

UNIVERSITE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE

**UNITE de FORMATION et de RECHERCHE en SCIENCES et
TECHNIQUES des ACTIVITES PHYSIQUES et SPORTIVES**

MASTER 2 Recherche
« Stress, Contraintes, Compétences »

**Validation d'une Méthode de Mesure de la Surface
Frontale Projetée du Corps Humain**
Application en cyclisme

par
DEBRAUX Pierre

Directeur de mémoire :
BERTUCCI William

**Année Universitaire 2005/2006
Session Juin 2006**

UNIVERSITE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE

**UNITE de FORMATION et de RECHERCHE en SCIENCES et
TECHNIQUES des ACTIVITES PHYSIQUES et SPORTIVES**

MASTER 2 Recherche
« Stress, Contraintes, Compétences »

**Validation d'une Méthode de Mesure de la Surface
Frontale Projetée du Corps Humain**
Application en cyclisme

par
DEBRAUX Pierre

Directeur de mémoire :
BERTUCCI William

**Année Universitaire 2005/2006
Session Juin 2006**

Validation d'une Méthode de Mesure de la Surface Frontale Projetée du Corps Humain

Application en cyclisme

Pierre DEBRAUX

Résumé Le but de cette étude est la validation d'une nouvelle méthode de mesure numérique de l'aire frontale projetée via le logiciel de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) Pro/ENGINEER® Wildfire™ 2.0 (Pro/E). Un groupe de 9 cyclistes ont leur aire frontale projetée mesurée à partir de photographies numériques prises en laboratoire sur leur propre vélo dans deux positions différentes : (1) Montée de col ; (2) Aérodynamique. Pour chaque position, l'aire frontale projetée du corps du cycliste (A_c), ainsi que l'aire frontale projetée du cycliste et de son vélo (A_t) sont mesurées dans Pro/E. Cette nouvelle méthode est comparée pour validation avec la méthode de pesage des photographies qui est considérée comme valide.

Mots-clés : Aire frontale projetée ; Cyclisme ; Validation ; Résistance aérodynamique ; Performance

A validation of a numeric measure method to estimate the projected frontal area in competitive cyclists

Pierre DEBRAUX

Abstract The primary purpose of this study was to validate a new numeric measure method to estimate the projected frontal area using a Computer Aided-Design (CAD) software : Pro/ENGINEER® Wildfire™ 2.0 (Pro/E). A group of 9 male cyclists had projected frontal area determined from numerics photographs in laboratory while seated on their own racing bicycles in two positions : (1) Upright Position (UP) ; (2) Traditionnal Aerodynamic Position (TAP). For each position, the body of the cyclist (A_c), as well as projected frontal area for the cyclist and his bicycle (A_t) were measured in Pro/E. This new numeric method has been compared to the validate common method of weighing photographs.

Keywords: Projected frontal area ; Bicycling ; Aerodynamic drag ; Validation ; Performance

Remerciements

Pour votre disponibilité et votre bonne humeur à chaque expérimentation : MERCI à vous, les cyclistes! Mes plus grands remerciements à Aneliya, pour ta grande patience, et tes encouragements et à William pour son aide précieuse et détaillée.

Table des Matières

1	INTRODUCTION.....	8
2	REVUE DE LITTERATURES.....	10
2.1	TECHNIQUES DE MESURES DES AIRES CORPORELLES PROJETEES	10
2.1.1	EVALUATION DE L'AIRES FRONTALE PROJETEE A PARTIR DE LA METHODE D'EVALUATION DE L'AIRES CUTANEE TOTALE.....	10
2.1.2	METHODE DE PESAGE	12
2.1.3	METHODE DE DIGITALISATION.....	13
2.2	RESISTANCE A L'AVANCEMENT	14
2.2.1	RESISTANCE A L'AVANCEMENT EN MILIEU AQUATIQUE	14
2.2.2	RESISTANCE EN MILIEU TERRESTRE	15
2.2.2.1	Résistances dues à la gravité	15
2.2.2.2	Résistances de friction	16
2.2.2.3	Résistance aérodynamique.....	17
2.2.2.4	Exemple de 2 méthodes de détermination du $C_x A_t$	20
3	OBJECTIFS ET HYPOTHESE DE CETTE ETUDE	24
4	METHODOLOGIE.....	25
4.1	LES SUJETS	25
4.2	MESURES	25
4.2.1	ANTHROPOMETRIE.....	25
4.2.2	PROTOCOLE.....	26
4.2.3	DETERMINATION ET VALIDATION DE L' A_C ET DE L' A_T	28
4.2.4	APPLICATIONS PRATIQUES	31
4.2.5	ANALYSES STATISTIQUES.....	32
5	RESULTATS	34
6	DISCUSSION.....	37
7	CONCLUSION	40
8	REFERENCES	41

Lexique

A_c	Aire frontale projetée corporelle (m^2)
A_{ct}	Aire cutanée totale (m^2)
A_t	Aire frontale totale projetée (corps + véhicule) (m^2)
A_v	Aire observable du vélo (m^2)
CAO	Conception Assisté par Ordinateur
C_r	Coefficient de roulement
C_x	Coefficient de forme
$C_x A_t$	Coefficient de traînée (m^2)
g	Accélération gravitationnelle ($m.s^{-2}$)
h	Taille du cycliste (m)
H_a	Hauteur assis (m)
H_v	Hauteur vélo (m)
m	Masse corporelle (kg)
P	Puissance mécanique externe (W)
Pro/E	Pro/ENGINEER
R_r	Résistance de friction (N)
R_t	Résistance totale (N)
R_x	Résistance de traînée (N)
v	Vitesse ($m.s^{-1}$)
v_d	Vitesse de déplacement ($m.s^{-1}$)
v_f	Vitesse du fluide ($m.s^{-1}$)
VPH	Véhicule à Propulsion Humaine
W_g	Force due à la gravité (N)
ρ	Densité du fluide ($kg.m^{-3}$)
ρ_0	Masse volumique de l'air sec en condition STPD (Standard Temperature and Pressure Dry) ($kg.m^{-3}$)

1 Introduction

Dans les activités physiques et sportives, et spécialement au sein des sports cycliques, la performance est grandement dépendante de la minimisation des forces s'opposant à l'avancement. Partout où le sportif devra lutter contre le temps, il sera confronté à un paradoxe : aller le plus vite possible, et lutter contre les résistances créées exponentiellement par cette vitesse de course. Or, pour aller le plus vite possible, le sportif ne peut compter que sur sa puissance musculaire, et, s'il en utilise, sur son équipement qui transformera cette puissance métabolique en puissance mécanique.

Cette résistance à l'avancement s'applique à la fois aux sportifs évoluant en milieu aquatique et à ceux évoluant en milieu terrestre. Il n'y a aucune différence entre ces 2 milieux à ce niveau, même si l'air possède une densité nettement inférieure (environ 800 fois) à celle de l'eau, et que les vitesses atteintes par les sportifs sur terre sont bien plus supérieures.

