémenté

Deux variables sont mesurées : la consommation maximale d'oxygène ( $\dot{V}O_2 \text{ max}$ ) et la puissance aérobie maximale (PAM). La  $\dot{V}O_2 \text{ max}$  est considérée comme atteinte lorsqu'un plateau de  $\dot{V}O_2$  (augmentation inférieure à  $2.1 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) est observé malgré une augmentation de la puissance de 30 watts. Si ce critère n'est pas respecté, les critères secondaires d'atteinte de la  $\dot{V}O_2 \text{ max}$  sont : un épuisement apparent du sujet, un quotient respiratoire supérieur à 1.15 et un pic de lactatémie (concentration la plus élevée au cours des 5 premières minutes de la récupération) supérieur à  $8 \text{ mmol}\cdot\text{l}^{-1}$  [74]. La PAM est calculée à partir de la durée maintenue dans le dernier palier au moyen de la formule suivante [75] :

$$PAM = a + \left( b * \frac{c}{d} \right)$$

où *PAM* est la puissance aérobie maximale (watts), *a* la puissance du dernier palier complété (watts), *b* l'incrément de puissance (watts), *c* la durée maintenue lors du dernier palier (secondes) et *d* la durée des paliers (secondes).

### 2.3.3 Test de Wingate

Les paramètres suivants sont recueillis et analysés : le pic de puissance et la puissance moyenne et le travail total.

### 2.3.4 Analyse statistique

L'analyse des paramètres mesurés est réalisée au moyen du logiciel Statistica (Statsoft, Tulsa, États-Unis, version 6.0). La normalité de la distribution des paramètres étudiés est vérifiée au moyen du test Shapiro-Wilk et l'homoscédasticité au moyen du test modifié de Levenne. Un test t pour échantillons dépendants (ou un test de Wilcoxon lorsqu'une des deux conditions – normalité de la distribution et homoscédasticité – n'était pas vérifiée) a été utilisé pour comparer les résultats obtenus au test isocinétique et au test de Wingate. Le niveau d'association entre les variables a été vérifié au moyen du coefficient de corrélation du produit des moments de Pearson (ou du coefficient de corrélation des rangs

de Spearman lorsqu'une procédure non paramétrique devait être utilisée). Les limites d'accord à 95 % ont été calculées selon la méthode de Bland et Altman pour les variables pertinentes. Un risque de 5 % a été retenu pour toutes les analyses.

### 3 Résultats

#### 3.1 Mesures au test de Wingate

Comme présenté dans la figure 12, le pic de force à 5 Hz (1369.85 watts ; SD=122.69) est plus élevé que le pic de puissance à 0.2 Hz (1135.11 watts ; SD=120.962). On observe une différence significative ( $p < 0.001$  ; ES=1.93) entre le pic de puissance mesuré à 5 Hz et la moyenne des 5 premières secondes, équivalant à un échantillonnage à 0.2 Hz. La puissance moyenne (743.75 ; SD=96.68), par contre, est identique pour les deux échantillonnages différents.

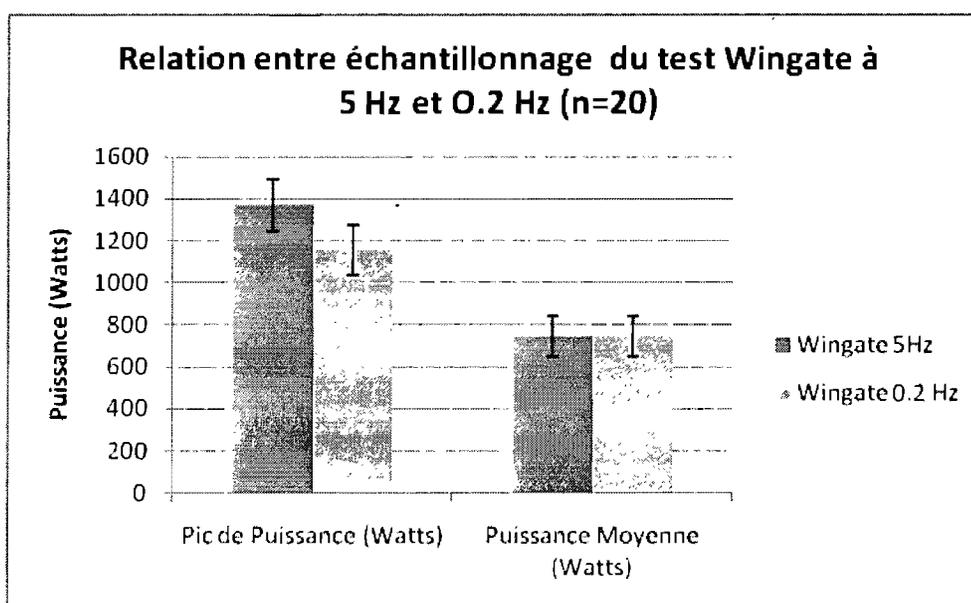


Figure 12: Relation entre échantillonnage du test de Wingate à 5 Hz et 0.2 Hz

#### 3.2 Mesures isocinétiques fléchisseurs/extenseurs

Les mesures du test isocinétique sont présentées dans la figure 13. Une ANOVA à mesures répétées a permis de mettre en évidence que chaque condition est différente de l'autre :

Somme fléchisseurs/extenseurs > extenseurs > fléchisseurs

Les extenseurs produisent un travail max de 172.08 Nm (SD=32.97), une puissance max de 269.40 watts (SD=54.193) et une puissance moyenne sur les 30 extensions de 210.13 watts (SD=36.65). Les muscles fléchisseurs ont un travail maximal de 92.59 Nm (SD=26.441),

une puissance maximale de 137.93 watts (SD=42.56) et une puissance moyenne sur les 30 flexions de 104.87 watts (SD=30.38). Toutes les valeurs des muscles fléchisseurs sont plus faibles que celles des extenseurs. On observe une différence significative ( $p < 0.001$  ; EF=3.14) entre la puissance moyenne produite lors de la flexion par les muscles ischiojambiers et la puissance moyenne produite lors de l'extension des quadriceps.