Parmi ces forces résistives, une des plus importantes est la traînée. Qu'elle soit aéro- ou hydrodynamique, l'équation mathématique de la traînée (R_x , en Newton) montre qu'elle est directement proportionnelle à l'aire frontale projetée totale* (A_t , en m^2) dans le plan perpendiculaire à l'avancement, à la densité du fluide (air ou eau) (ρ , en $kg.m^{-3}$), au coefficient de forme (C_x , sans unité), et au carré de la différence de vitesses entre la vitesse du fluide (v_f , en $m.s^{-1}$) et la vitesse de déplacement du sujet (v_d , en $m.s^{-1}$), c'est-à-dire la vitesse d'écoulement du fluide sur le corps du nageur :

$$R_x = 0,5 \times \rho \times C_x \times A_t (v_f - v_d)^2 \quad (1)$$

Généralement dans les sport cycliques, les chercheurs et les entraîneurs ont deux objectifs : **i)** améliorer le niveau de puissance mécanique motrice que l'athlète peut générer et **ii)** minimiser les résistances à l'avancement. De manière à réduire les résistances aéro – et

* On notera dans cette étude que l'aire frontale projetée totale (A_t , en m^2) d'un sportif est composée de l'aire frontale projetée corporelle (A_c , en m^2) et de celle de son équipement (véhicule, matériels, etc.) (A_v , en m^2).

hydrodynamique, une des approches est donc de chercher à mesurer le coefficient de traînée ($C_x A_f$, en m^2) de l'athlète et éventuellement de son équipement, de manière à l'analyser pour tenter de le réduire (Millet et al., 2002). Le coefficient de traînée peut être, par exemple, déterminé en soufflerie. Il existe par ailleurs certaines méthodes qui évaluent plus ou moins précisément l' A_f sur le terrain ou en laboratoire.

Dans cette étude, une nouvelle méthode de mesure de l'aire frontale projetée sera présentée. Celle-ci est basée sur la prise de photographies numériques de l'athlète, et éventuellement de son équipement. Ces photographies sont par la suite traitées via un logiciel de Conception Assistée par Ordinateur (CAO). Cette méthode se voudra utilisable dans la majorité des activités physiques et sportives en condition de laboratoire ou bien en condition réelle de déplacement.

2 Revue de Littératures

Dans une première partie, les principales techniques de mesures et d'évaluations des aires corporelles cutanées et projetées sont présentées. Celles-ci permettront de donner une estimation des traînées aéro – et hydrodynamiques que subit un athlète lors de son déplacement. Dans une seconde partie, l'ensemble des résistances qui s'opposent aux déplacements sera étudié. Ces informations permettront d'une part de déterminer le niveau de puissance mécanique que doit produire l'athlète pour se déplacer à une vitesse donnée et d'autre part d'évaluer l'impact relatif des résistances aéro – et hydrodynamique par rapport aux résistances globales.

2.1 Techniques de mesures des aires corporelles projetées

2.1.1 Evaluation de l'aire frontale projetée à partir de la méthode d'évaluation de l'aire cutanée totale

Du Bois et Du Bois (1915 ; 1916) ont fait parti des premiers à travailler à l'élaboration d'une équation permettant de connaître la surface cutanée totale du corps humain (A_{ct} , en m^2). Cette équation se base sur la taille (h , en m) et la masse (m , en kg).

$$A_{ct} = 0,2025 \times h^{0,725} \times m^{0,425} \quad (2)$$

Bien que cette étude soit ancienne avec un nombre de sujets très faibles pour leur expérimentation, elle reste une référence dans le domaine des mesures anthropométriques de surfaces corporelles. Pourtant Shuter et Aslani (2000) ont développé une équation corrigée de celle de Du Bois et Du Bois, en prenant un plus grande nombre de sujets, et en établissant, à l'aide des méthodes de statistiques modernes, de nouveaux coefficients plus précis, avec h en cm, et m en kg, donc A_{ct} en cm^2 :

$$A_{ct} = 94,9 \times h^{0,655} \times p^{0,441} \quad (3)$$

La détermination d'Act permet principalement de la mettre en relation avec les aires corporelles partielles mesurées par d'autres méthodes, permettant d'établir des équations en fonction de la taille et de la masse corporelle, et ainsi de connaître, les aires corporelles projetées.

Olds et al. (1993) ont développé un modèle mathématique pour estimer la performance en cyclisme sur route. Ce modèle prend en compte l'aire frontale projetée du cycliste (A_c). Ils se sont basés sur une étude antérieure et ont supposé que l' A_c était une fraction constante de l'aire cutanée totale (A_{ct}), dans ce cas, 25 %. En se référant à l'étude antérieure, Olds et al. calculent l' A_{ct} grâce à cette formule :

$$A_{ct} = M^{0,425} \times H^{0,725} \times 0,007184 \quad (4)$$

Où M est la masse corporelle (en kg) des sujets et H, la taille en cm. Puis ils appliquent un Facteur de correction (FC_A) en se basant sur l' A_{ct} mesurée dans l'étude antérieure dont la valeur est 1,77 m² :

$$FC_A = A_{ct} / 1,77 \quad (5)$$

Toutes les A_c sont ensuite déterminées en incluant ce facteur de correction dans la formule suivante :

$$A_c = (1,77 / 4) \times A_{ct} / 1,77 \quad (6)$$

Par la suite Olds et al. (1995) ont amélioré leur modèle mathématique de la performance en cyclisme sur route. En utilisant la méthode de pesage des photographies, ils ont déterminé l' A_c de 26 sujets, et ils ont développé l'équation suivante :

$$A_c = 0,3176 A_{ct} - 0,1478 \quad (7)$$

Ce qui leur permet d'obtenir une valeur moyenne de A_c , grâce à ce nouveau paramètre, ils utilisent une équation corrigée pour déterminer l' A_t :

$$A_t = 0,4147 \times A_{ct} / 1,771 + 0,1159 \quad (8)$$

Où 0,4147 est l' A_c moyenne dans la position étudiée obtenue grâce à la formule (9), 1,771 est l'aire cutanée totale moyenne, et 0,1159 est l'aire mesurée d'un vélo pour son étude.

Ces modélisations mathématiques sont plus ou moins précises en ce qui concerne l'évaluation des aires frontales projetées. Mais l'intérêt de telles méthodes est de pouvoir obtenir pour une position donnée une évaluation rapide des aires frontales projetées en ne connaissant que la taille et la masse corporelle des sujets.

2.1.2 Méthode de pesage

Pour permettre une mesure d'une partie projetée (*i.e.* partie observée du corps d'une position fixe) de l'aire corporelle totale, la technique utilisée, même de nos jours, est celle dite de « pesage des photographies » (Capelli et al., 1993; Du Bois et Du Bois, 1915; Heil D.P., 2001; Heil D.P., 2002; Olds et al., 1995; Padilla et al., 2000; Swain, 1987). Elle consiste à prendre en photographie le sujet dans le plan désiré avec une zone dont on connaît la surface. Une fois les photographies développées, il suffit de découper le sujet en suivant ses contours, et de découper la zone dont l'aire est connue. Les deux morceaux sont pesés séparément à l'aide d'une balance de grande sensibilité ($\pm 0,001$ g). Une fois le ratio du poids des 2 parties calculé, on le multiplie par l'aire de la zone de calibration et on obtient la valeur de l'aire projetée du sujet. Néanmoins cette méthode est entièrement dépendante de la qualité de la photographie, du format du développement, et de la précision avec laquelle elle sera découpée.

2.1.3 Méthode de digitalisation

Cela consiste à numériser une photographie (si elle n'est pas déjà numérique), on détoure la zone de calibration dont l'aire connue, puis on détoure la zone dont on veut obtenir l'aire. Le logiciel calcule ensuite combien de fois l'aire de calibration est contenue dans la zone à mesurer. C'est en fait la version numérique de la méthode de pesage.

Heil a établi pour des cyclistes avec (2001) et sans prolongateurs aérodynamiques (2002), des équations permettant de calculer l'aire frontale projetée selon l'inclinaison du tronc et du tube de selle, la masse corporelle et la taille des cyclistes. Sa méthode pour déterminer l'aire projetée est de digitaliser la photographie et comparer la zone voulue à la zone de calibration dont l'aire est connue. Grâce à cette méthode il a obtenu l' A_t de 4 positions de cyclistes sur vélo traditionnel avec tout leur équipement (y compris le casque) (2002). Deux de ces quatre positions sont similaires à celles testées dans cette étude. Pour la position « Montée de col », Heil trouve une moyenne de $0,401 \pm 0,0089 \text{ m}^2$ pour l'aire projetée du corps (A_c), et de $0,525 \pm 0,0099 \text{ m}^2$ pour l'aire projetée totale (Cycliste + vélo) (A_t) ; et pour la position « Aérodynamique », il trouve une moyenne de $0,342 \pm 0,0077 \text{ m}^2$ pour l' A_c et $0,460 \pm 0,0091 \text{ m}^2$ pour l' A_t .

Dorel et al. (2005) ont évalué les performances de cyclistes sur le 200 m sprint sur piste. En utilisant la méthode de Heil (2002), il a étudiée l' A_t des cyclistes dans leur position de course la plus commune, mains en bas du guidon, le torse partiellement incliné, les bras en extension. Il a trouvé une valeur moyenne de $0,531 \pm 0,014 \text{ m}^2$. D'après Dorel et al. (2005) l' A_t est corrélé avec la masse corporelle ($r = 0,76$; $p < 0,01$), avec le gabarit ($r = 0,75$; $p < 0,01$), et avec le volume musculaire des jambes ($r = 0,66$; $p < 0,05$). Et il montre une relation entre le volume musculaire des jambes et la performance. Or si l'on diminue le gabarit d'un cycliste, on diminue son A_c , et donc les résistances aérodynamiques, mais le volume musculaire est

diminué également, d'un autre côté si on augmente le gabarit des sujets, cela augmente le volume du muscle et donc la puissance, mais cela augmente les résistances à l'avancement.

Ces techniques de mesures permettent de connaître les aires cutanées corporelles totales ou partielles. Elles sont plus ou moins précises, mais fournissent des informations nécessaires à l'évaluation des résistances hydro- et aérodynamiques. Toutefois celles-ci ne constituent pas à elles seules l'ensemble des résistances à l'avancement.

2.2 Résistance à l'avancement

Millet et Candau (2002) ont travaillé sur les facteurs mécaniques du coût énergétique de trois locomotions humaines (natation, cyclisme et course à pied). D'après eux, à vitesse de compétition, en cyclisme et en natation, le coût énergétique orienté pour vaincre les résistances externes représente la majeure partie du coût énergétique (>90%). Or ces résistances aéro- et hydrodynamique sont directement liées à l'aire frontale totale projetée et au coefficient de forme. Et le coefficient de traînée ($C_x A_f$) sera influencé majoritairement, en natation comme en cyclisme, par la position du corps.

2.2.1 Résistance à l'avancement en milieu aquatique

En natation, il existe 3 types de résistances agissant sur le corps du nageur (Vennell et al., 2006) : *i*) Les traînées de frottement (<5% d'après (Toussaint et al., 2004)) dues aux résistances générées par le frottement des molécules du fluide sur la surface du corps en mouvement ; *ii*) les résistances tourbillonnaires liées à la zone de dépression à l'arrière du corps ; et *iii*) les résistances frontales (ou résistance de vague). A la surface de l'eau, les valeurs des résistances frontales sont comprises entre 50% et 60% de la résistance totale passive (*i.e.* corps remorqué par un câble), et contribue entre 10% et 20% de la résistance totale active à 1,0 m.s⁻¹, à 21% à 1,9 m.s⁻¹, et entre 35% et 45% à 2,0 m.s⁻¹ (Vennell et al.,

2006). Cette dernière résistance est fortement influencée par l'aire frontale et le coefficient de forme.

De nombreux auteurs ont tenté d'évaluer l'aire du maître – couple en natation. Les valeurs en position de poussée hydrodynamique sont les plus facilement mesurables, il s'avère qu'au cours du mouvement de nage, aucun auteur n'est en accord sur les valeurs du maître – couple, surtout du au fait que le corps au cours de la nage se situe à l'interface eau – air, ce qui rend impossible des prises de vues de qualité.

Clarys (1979) a élaboré une équation pour déterminer la section du corps où la circonférence est la plus grande, en se basant sur la taille et la masse corporelle des sujets. Cette valeur correspondrait en fait au maître couple d'un corps profilé en phase de glisse. La valeur moyenne qu'il rapporte est $767,33 \pm 92,51 \text{ cm}^2$ (soit $0,076733 \text{ m}^2$) pour des étudiants et $766,66 \pm 123,88 \text{ cm}^2$ (soit $0,76666 \text{ m}^2$) pour des nageurs de compétition. Vennell et al. (2006) rapportent une valeur de A_c de $0,0934 \text{ m}^2$, pour un mannequin en fibre de verre réalisé par CyberFX, Etats-Unis pour Speedo. Ce mannequin a été réalisé à partir d'un scanner 3D. La taille du mannequin est de 1,86 m, avec dans la position hydrodynamique une distance pied – main de 2,34 m.

Dans l'étude de Clarys (1979), il n'est pas clairement indiqué la moyenne de la masse corporelle et de la taille des sujets, quant à Vennell et al. (2006), ils ne précisent pas comment ils ont obtenu leur mesure de la surface frontale projetée.