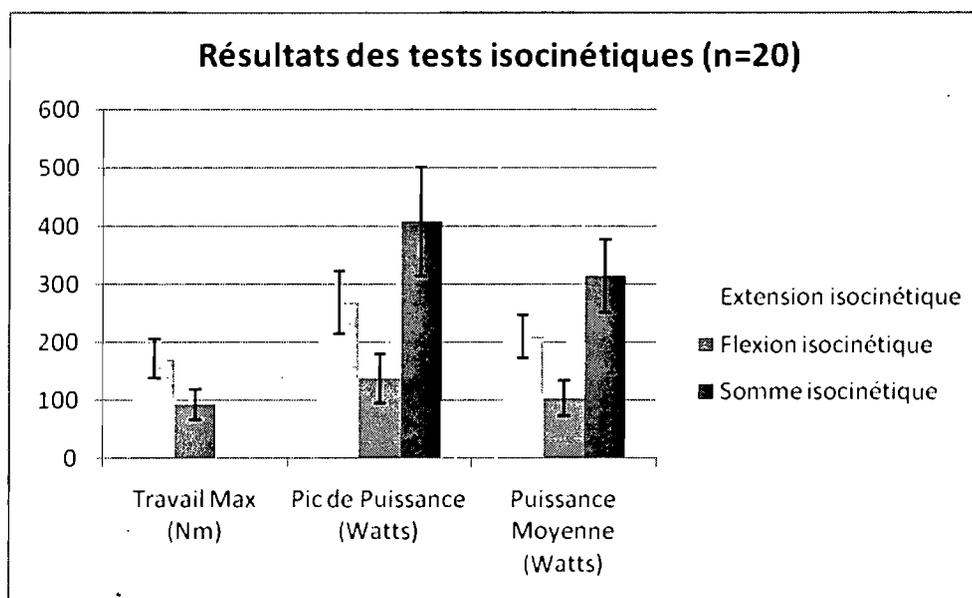


Figure 13: Résultats des tests isocinétiques

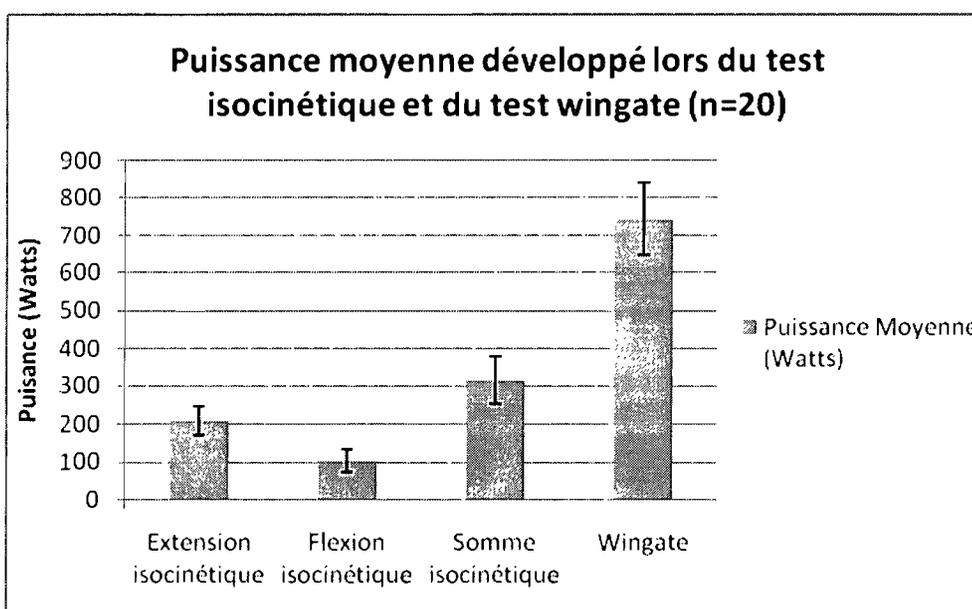


Figure 14: Puissance moyenne développée lors du test isocinétique et du test de Wingate

### 3.3 Corrélation entre la puissance moyenne isocinétique des extenseurs et la puissance moyenne au Wingate

Comme présenté sur la figure 14, on observe une différence significative ( $p < 0.001$  ;  $ES = 8.00$ ) entre la puissance moyenne isocinétique des extenseurs (210.13 watts ;  $SD = 36.65$ ), et la puissance moyenne au test de Wingate (743.75 ;  $SD = 96.68$ ). Ces deux valeurs (figure 15A) ont une corrélation significative ( $p < 0.05$ ) avec un coefficient de corrélation de 0.83.

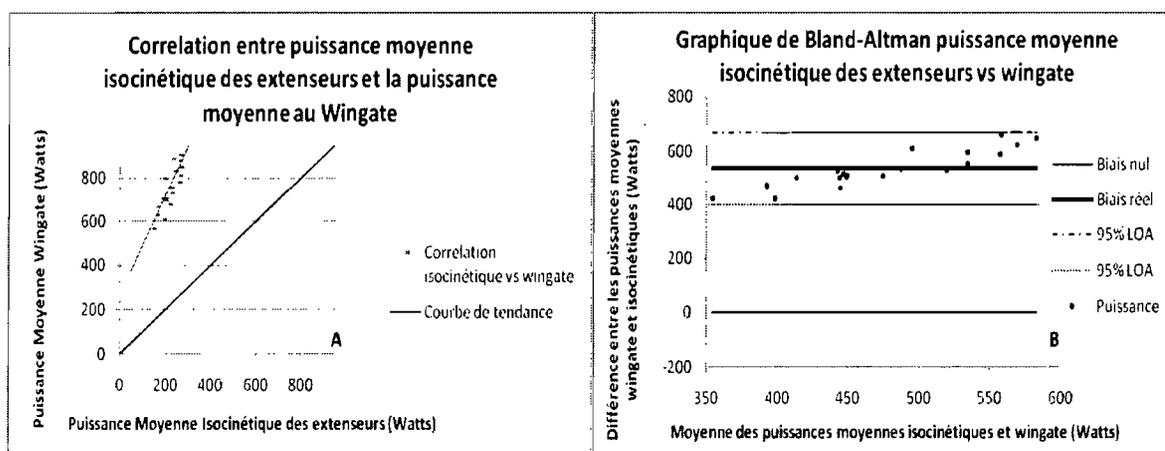
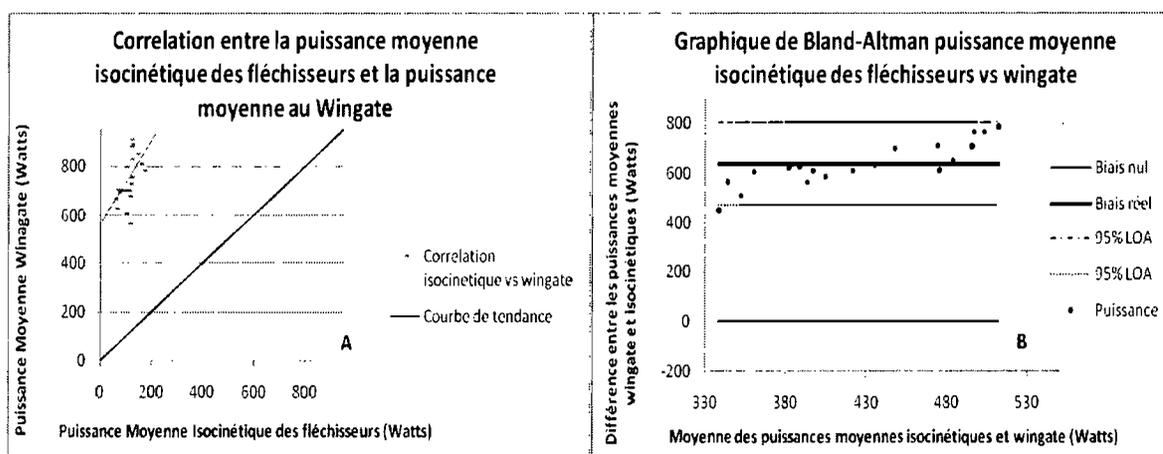


Figure 15: (A) Graphique de corrélation extenseurs et Wingate. (B) Graphique de Bland et Altman

Présenté en figure 15B, le graphique de Bland et Altman représente les limites d'agrément. Sur 100 nouveaux sujets, la différence entre la puissance moyenne au test de Wingate et la puissance moyenne des extenseurs du genou au test isocinétique tombera dans 95% des cas, sur  $533.6 \pm 133.3$  watts, ce qui représente une variation de 25 %.

### 3.4 Corrélation entre la puissance moyenne isocinétique des fléchisseurs et la puissance moyenne au Wingate

Comme présenté à la figure 14, on observe une différence significative ( $p < 0.001$  ;  $ES = 10.06$ ) entre la puissance moyenne isocinétique des fléchisseurs (104.87 Watts ;  $SD = 30.39$ ), et la puissance moyenne au test de Wingate (743.75 ;  $SD = 96.68$ ). Ces deux valeurs (Figure 16A) ont une corrélation significative ( $p < 0.05$ ) avec un coefficient de corrélation de 0.70.

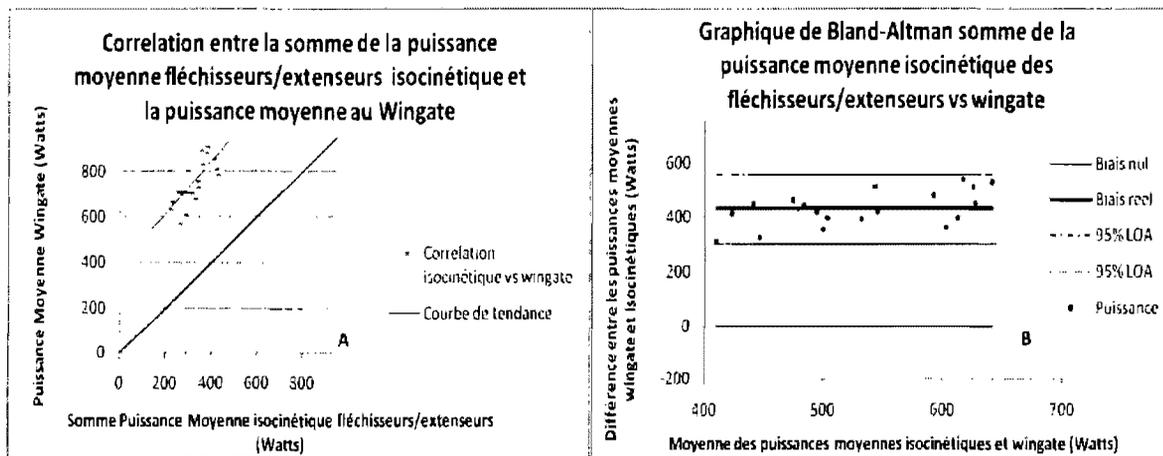


**Figure 16: (A) Graphique de corrélation fléchisseurs et Wingate. (B) Graphique de Bland et Altman**

Présenté en figure 16B, le graphique de Bland et Altman représente les limites d'agrément. Sur 100 nouveaux sujets, la différence entre la puissance moyenne au test de Wingate et la puissance moyenne des fléchisseurs du genou au test isocinétique tombera dans 95% des cas sur  $638.9 \pm 159$  watts, ce qui représente une variation de 26 %.

### **3.5 Corrélation entre la somme de la puissance moyenne isocinétique des fléchisseurs et extenseurs et la puissance moyenne au Wingate**

Comme présenté à la figure 14, on observe une différence significative ( $p < 0.001$ ;  $ES = 5.37$ ) entre la somme de la puissance moyenne isocinétique des fléchisseurs et extenseurs (315 watts;  $SD = 63.114$ ), et la puissance moyenne au test de Wingate (743.75;  $SD = 96.68$ ). Ces deux valeurs (Figure 17A) ont une corrélation significative ( $p < 0.05$ ) avec un coefficient de corrélation de 0.79.



**Figure 17: (A) Graphique de corrélation somme fléchisseurs/extenseurs et Wingate. (B) Graphique de Bland et Altman**

Présenté en figure 17B, le graphique de Bland et Altman représente les limites d'agrément. Sur 100 nouveaux sujets, la différence entre la puissance moyenne au test de Wingate et la somme de la puissance moyenne des fléchisseurs et des extenseurs du genou au test isocinétique tombera dans 95% des cas sur  $428.7 \pm 126.5$  watts, ce qui représente une variation de 29.5 %.