2.2.2 Résistance en milieu terrestre

2.2.2.1 Résistances dues à la gravité

Le travail mécanique nécessaire pour vaincre la force due à la gravité (W_g) dépend de l'importance de l'inclinaison du terrain et de la masse du corps en déplacement :

$$W_g = m \times g \times \sin \alpha \times v \quad (9)$$

Où α est l'angle de la pente ($\sin \alpha = 0$ lorsque le terrain est plat). Le poids de l'ensemble athlète – équipement représente donc le paramètre le plus important dans la dépense énergétique lorsque la pente devient marquée.

2.2.2.2 Résistances de friction

D'après Millet et Candau (2002), on appelle résistances de friction, les résistances essentiellement dues au contact entre le vélo et le sol (R_r , résistances de roulement exprimées en Newton) et aux résistances internes entre les différentes pièces mécaniques du vélo.

Les pertes de puissances liées à la transmission par la chaîne s'élèvent à 3 – 5 % de la puissance totale. Aussi l'alignement de la chaîne est un des éléments les plus important pour minimiser les résistances de friction interne.

Les résistances de roulement sont liées au poids de l'ensemble cycliste – vélo et sont indépendantes de la vitesse :

$$R_r = C_r \times m \times g \quad (10)$$

Où C_r représente le coefficient de roulement, m la masse de l'ensemble cycliste – vélo (kg) et g l'accélération gravitationnelle ($m.s^{-2}$).

Le coefficient de roulement varie en fonction de nombreux paramètres et sont comprises entre 0,001 et 0,006. Des surcharges additionnelles de 10 et 15 kg se traduisant par une augmentation de R_r de 6 et 14 % respectivement, soit une diminution de la distance couverte sur 1h de 300 et 600 m. La pression de gonflage a aussi une influence considérable. Ainsi des pneumatiques gonflés à 600 vs. 1200 kPa (ou 6 et 12 bars) déterminent une diminution de 24 % de R_r . La différence entre des pneus gonflés à 150 et 600 kPa est bien supérieure (50%) (Grappe et al., 1999). Le type de pneumatique, la largeur et le diamètre de la

jante, la surface de roulement représente des facteurs notables, mais moindres que la masse et la pression de gonflage.

En cyclisme sur terrain plat, le coût énergétique augmente en fonction de deux forces opposées à l'avancement : la résistance aérodynamique et les résistances de friction, qui sont dues au contact entre le vélo et le sol et aux résistances internes entre les différentes pièces mécaniques du vélo. Pour des vitesses inférieures à 5 m.s^{-1} ($<18 \text{ km.h}^{-1}$), les résistances de friction sont plus grandes que les résistances aérodynamiques, mais aux environs de 14 m.s^{-1} ($50,5 \text{ km.h}^{-1}$) (vitesse de course), alors les résistances aérodynamiques sont équivalentes à 90 % des forces résistives totales (Candau et al., 1999).

2.2.2.3 Résistance aérodynamique

Cette résistance est caractérisée par la traînée (R_x) qui s'oppose au déplacement d'un corps dans un fluide et qui augmente avec le carré de la vitesse. Le coefficient de traînée aérodynamique ($C_x A_t$) est le facteur déterminant de cette traînée. Le $C_x A_t$ dépend de façon prépondérante de la position du cycliste (mains à la potence ou aux poignées de frein ; coudes plus ou moins pliés et écartés ; utilisation de prolongateurs), en particulier de la position plus ou moins horizontale du buste, du matériel utilisé, de la forme du vélo et de la texture des vêtements (Millet et Candau, 2002).

Le record de l'heure en cyclisme est l'exemple parfait de contribution de la position du corps sur le vélo dans la performance. En effet d'un point de vue métabolique, le cycliste effectue sa performance dans des conditions stables au plus haut pourcentage possible de sa consommation maximale d'oxygène. Cette tâche est donc un compromis entre performance physiologiques et réduction des forces dues aux résistances à l'avancement. Padilla et al. (2000) rapportent des valeurs (Tab. 2-1) sur les détenteurs du record de l'heure sur piste.

Tableau 2-1 Caractéristiques des détenteurs du record de l'heure sur piste en cyclisme (d'après Padilla et al., 2000)

Cyclistes	Record (km.h ⁻¹)	Date (j/m/a)	Taille (cm)	MC (kg)	A_{ct} (m ²)	A_t (m ²)	C_x	$C_x A_p$ (m ²)	Puissance (W)
Merckx	49,432	25/10/1972	184	72	1,940	0,3491	0,75	0,2618	380
Moser	51,151	21/01/1984	182	76	1,969	0,3544	0,70	0,2481	400
Obree	52,713	27/04/1994	182	71	1,912	0,3441	0,50	0,1720	359
Indurain	53,040	02/09/1994	186	81	2,076	0,3755	0,65	0,2441	510
Rominger	55,291	05/11/1994	175	65	1,791	0,3220	0,60	0,1932	456
Boardmann	56,375	06/09/1996	177	69	1,857	0,3342	0,55	0,1838	462

MC : masse corporelle

A_{ct} : Aire Cutanée totale, calculée d'après l'équation de Du Bois & Du Bois (1916)

A_t : considéré comme constant, soit 18% de A_{ct}

C_x : estimé d'après la littérature

$C_x A_t$: mesuré pour Moser et Indurain, et estimé pour les autres à partir de A_t et C_x

Puissance mécanique estimée d'après un modèle mathématique

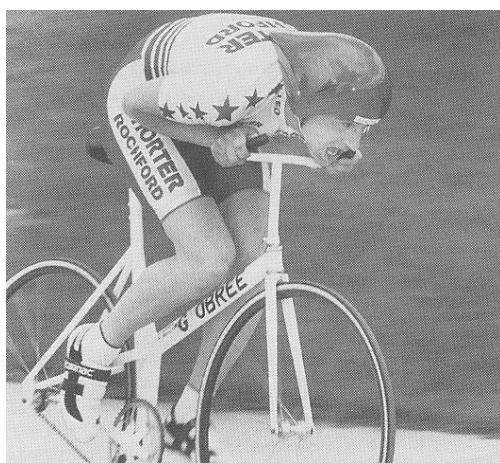


Figure 2-1 Position de Graeme Obree (1993)

D'après Padilla et al. (2000), les A_t sont comprises entre 0,322 et 0,375 m², les C_x entre 0,50 et 0,75. Le $C_x A_t$ évolue de 0,2618 pour Merckx en 1972 à 0,1838 pour Boardmann en 1996. A noter que la position la plus aérodynamique observée (1993) fut celle dite « Obree » (**Fig. 2-1**) du même nom que le cycliste Graeme Obree qui l'utilisa pour battre le record de l'heure une première fois.