## 4 Discussion

L'objectif de la présente étude était de vérifier si le travail total réalisé au cours de 30 contractions concentriques maximales consécutives en flexion et extension du genou, à une vitesse angulaire de  $180^{\circ} \cdot s^{-1}$  est une mesure valide de la capacité de travail anaérobie. Nos résultats indiquent qu'il y a une corrélation significative de 0.83 ( $p < 0.05$ ), 0.70 ( $p < 0.05$ ) et 0.79 ( $p < 0.05$ ) entre la  $P_{moy}$  obtenue au test de Wingate et la  $P_{moy}$  obtenue au test isocinétique pour les extenseurs, fléchisseurs et la somme extenseurs/fléchisseurs, respectivement.

### 4.1 Mesures de puissance au test de Wingate

Les valeurs de  $P_{max}$  et  $P_{moy}$  obtenues lors du test de Wingate dans le cadre de l'étude sont plus élevées par rapport à celles trouvées dans la littérature. Par exemple, une étude de Sands et al. [44], à mesuré au Wingate des valeurs de 984.82 (133.05) et 690.27 (77.28) watts pour  $P_{max}$  et  $P_{moy}$  respectivement, chez des hommes sprinteurs et coureurs de demi-fond. Une étude de Morton et al. [76], réalisée auprès d'hommes entraînés participant principalement à des sports collectifs, a obtenu des valeurs au test de Wingate de 729 (95) et 579 (61) watts pour  $P_{max}$  et  $P_{moy}$  respectivement. Une étude de Tanaka et al. [77], réalisée auprès de cyclistes d'un niveau équivalent à ceux ayant participé à la présente étude, a obtenu des valeurs de 923.41 (44.66) et 749.45 (37.12) watts pour  $P_{max}$  et  $P_{moy}$  respectivement. Cette différence entre les valeurs retrouvées dans la littérature et les valeurs de puissance de notre étude peut être expliquée par plusieurs facteurs :

Le protocole de notre étude utilisait un test force-vitesse [24] afin d'identifier la résistance permettant au sujet d'atteindre la  $P_{max}$ . Cette même résistance était ensuite utilisée pour le test de Wingate 30 secondes. Dans la mesure où elle permet de développer une puissance plus élevée (2), cette procédure explique une partie des différences observées avec la littérature.

Une grande partie des mesures de puissance au test de Wingate publiées dans la littérature sont obtenues au moyen d'ergomètres Monark qui utilisent un freinage mécanique à friction et un système de pendule ou de panier pour appliquer la résistance. Ce système de

freinage provoque des pertes de puissance frictionnelles qui ont tendance à sous-estimer la mesure de la puissance [31].

Les ergomètres Monark utilisent une fréquence d'échantillonnage fixée à 0.2 Hz. C'est une des raisons pour lesquelles les tests de Wingate 30 secondes sont souvent découpés en 6 tranches de 5 secondes, ce qui a tendance à sous-estimer la puissance instantanée [78]. L'utilisation d'un ergomètre à freinage électromagnétique tel que le Lode Excalibur permet un échantillonnage bien plus rapide, fixé à 5Hz pour le modèle utilisé dans cette étude. Une telle rapidité de mesure a toutefois tendance à surévaluer la  $P_{\max}$  lors d'un test de Wingate [18], ce qui pourrait être une autre explication pour les valeurs plus élevées que la moyenne obtenues pour la  $P_{\max}$  dans notre étude.

Dans cette même optique, une étude de MacIntosh et al. [79], a mesuré la puissance instantanée lors d'un test de Wingate au moyen d'un Monark modifié, permettant un échantillonnage très rapide. Les résultats obtenus pour des cyclistes entraînés, présentés sous forme de moyenne (SE),  $P_{\max}=1344.7$  (35.7) watts et  $P_{\text{moy}}=753.8$  (28.8) watts, sont très proches des valeurs obtenues dans notre étude  $P_{\max}=1345.11$  (120.96) watts et  $P_{\text{moy}}=743.08$  (32.97) watts.

Il est également important de signaler que les cyclistes réalisent souvent des performances supérieures au test de Wingate par rapport à celles réalisées par des athlètes spécialistes de sports à dominante anaérobie. Cette différence est expliquée par la spécificité du test de Wingate sur ergocycle pour un cycliste [77].

En découpant, de façon plus traditionnelle, en six blocs de 5 secondes les valeurs du test de Wingate de notre étude on retrouve une  $P_{\max}$  de 1135.11 (120.96) watts, et une  $P_{\text{moy}}$  de 743.75 (96.68) watts, ce qui est comparable aux résultats trouvés dans la littérature pour des tests effectués sur Lode [80], lorsque le même système de découpage est utilisé, et sur Monark lorsqu'une correction pour l'inertie de la roue de freinage est prise en compte [81-84]. Compte tenu de tous ces éléments, les valeurs du test de Wingate de la présente étude sont donc d'une proportion normale par rapport à celles que révèle la littérature.

## **4.2 Mesure de la puissance au test isocinétique**

Les tests isocinétiques de la présente étude ont été réalisés sur dynamomètre Biodex système 3 (Biodex Medical Systems, Shirley, New York). La fiabilité de ce dynamomètre est élevée, démontrant une corrélation de 0.99 pour la position, le MFM et la vitesse [85]. Maffiuletti et al. [86] ont démontré que la mesure de la puissance moyenne lors d'un test concentrique de flexion extension du genou à  $180^{\circ}.s^{-1}$  était bien reproductible avec des corrélations de 0.96 à 0.99 pour le travail et la puissance en flexion ou extension du genou. La puissance moyenne mesurée lors du test isocinétique de 30 contractions concentriques maximales consécutives en flexion et extension du genou, à une vitesse angulaire de  $180^{\circ}.s^{-1}$ , peut donc être considéré comme une mesure valide de la puissance moyenne et par conséquent du travail réalisé (voir équation 5, section 3.2.1).

## **4.3 Corrélation entre la puissance au test de Wingate et au test isocinétique**

Le test de Wingate a été utilisé très souvent pour la comparaison de la puissance anaérobie chez différentes populations, ou pour la validation de différents tests de performance anaérobies [80]. En l'absence de mesures de référence pour la CTA, il est donc logique de comparer la performance au test isocinétique présenté dans notre étude à la performance réalisée au test de Wingate.

Les corrélations entre la puissance moyenne au test de Wingate et la puissance moyenne isocinétique des extenseurs, des fléchisseurs et de la somme fléchisseurs/extenseurs ont été établies dans notre étude selon la méthode de Spearman. Des corrélations de 0.83 ( $p < 0.05$ ), 0.70 ( $p < 0.05$ ) et 0.79 ( $p < 0.05$ ) ont été obtenues pour les extenseurs, fléchisseurs et la somme fléchisseurs-extenseurs, respectivement.

La corrélation la plus élevée entre le test de Wingate et le test isocinétique est retrouvée entre la  $P_{moy}$  développée par les extenseurs lors du test isocinétique et la  $P_{moy}$  développée au test de Wingate. La corrélation entre la  $P_{moy}$  de la somme fléchisseurs/extenseurs isocinétique et la  $P_{moy}$  au Wingate est légèrement plus basse que

pour les extenseurs, mais demeure significative. Puisque le test de Wingate est considéré comme la meilleure mesure disponible de la CTA [11], nous pouvons considérer que la  $P_{\text{moy}}$  développée lors du test isocinétique proposé dans notre étude est une mesure représentative de la CTA.

La corrélation entre la  $P_{\text{moy}}$  des fléchisseurs et la  $P_{\text{moy}}$  au test de Wingate est plus faible, mais tout de même significative. Nous avons pu établir dans une étude de 50 répétition maximales de flexion extension du genou, soumise pour publication (n=18), que le travail isocinétique des fléchisseurs du genou est moins reproductible que le travail réalisé par les extenseurs du genou (ICC= 0.74 et 0.90, respectivement) [58]. Ces données représentent une explication possible pour la corrélation plus faible entre la  $P_{\text{moy}}$  des fléchisseurs au test isocinétique et la  $P_{\text{moy}}$  au Wingate constatée dans la présente étude.

On observe également que la  $P_{\text{moy}}$  développée par les fléchisseurs du genou est plus basse de façon significative par rapport à la  $P_{\text{moy}}$  développée par les extenseurs. Cette différence significative peut être expliquée principalement par la plus grande masse musculaire utilisée au test de Wingate, qui est bilatéral, et qui met en action les fléchisseurs et extenseurs de la hanche et de la cheville en plus de ceux du genou [72, 73, 87].

Brown et al., ont également comparé les mesures obtenues au test de Wingate 30 s à celles obtenues sur un dynamomètre isocinétique pour un test de flexion extension du genou. Le test employé dans l'étude de Brown et al. est un test bilatéral à durée fixe de 30 secondes, à 180°/s sur 90° d'amplitude de mouvement. Des corrélations ( $r=0.84$ ;  $p<0.05$ ) et ( $r=0.54$ ;  $p<0.05$ ) ont été obtenues pour le pic de puissance et la puissance moyenne de la somme extenseurs/fléchisseurs respectivement [73]. Les principales différences entre le test isocinétique de Brown et al., et le test isocinétique de la présente étude sont le nombre fixe de répétitions et la mesure unilatérale de la jambe dominante. Par contre, puisque le test de Brown utilise une amplitude de mouvement plus basse, 90° par rapport à 100°, le sujet effectue 30 répétitions dans les deux tests. Pour ce qui est de la mesure unilatérale de la jambe dominante, une étude de Pincivero et al., a démontré une meilleure reproductibilité du travail effectué par la jambe dominante par rapport à la jambe non-dominante mesuré lors d'un test de 30 répétitions isocinétique à 180°/s de flexion-extension du genou[88]. Le test est donc plus reproductible en utilisant uniquement une mesure unilatérale de la jambe dominante.

Nous retrouvons donc dans la présente étude des coefficients de corrélation ( $r=0.79$ ;  $p<0.05$ ) proches de ceux de l'étude de Brown et al., ( $r=0.84$ ;  $p<0.05$ ) en utilisant un test isocinétique légèrement différent.

En l'absence de mesures de référence de la CTA, nous avons utilisé la méthode de Bland et Altman afin de vérifier l'interchangeabilité des tests isocinétique et Wingate. Bien que ces deux mesures soient fortement corrélées, les limites d'agrément à 95 % sont assez étendues. Nous pouvons conclure que le test isocinétique ne permet pas de prédire la performance au test de Wingate.

#### **4.4 Limites**

La principale limite de la présente étude est le manque de mesures de référence pour la CTA. Les deux tests ne peuvent être utilisés de façon interchangeable, mais nous ne sommes pas en mesure d'identifier celui qui devrait être utilisé. Certaines normes ont toutefois été développées pour la mesure de la CTA : Un test à effort maximal de durée limité doit être priorisé par rapport à un test à charge constante, car un travail plus grand est effectué dans la première minute d'un test maximal par rapport à un test à charge constante [89]. Une résistance optimisée devrait toujours être utilisée afin de permettre la production du travail maximal pendant l'effort. La recherche tend également à indiquer qu'un test maximal devrait durer approximativement 30 secondes pour pouvoir mesurer adéquatement la CTA [11].

Une autre limite de notre étude était le choix de la population ayant participé aux mesures. Les 20 sujets étaient tous des cyclistes entraînés, au moins de niveau provincial. Bien que cela facilite le procédé de familiarisation pour le test de Wingate, le mouvement de flexion-extension du genou du test isocinétique n'est pas un mouvement spécifique à leur sport. Il est donc possible que les valeurs du test isocinétique aient été sous estimées pour cette population par rapport aux valeurs du test isoinertiel.

La littérature a révélé un effet d'apprentissage pour le travail et le MFM dans le mouvement de flexion isocinétique du genou [58, 90], il est possible que la position assise du sujet ne respecte pas la relation tension-longueur habituelle des muscles ischiojambiers. La

familiarisation du sujet avec le protocole de mesure isocinétique pourrait compenser un tel problème et améliorer la reproductibilité des différents paramètres isocinétiques mesurés pour les fléchisseurs [58, 90]. Bien que la reproductibilité du travail des extenseurs ait été démontrée sur 50 répétitions maximales isocinétique de flexion extension du genou unilatéral [58], il reste à vérifier la reproductibilité du test sur 30 répétitions.

#### ***4.5 Conclusion et applications pratiques***

Le test isocinétique de 30 contractions concentriques maximales consécutives en flexion et extension du genou à une vitesse angulaire de  $180^{\circ}.s^{-1}$  que propose notre étude entre parfaitement dans les paramètres proposés pour la mesure de la CTA présentés dans la section 1.4. C'est un test maximal qui dure aux alentours de 30 secondes. De plus, l'utilisation d'un dynamomètre isocinétique permet à la résistance d'être assujettie aux capacités du sujet dans l'amplitude complète du mouvement.