Il est intéressant de noter que Graeme Obree a battu le record de Moser en développant une puissance inférieure alors qu'ils mesurent la même taille. L'aire frontale projetée est plus grande que celle de Rominger et de Boardmann, mais le coefficient de forme est le plus petit avec une valeur de 0,50. En 1996, Chris Boardmann utilisa la position de Obree de 1994 (appelée position « Superman ») (**Fig. 2-2**) pour établir la meilleure performance absolue

actuelle du record de l'heure au niveau de la mer. Les prolongateurs sont placés très loin devant l'axe de la roue avant pour étirer le corps le plus possible, permettant une réduction de l'aire frontale projetée.



Figure 2-2 Position « Superman » de Boardmann en 1996

Martin et al. (1998) se sont penchés sur la mise au point d'un modèle mathématique qui permettrait d'évaluer la performance en cyclisme sur route. Un des paramètres de leur étude a été de prendre en compte le vent, sa vitesse et sa direction. Le coefficient de traînée ($C_x A_t$) a été déterminé en soufflerie pour des directions de vent allant de 0° (en face du cycliste) à 15° (sur l'un des côtés du cycliste). Les valeurs du $C_x A_t$ diminuent plus l'angle devient grand. Après un test ANOVA, cette diminution s'est avérée non significative. Or cette approche pourrait être intéressante pour déterminer l'aire projetée des cyclistes à des valeurs angulaires différentes de 0° (Aire frontale projetée), pour prendre en compte les changements d'aires corporelles exposées au vent.

De la même manière Heil D.P. (2005) a établi un modèle pour tenter de prédire la performance au record de l'heure. Celui-ci se base sur la masse corporelle du cycliste et la relation qu'il existe entre la masse et la performance, au niveau de la mer et en altitude. Heil se réfère à ses 2 études précédentes (2001 ; 2002) pour évaluer A_t et le C_x selon la masse

corporelle (m) des cyclistes. Pour la position utilisée lors du record de l'heure, l' A_t peut être prédite par l'équation suivante ($R^2 = 0,52$, $Es^\dagger = 0,028 \text{ m}^2$) :

$$A_t = 0,03534 \times m^{0,594} \quad (11)$$

Cette estimation dérivée du C_x provient d'une analyse de données de soufflerie (Heil, 2001). Cette analyse suggère que C_x tend à diminuer avec une augmentation de la masse élevée à la puissance - 0,45. C_x est donc exprimé selon l'équation suivante :

$$C_x = 4,45 \times m^{-0,45} \quad (12)$$

En utilisant l'équation 12, on obtient une gamme de 0,76 à 0,56 respectivement pour des cyclistes de 50 à 100 kg.

Néanmoins l'évaluation du $C_x A_t$ est imprécise, et surtout elle ne peut pas prendre en compte les variabilités inter – et intra – individuelles de positionnement sur le vélo.

2.2.2.4 Exemple de 2 méthodes de détermination du $C_x A_t$

Le coefficient de traînée aérodynamique est composé du coefficient de forme (C_x) et de l'aire frontale projetée totale (A_t). Si certaines techniques existent pour évaluer indépendamment A_t , il n'en est pas de même pour le C_x . Le coefficient de traînée est donc la composante de la résistance de traînée la plus complexe et la plus difficile à mesurer. Pourtant il est possible de l'estimer indirectement à l'aide de différentes méthodes.

Néanmoins toutes ces méthodes ont le même de mode opératoire, évaluer un paramètre composé du $C_x A_t$, la traînée aérodynamique ou la puissance développée, pour ensuite l'isoler mathématiquement et ainsi obtenir une valeur plus ou moins précise.

De nos jours, la soufflerie est la méthode la plus précise pour évaluer le $C_x A_t$. Le principe est que le sujet et son équipement, en l'occurrence son vélo, sont placés sur une

[†] Es : Erreur Standard, estimation de la déviation standard de la corrélation

plateforme de force (celle de la soufflerie de type S4 possède 6 composantes). Trois dynamomètres à jauges de contraintes, dont les axes de mesure sont dirigés perpendiculairement au plancher, transmettent les poussées verticales à des butées hydrostatiques. Trois autres dynamomètres répartis dans un même plan horizontal et orientés suivant des directions orthogonales privilégiées, sont utilisés pour déterminer les composantes horizontales du torseur des efforts. Cette installation est parfois pivotante (Allied Aerospace, Californie, ETATS-UNIS), de manière à exposer le sujet et son équipement au vent sous différents angles. La vitesse du vent peut atteindre 200 km.h^{-1} dans des souffleries à grande vitesse (**Fig. 2-3**).