La corrélation entre ce test et le test de Wingate, test le plus reconnu pour la mesure de la CTA [11], renforce la notion que le test isocinétique proposé dans la présente étude est une mesure valide de la CTA.

L'utilisation de ce test isocinétique sur une population autre que des cyclistes entraînés, pourrait permettre de pallier le biais possible que l'habitude des cyclistes à produire un effort maximal sur ergocycle a pu entraîner dans la mesure de la puissance anaérobie au test de Wingate.

En raison de la position assise sur le dynamomètre isocinétique qui est inhabituelle pour la plupart des sportifs, un protocole de familiarisation plus important pourrait permettre d'éliminer le phénomène d'apprentissage nécessaire au test isocinétique et augmenter la sensibilité de cette mesure.

Le test isocinétique utilisé dans la présente étude a été développé pour l'évaluation de joueurs de soccer professionnel. Il est donc spécifique à ce sport, autant dans le mouvement de flexion/extension que dans la vitesse de mouvement fixée à  $180^{\circ}.s^{-1}$ . Étant donné la grande

adaptabilité du dynamomètre isocinétique, il pourrait être intéressant de modifier le mouvement afin de mesurer la CTA de façon spécifique chez différentes populations. Par exemple, un test de flexion-extension de la hanche pourrait être plus adapté au mouvement du cycliste.

Puisque les mesures isocinétiques de puissance et de travail des extenseurs du genou sont mieux corrélées avec le test de Wingate et plus reproductibles, il serait préférable de se servir de cette mesure pour l'évaluation de la CTA.

## Bibliographie

1. Bouchard, C. and R.M. Malina, *Genetics of physiological fitness and motor performance*. Exercise and sport sciences reviews, 1983. **11**: p. 306-39.
2. Gastin, P.B., *Energy system interaction and relative contribution during maximal exercise*. Sports medicine, 2001. **31**(10): p. 725-41.
3. Astrand, P.-O., et al., eds. *Textbook of work physiology*. ed. t. ed. 2003, Human Kinetics.
4. Léger, L. *Comment évaluer et développer les capacités anaérobies*. in *Troisième Colloque International des Cadres Techniques et Sportifs de la Guadeloupe*. 1994. Gosier.
5. di Prampero, P.E., *Energetics of muscular exercise*. Reviews of physiology, biochemistry and pharmacology, 1981. **89**: p. 143-222.
6. Bangsbo, J., et al., *Anaerobic energy production and O<sub>2</sub> deficit-debt relationship during exhaustive exercise in humans*. The Journal of physiology, 1990. **422**: p. 539-59.
7. Green, S. and B. Dawson, *Measurement of anaerobic capacities in humans. Definitions, limitations and unsolved problems*. Sports medicine, 1993. **15**(5): p. 312-27.
8. van Ingen Schenau, G.J. and P.R. Cavanagh, *Power equations in endurance sports*. Journal of Biomechanics, 1990. **23**(9): p. 865-81.
9. Woledge, R. *Energy transformation in living muscle*. in *10th Conference of the European Society for Comparative Physiology and Biochemistry*. 1989: Georg Thieme.
10. Maisson, G. and A. Broeker, *Training in human muscle working with and without blood supply*. American Journal of physiology, 1941(132): p. 391-404.
11. Green, S., *Measurement of anaerobic work capacities in humans*. Sports medicine, 1995. **19**(1): p. 32-42.
12. Hopkins, W.G., E.J. Schabert, and J.A. Hawley, *Reliability of power in physical performance tests*. Sports medicine, 2001. **31**(3): p. 211-34.
13. Currell, K. and A.E. Jeukendrup, *Validity, reliability and sensitivity of measures of sporting performance*. Sports medicine, 2008. **38**(4): p. 297-316.
14. Hulleman, M., et al., *The effect of extrinsic motivation on cycle time trial performance*. Medicine and science in sports and exercise, 2007. **39**(4): p. 709-15.

15. Paterson, S. and F.E. Marino, *Effect of deception of distance on prolonged cycling performance*. Perceptual and motor skills, 2004. **98**(3 Pt 1): p. 1017-26.
16. Striegel, H., et al., *Determining anaerobic capacity using treadmill ergometry*. International journal of sports medicine, 2005. **26**(7): p. 563-8.
17. MacIntosh, B.R., *Assessment of peak power and short-term work capacity*. European journal of applied physiology, 2003. **88**(6): p. 572-579.
18. MacIntosh, B.R., K. Svedahl, and P. Rishaug. *Wingate Measurements for the New Millenium*. in *10th Annual Meeting of the Canadian Society for Exercise Phyiology*. 2002. St. John's, Newfoundland.
19. Hopkins, W.G., *Measures of reliability in sports medicine and science*. Sports medicine, 2000. **30**(1): p. 1-15.
20. Atkinson, G. and A.M. Nevill, *Statistical methods for assessing measurement error (reliability) in variables relevant to sports medicine*. Sports medicine, 1998. **26**(4): p. 217-38.
21. Thomas, J. and J. Nelson, *Research methods in physical activity*. 2001, Champaign (IL): Human Kinetics.
22. Bosco, C., P. Luhtanen, and P.V. Komi, *A simple method for measurement of mechanical power in jumping*. European journal of applied physiology and occupational physiology, 1983. **50**(2): p. 273-82.
23. Manning, J.M., C. Dooly-Manning, and D.H. Perrin, *Factor analysis of various anaerobic power tests*. Journal of sports medicine and physical fitness, 1988. **28**(2): p. 138-44.
24. Vandewalle, H., G. Pérès, and H. Monod, *Standard anaerobic exercise tests*. Sports medicine, 1987. **4**(4): p. 268-89.
25. Bar-Or, O., *The Wingate anaerobic test. An update on methodology, reliability and validity*. Sports medicine, 1987. **4**(6): p. 381-94.
26. Brickley, G., et al., *Assessment of maximal aerobic power and critical power in a single 90-s isokinetic all-out cycling test*. International journal of sports medicine, 2007. **28**(5): p. 414-9.
27. Inbar, O., O. Bar-Or, and J. Skinner, *The Wingate Anaerobic Test*. 1996, Champaign (IL): Human Kinetics.