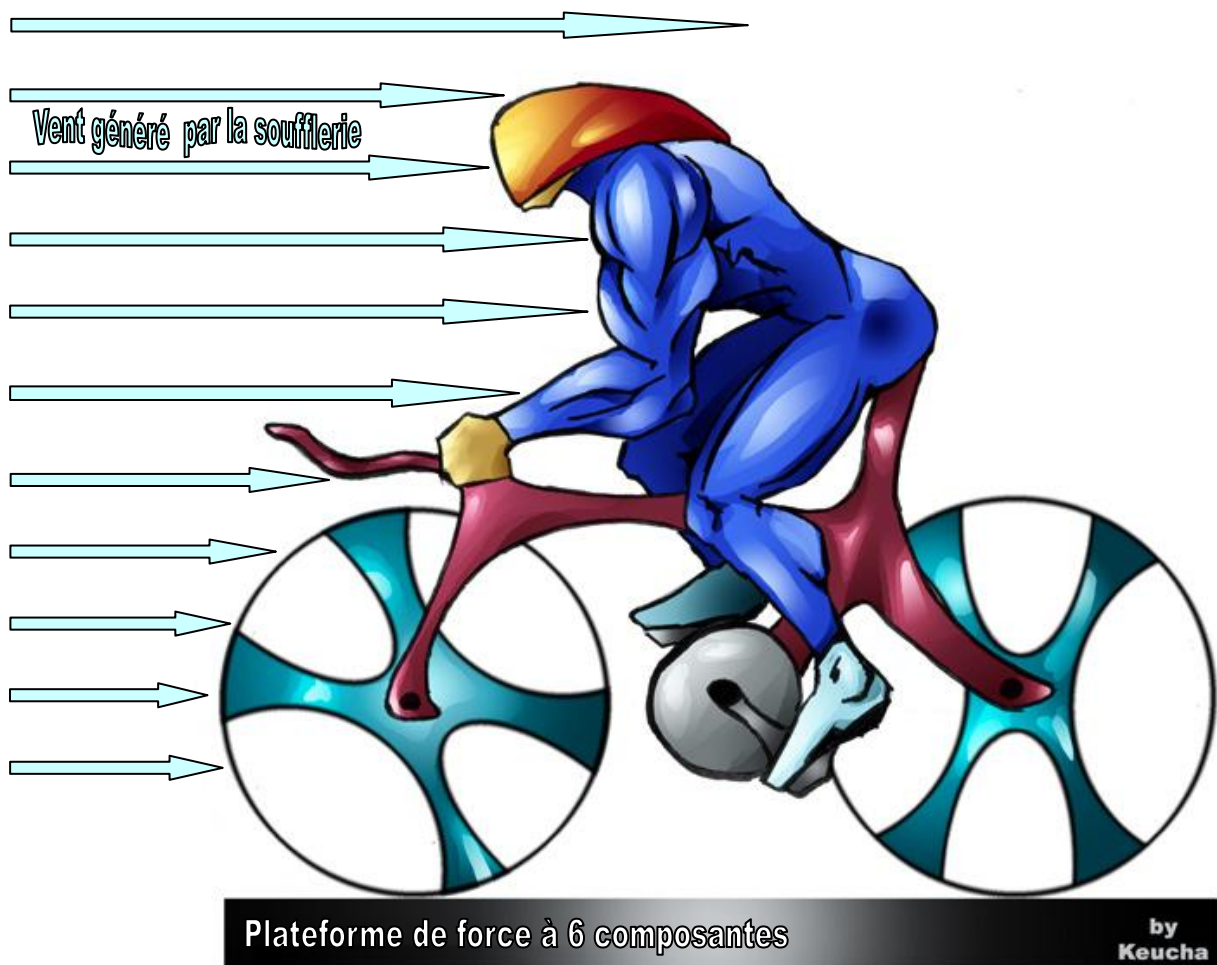


Figure 2-3 Schéma d'un cycliste en soufflerie sur plateforme de force vue de profil

La soufflerie permet donc de calculer en direct le coefficient de traînée aérodynamique par une simple transformation mathématique :

$$C_x A_t = \frac{R_x}{0,5 \rho v^2} \quad (13)$$

La traînée R_x est mesurée par la plateforme de force et la densité volumique ainsi que la vitesse sont des données connues.

Néanmoins les tests en soufflerie sont onéreux. C'est pourquoi certains auteurs ont élaborés des méthodes utilisable à la fois sur le terrain et en laboratoire permettant d'évaluer le $C_x A_t$ à partir des puissances développées à vitesse constante (Grappe et al., 1997). Les résistances totales à l'avancement (R_t , en N) sont égales à la puissance mécanique externe (P , en W) divisée par la vitesse de course (v , en $m.s^{-1}$) :

$$R_t = P / v \quad (14)$$

Or sur terrain plat, les résistances totales à l'avancement sont composées principalement de 2 résistances (Candau et al., 1999), la résistance de traînée aérodynamique (R_x , en N) et la résistance de friction, et ces résistances de friction sont dépendantes en majeure partie des résistances de roulement (R_r , en N) :

$$R_t = R_x + R_r \quad (15)$$

$$R_t = 0,5 \times \rho \times C_x \times A_t \times v^2 + C_r \times m \times g \quad (16)$$

On peut donc exprimer les résistances totales sous la forme de l'équation d'une droite $f(x) = ax + b$, où a et b sont 2 constantes :

$$a = 0,5 \times \rho \times C_x \times A_t \quad (17)$$

$$b = C_r \times m \times g \quad (18)$$

$$R_t = av^2 + b \quad (19)$$

La puissance externe mécanique développée peut être évaluée à l'aide d'appareils tels que le SRM (Schoberer Rad Messtechnik, Welldorf, Germany), le Power Tap, Grappe et al. (1997) ont utilisé un autre système, le Max One (Look SA Nevers, France). Il faut imposer une vitesse constante au cycliste. Il est ensuite possible d'obtenir les valeurs de $C_x A_t$ en accord avec l'équation 16 ($C_x A_t = a / 0,5 \times \rho$) à partir de la pente a de l'équation 19 (Fig. 2-4).

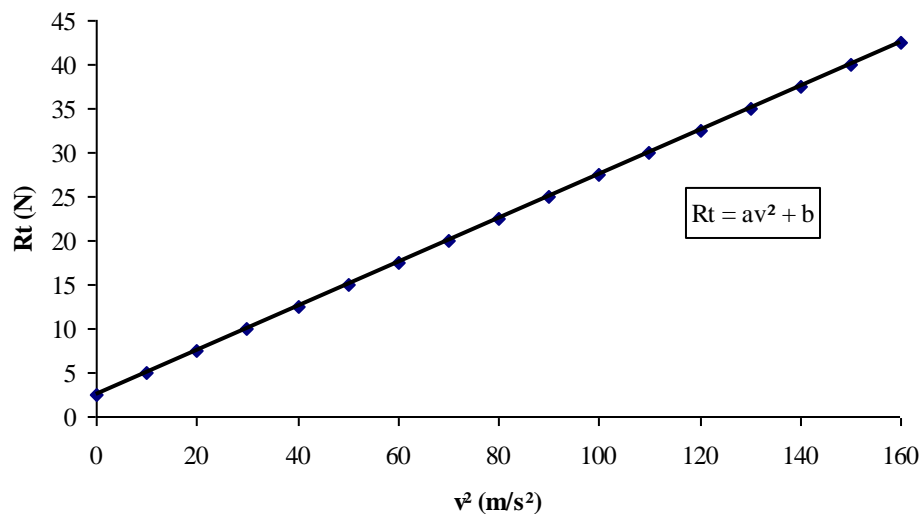


Figure 2-4 Evolution typique de la résistance totale à l'avancement en fonction du carré de la vitesse

3 Objectifs et hypothèse de cette étude

Le but de cette étude est de tester la validité et la reproductibilité d'une nouvelle méthode numérique de mesure des aires frontales projetées qui utilise le logiciel CAO Pro/ENGINEER, en la comparant à une méthode déjà validée : la méthode de pesage des photographies.

Notre hypothèse est que cette nouvelle méthode numérique permet d'obtenir des valeurs valides et reproductibles

4 Méthodologie

4.1 Les sujets

Des cyclistes masculins ($n = 9$) évoluant en compétition dans les niveaux régionaux et nationaux se sont portés volontaires pour cette étude. Chaque sujet a lu et signé un document d'information et de consentement avant d'effectuer l'expérience dans le Laboratoire d'Analyse des Contraintes Mécaniques (LACM) à l'Université de Reims, Champagne-Ardenne, FRANCE.

4.2 Mesures

4.2.1 Anthropométrie

Les données anthropométriques classiques ainsi que des valeurs spécifiques à l'expérience ont été mesurées dans le but de mesurer A_t et A_c (**Tab. 4-1**).