28. Vandewalle, H., et al., *All out anaerobic capacity tests on cycle ergometers. A comparative study on men and women*. European journal of applied physiology and occupational physiology, 1985. **54**(2): p. 222-9.
29. Cunningham, D. and J. Faulkner, *The effect of training on aerobic and anaerobic metabolism*. Med Sci Sports, 1969. **1**: p. 65-9.
30. McKenzie, D.C., W.S. Parkhouse, and W.E. Hearst, *Anaerobic performance characteristics of elite Canadian 800 meter runners*. Canadian journal of applied sport sciences, 1982. **7**(3): p. 158-60.
31. Paton, C.D. and W.G. Hopkins, *Tests of cycling performance*. Sports medicine, 2001. **31**(7): p. 489-96.
32. Laurent, C.M., et al., *Cross-validation of the 20- versus 30-s Wingate anaerobic test*. European journal of applied physiology, 2007. **100**(6): p. 645-51.
33. Withers, R.T., et al., *Muscle metabolism during 30, 60 and 90 s of maximal cycling on an air-braked ergometer*. European journal of applied physiology and occupational physiology, 1991. **63**(5): p. 354-62.
34. Dekerle, J., et al., *Validity of the two-parameter model in estimating the anaerobic work capacity*. European journal of applied physiology, 2006. **96**(3): p. 257-64.
35. Gastin, P.B., et al., *Accumulated oxygen deficit during supramaximal all-out and constant intensity exercise*. Medicine and science in sports and exercise, 1995. **27**(2): p. 255-63.
36. Withers, R.T., G. Van der Ploeg, and J.P. Finn, *Oxygen deficits incurred during 45, 60, 75 and 90-s maximal cycling on an air-braked ergometer*. European journal of applied physiology and occupational physiology, 1993. **67**(2): p. 185-91.
37. Esbjörnsson, M., et al., *Fast twitch fibres may predict anaerobic performance in both females and males*. International journal of sports medicine, 1993. **14**(5): p. 257-63.
38. Patton, J.F., M.M. Murphy, and F.A. Frederick, *Maximal power outputs during the Wingate anaerobic test*. International journal of sports medicine, 1985. **6**(2): p. 82-5.
39. Rusko, H.K. and A. Nummela, *Measurement of maximal and submaximal anaerobic performance capacity: concluding chapter*. International journal of sports medicine, 1996. **17 Suppl 2**(2): p. S125-9.

40. Nummela, A., et al., *Reliability and validity of the maximal anaerobic running test*. International journal of sports medicine, 1996. **17 Suppl 2(2)**: p. S97-102.
41. Tossavainen, M., et al., *Comparison of two maximal anaerobic cycling tests*. International journal of sports medicine, 1996. **17 Suppl 2(2)**: p. S120-4.
42. Murphy, A.J., G.J. Wilson, and J.F. Pryor, *Use of the iso-inertial force mass relationship in the prediction of dynamic human performance*. European journal of applied physiology and occupational physiology, 1994. **69(3)**: p. 250-7.
43. Logan, P., et al., *Protocols for the Assessment of Isoinertial Strength*, in *Physiological Tests for Elite Athletes*, G. C.J., Editor. 2000, Human Kinetics: Champaign, IL. p. 200-21.
44. Sands, W.A., et al., *Comparison of the Wingate and Bosco anaerobic tests*. Journal of Strength and Conditioning Research, 2004. **18(4)**: p. 810-5.
45. Wrigley, T. and G. Strauss, *Strength Assessment by Isokinetic Dynamometry*, in *Physiological Tests for Elite Athletes*, G. C.J., Editor. 2000, Human Kinetics: Champaign, IL. p. 155-99.
46. Brown, L.E., *Isokinetics in Human Performance*, ed. L.E. Brown. 2000, Champaign (IL: Human Kinetics.
47. Gaines, J.M. and L.A. Talbot, *Isokinetic strength testing in research and practice*. Biological research for nursing, 1999. **1(1)**: p. 57-64.
48. Gleeson, N.P. and T.H. Mercer, *The utility of isokinetic dynamometry in the assessment of human muscle function*. Sports medicine, 1996. **21(1)**: p. 18-34.
49. Wilson, G., *Limitations to the Use of Isometric Testing in Athletic Assessment*, in *Physiological Tests for Elite Athletes*, G. C.J., Editor. 2000, Human Kinetics: Champaign, IL. p. 151-54.
50. Hislop, H.J. and J.J. Perrine, *The isokinetic concept of exercise*. Physical Therapy, 1967. **47(2)**: p. 114-7.
51. Dvir, Z., *Isokinetics: muscle testing, interpretation and clinical applications*. . 1st ed. 1995, Edinburg; New York: Churchill Livingstone.
52. Croisier, J.L. and J.M. Crielaard, *Méthodes d'exploration de la force musculaire: une analyse critique*. Annales de réadaptation et de médecine physique, 1999. **42**: p. 311-22.

53. Rochcongar, P., [*Isokinetic thigh muscle strength in sports: a review*]. *Annales de réadaptation et de médecine physique*, 2004. **47**(6): p. 274-81.
54. Croisier, J.L. and J.M. Crielaard, *Exploration isocinétique: analyse des paramètres chiffrés*. *Annales de réadaptation et de médecine physique*, 1999. **42**: p. 538-45.
55. Croisier, J.L., *Factors associated with recurrent hamstring injuries*. *Sports medicine*, 2004. **34**(10): p. 681-95.
56. Brown, L.E., M. Whitehurst, and J. Bryant, *Reliability of the LIDO active isokinetic dynamometer concentric mode*. *Isokinetics and exercise science*, 1992. **2**: p. 191-4.
57. Greenberger, H., T. Wilkowski, and B. Belyea, *Comparison of quadriceps peak torque using three different isokinetic dynamometers*. *Isokinetics and Exercise Science*, 1994. **4**: p. 70-5.
58. Bosquet, L., J.L. Croisier, and K. Gouadec, *Reliability of performance and fatigue index during an isokinetic endurance test (Submitted journal article)*. 2008.
59. Aagaard, P., et al., *A new concept for isokinetic hamstring: quadriceps muscle strength ratio*. *The American journal of sports medicine*, 1998. **26**(2): p. 231-7.
60. Sole, G., et al., *Test-Retest Reliability of Isokinetic Knee Extension and Flexion*. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 2007. **88**(5): p. 626-631.
61. Thompson, C., L. Paulus, and K. Timm, *Concentric isokinetic test-retest reliability and testing interval*. *Isokinetics and Exercise Science*, 1993. **3**: p. 44-9.
62. Croisier, J.L. and J.M. Crielaard, *Exploration isocinétique: analyse des courbes*. *Annales de réadaptation et de médecine physique*, 1999. **42**: p. 497-502.
63. Codine, P.P., et al., [*Isokinetic strength measurement and training of the shoulder: methodology and results*]. *Annales de réadaptation et de médecine physique*, 2005. **48**(2): p. 80-92.
64. Gleeson, N., *Reproductibility of isokinetic leg strength and endurance characteristics of adult men and women*. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 1992. **65**(3): p. 221-228.
65. Cometti, G., et al., *Isokinetic strength and anaerobic power of elite, subelite and amateur French soccer players*. *International journal of sports medicine*, 2001. **22**(1): p. 45-51.