Tableau 4-1 Résumé des mesures descriptives et anthropométriques de $n = 9$ cyclistes masculins

Variables	Moyenne	Ecart-Type
Age (années)	26,7	13,9
Expérience (années)	13,3	9,8
Entraînement hebdomadaire (km.sem^{-1})	202	109,8
Masse corporelle (kg)	72,7	8,6
Hauteur du corps (m)	1,89	0,06
Hauteur assis (m)	1,39	0,07
Hauteur vélo (m)	0,93	0,03
Surface cutanée totale (m^2) ^a	1,87	0,11

^a Calculée en utilisant la formule de Shuter et Aslani (2000) et convertie en m^2

La taille (m) des sujets a été mesuré avec un appareil utilisé par les médecins, leur masse corporelle totale (en kilogramme) à l'aide d'un pèse-personne électronique (TX655,

Terraillon). Pour les besoins de l'expérience, nous avons également mesuré la hauteur pédale – tête (H_a) (**Fig. 4-1-A**), qui mesure la distance entre la face supérieure de la pédale où le pied repose et le sommet du crâne, et la hauteur du vélo (H_v), qui correspond à la distance entre le sol et la face supérieure de la potence (**Fig. 4-1-B**). La masse corporelle et la taille des sujets sont utiles pour calculer la surface cutanée totale (A_{ct}) des sujets en utilisant l'équation corrigée de Du Bois et Du Bois par Shuter et Aslani (2000), qui ont établis à l'aide des méthodes de statistiques modernes de nouveaux coefficients plus précis[‡] avec h est en cm, et p en kg, donc A_{ct} est en cm²:

$$A_{ct} = 94,9 \times h^{0,655} \times p^{0,441} \quad (20)$$

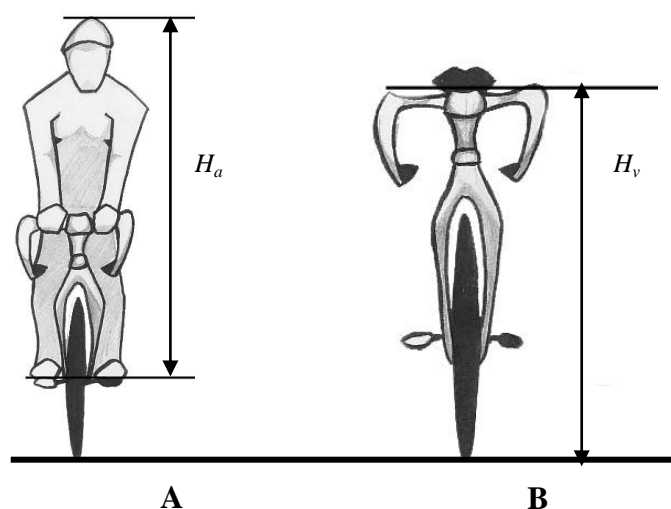


Figure 4-1 Mesures anthropométriques du cycliste (H_a) et de son vélo (H_v)

4.2.2 Protocole

Les sujets utilisent (exception faite de leur casque) leur propre vélo d'entraînement, leurs chaussures, leurs pédales automatiques et des vêtements moulants sombres pour contraster avec le mur blanc situé derrière eux, sur toutes les photographies.

[‡] Il n'existe pas de différences statistiques significatives avec l'équation de Du Bois et Du Bois (1916), néanmoins la différence entre les 2 équations est de 0,03 m² soit l'aire d'une feuille A5.

Le vélo est placé sur un « Home Trainer » pour le maintenir droit, et un frein est enclenché pour bloquer les pédales dans la position désirée.

La mesure des aires frontales projetées est dérivée de photographies prises en intérieur avec un appareil photo numérique (Canon EOS 300D, résolution 8 millions de pixels) avec flash. Cet appareil est monté sur un trépied, il est situé à 5 m face aux sujets et à 1,1 m au dessus de la surface du sol (Heil D.P., 2001). On place également un autre appareil photo (Nikon Coolpix 4300, résolution 4 millions de pixels) à 90° sur l'un des côtés des sujets, à 3 m des sujets et à 1,1 m au dessus de la surface du sol, l'objectif est aligné sur l'axe du pédalier (Fig. 4-2). Ces photographies serviront ultérieurement pour une autre étude.

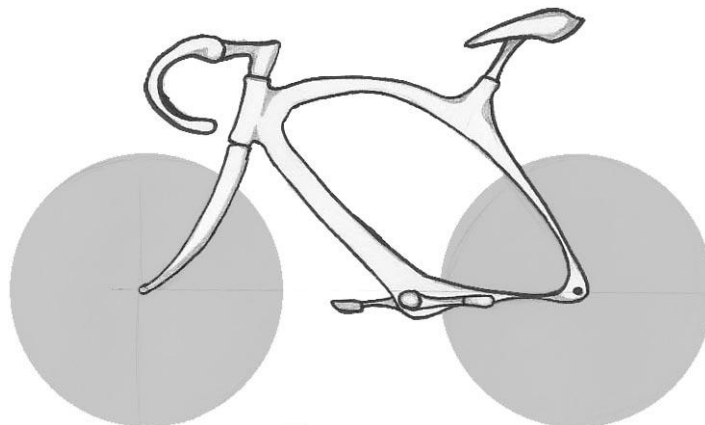


Figure 4-2 Vue du 2^{ème} appareil photographique numérique et position des pédales

Pour les photographies, les sujets sont placés dans 2 positions différentes. Dans les 2 positions, les sujets regardent l'objectif de l'appareil, et leurs pieds sont placés de la manière suivante : le pied droit est devant (*i.e.* position de la pédale à 90°, où 0° est le point mort supérieur) et le pied gauche est derrière (position de la pédale à 270°) (Fig. 4-2). Pour la première position, le sujet place ses 2 mains sur le haut du guidon proche de la potence, les bras tendus (*Position « Montée de col »*). Pour la seconde position, le sujet place ses mains en

(A_i) sont détournés à l'aide de courbes de Bézier[§] (**Fig. 4-4-C**). L' A_c englobe tout le corps du cycliste, y compris ses chaussures et ses vêtements. L' A_t inclut l' A_c et chaque portion observable du vélo, à l'exception des câbles de dérailleurs, des freins et du « Home Trainer » (Heil D.P., 2002).