66. Le Gall, F., T. Laurent, and P. Rochcongar, *Évolution de la force musculaire des fléchisseurs et extenseurs du genou mesuré par dynamomètre isocinétique chez le footballeur de haut niveau*. Science & Sports, 1999. **7**: p. 50-3.
67. Dauty, M. and M. Potiron Josse, *Corrélations et différences de performance entre des footballeurs, professionnels, en formation et amateurs à partir du test de sprint (10 mètres épart arrêté) et de tests isocinétiques du genou*. Science & Sports, 2004. **19**(2): p. 75-79.
68. Signorile, J.F., et al., *Correlation analyses and regression modeling between isokinetic testing and on-court performance in competitive adolescent tennis players*. Journal of Strength and Conditioning Research, 2005. **19**(3): p. 519-26.
69. Ozçakar, L., et al., *Comprehensive isokinetic knee measurements and quadriceps tendon evaluations in footballers for assessing functional performance*. British journal of sports medicine, 2003. **37**(6): p. 507-10.
70. Freedson, P.S., et al., *Industrial torque levels by age group and gender*. Isokinetics and Exercise Science, 1993. **3**(1): p. 34.
71. Neder, J.A., et al., *Reference values for concentric knee isokinetic strength and power in nonathletic men and women from 20 to 80 years old*. The Journal of orthopaedic and sports physical therapy, 1999. **29**(2): p. 116-26.
72. Driss, T., Vandewalle, H., *Force-velocity relationship on a cycle ergometer and knee-extensor strength indices*. Revue canadienne de physiologie appliquée, 2002. **27**(3): p. 250.
73. Brown, L.E., M. Whitehurst, and D.N. Buchalter, *Comparison of Bilateral Isokinetic Knee Extension/Flexion and Cycle Ergometry Tests of Power*. Journal of Strength and Conditioning Research, 1994. **8**(3): p. 139-143.
74. Duncan, G.E., E.T. Howley, and B.N. Johnson, *Applicability of VO<sub>2</sub>max criteria: discontinuous versus continuous protocols*. Medicine and science in sports and exercise, 1997. **29**(2): p. 273-8.
75. Kuipers, H., et al., *Variability of aerobic performance in the laboratory and its physiologic correlates*. International journal of sports medicine, 1985. **6**(4): p. 197-201.

76. Morton, J.P.J.P. and N.T.N.T. Cable, *Effects of intermittent hypoxic training on aerobic and anaerobic performance*. Ergonomics, 2005. **48**(11-14): p. 1535-46.
77. Tanaka, H., et al., *Aerobic and anaerobic power characteristics of competitive cyclists in the United States Cycling Federation*. International journal of sports medicine, 1993. **14**(6): p. 334-8.
78. MacIntosh, B.R., K. Svedahl, and M. Kim, *Fatigue and optimal conditions for short-term work capacity*. European journal of applied physiology, 2004. **92**(4-5): p. 369-75.
79. MacIntosh, B.R. and P. MacEachern, *Paced effort and all-out 30-second power tests*. International journal of sports medicine, 1997. **18**(8): p. 594-9.
80. Minahan, C., M. Chia, and O. Inbar, *Does power indicate capacity? 30-s Wingate anaerobic test vs. maximal accumulated O<sub>2</sub> deficit*. International journal of sports medicine, 2007. **28**(10): p. 836-43.
81. James, D.V., et al., *Optimized versus corrected peak power during friction-braked cycle ergometry in males and females*. Journal of sports sciences, 2007. **25**(8): p. 859-67.
82. MacIntosh, B.R., et al., *Evaluation of the Monark Wingate Ergometer by Direct Measurement of Resistance and Velocity*. Canadian journal of applied physiology, 2001. **26**(6): p. 543-58.
83. Reiser, R.F., J.P. Broker, and M.L. Peterson, *Inertial effects on mechanically braked Wingate power calculations*. Medicine and science in sports and exercise, 2000. **32**(9): p. 1660-4.
84. Weber, C.L., M. Chia, and O. Inbar, *Gender differences in anaerobic power of the arms and legs--a scaling issue*. Medicine and science in sports and exercise, 2006. **38**(1): p. 129-37.
85. Drouin, J.M., et al., *Reliability and validity of the Biodex system 3 pro isokinetic dynamometer velocity, torque and position measurements*. European journal of applied physiology, 2004. **91**(1): p. 22-9.
86. Maffiuletti, N.A., et al., *Reliability of knee extension and flexion measurements using the Con-Trex isokinetic dynamometer*. Clinical physiology and functional imaging, 2007. **27**(6): p. 346-53.

87. Baltzopoulos, V., R.G. Eston, and D. Maclaren, *A comparison of power outputs on the Wingate test and on a test using an isokinetic device*. *Ergonomics*, 1988. **31**(11): p. 1693-9.
88. Pincivero, D.M., W.S. Gear and Sterner, *Assessment of the reliability of high-intensity quadriceps femoris muscle fatigue*. *Medicine and science in sports and exercise*, 2001. **33**(2): p. 334-8
89. Katch, V., A. Weltman, and L. Traeger, *All-out versus a steady-paced cycling strategy for maximal work output of short duration*. *Research quarterly*, 1976. **47**(2): p. 164-8.
90. Impellizzeri, F.M., et al., *Reliability of isokinetic strength imbalance ratios measured using the Cybex NORM dynamometer*. *Clinical physiology and functional imaging*, 2008. **28**(2): p. 113-9.