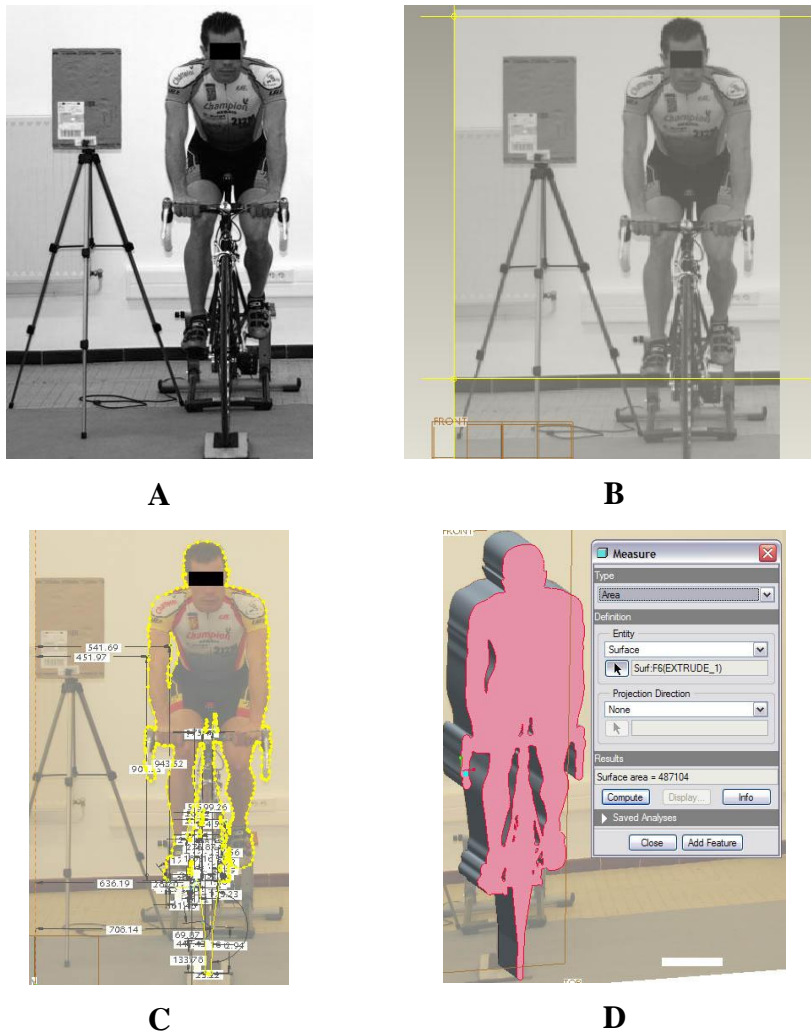


Figure 4-4 Processus de mesure de l'aire frontale projetée dans Pro/ENGINEER

[§] Les courbes de Bézier sont modélées à l'aide d'une technique paramétrique polynomiale. Elles peuvent être définies par plusieurs sommets. Chaque sommet est contrôlé par 2 autres points qui contrôlent les vecteurs de tangentes des extrémités. Les courbes de Bézier ont été inventées par P. Bézier dans un but de modélisation automobile informatisée.

Une fois le contour défini, la zone délimitant l'aire frontale projetée est extrudée, (*i.e.* transformée en solide) car il n'est pas possible de mesurer une aire sans surface tangible. Grâce au mode « Analysis » de Pro/E, on sélectionne la mesure d'Aire, et on sélectionne la surface obtenue par extrusion, le logiciel calcule alors l'aire en mm² (**Fig. 4-4-D**). Un exemple de détourage des deux positions, avec et sans vélo, est présenté en **figure 4-5** :

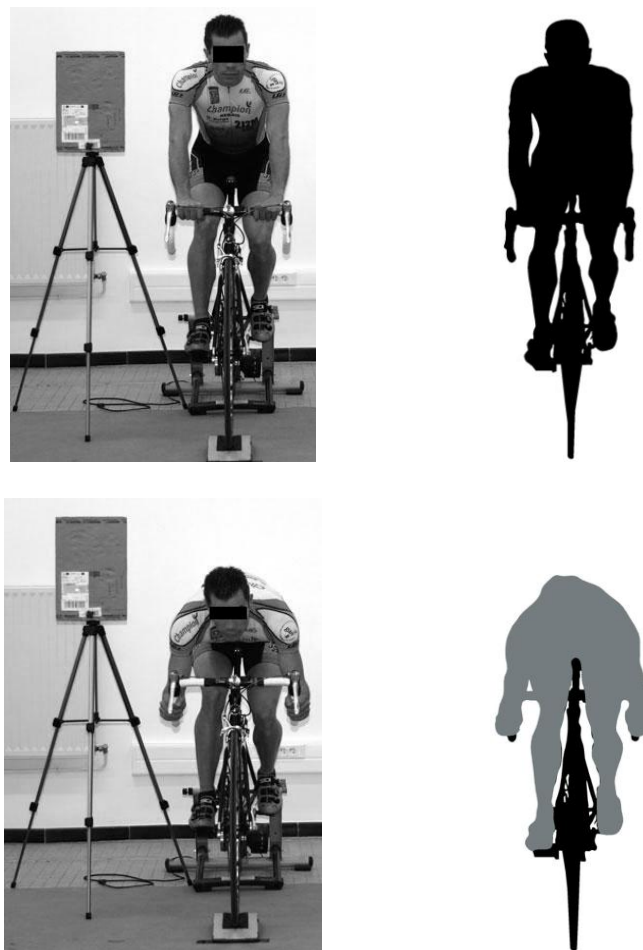


Figure 4-5 Détourage numérique à l'aide de courbes de Bézier dans les 2 positions étudiées

On compare, pour validation, cette méthode à la méthode de pesage des photographies (Capelli et al., 1993; Du Bois and Du Bois, 1915; Heil D.P., 2001; Heil D.P., 2002; Olds et al., 1995; Padilla et al., 2000; Swain, 1987). Donc l' A_c des 9 sujets a également été déterminée en utilisant cette méthode. Pour chaque sujet, 2 photographies, représentant les

2 positions testées des sujets et les zones de calibration, ont été développées (10 x 13 cm). A l'aide d'une paire de ciseaux, les photos ont été soigneusement découpées pour garder 2 parties distinctes : le cycliste (sans son vélo) et la zone de calibration. Ces parties sont pesées individuellement dans une balance Metler Toledo AB 204 ($\pm 0,001$ gr de sensibilité). L' A_c est calculée pour cette méthode en multipliant la surface de l'aire connue (0,110148 m²) par le ratio de la masse de la photographie du cycliste divisé par la masse de la photographie de la zone de calibration.

4.2.4 Applications pratiques

La résistance totale opposée au mouvement d'un cycliste (R_t , en N) sur terrain plat peut être décrite par l'équation suivante (Grappe et al., 1997) :

$$R_t = 0,5 \cdot \rho \cdot C_x \cdot A_t \cdot v^2 + C_r \cdot m \cdot g \quad (21)$$

Or la puissance mécanique externe développée (P_{ext} , en W) est égale au produit de la vitesse de déplacement (v , en m.s⁻¹) par la résistance totale opposée au mouvement du cycliste (R_t) :

$$P_{ext} = R_t \times v \quad (22)$$

Pour illustrer les résultats obtenus dans cette étude, et comprendre l'impact réel de l' A_t sur la performance en cyclisme, une comparaison théorique est proposée entre 2 sujets de cette étude, placés dans la position « Aérodynamique ».

A partir des équations 22 et 23, nous remplacerons toutes les valeurs connues sous le tableur Excel (Microsoft), nous attribuerons arbitrairement pour les 2 cyclistes de notre étude un même $C_x = 0,75$ (correspond à la position de Merckx, 1972 lors du record de l'heure, d'après Padilla et al., 2000), et un même coefficient de roulement ($C_r = 0,003$), une même masse de vélo (7 kg). Dans les calculs, la puissance dissipée par la friction de la chaîne a été

négligée, on choisit de prendre comme masse volumique ρ_0 , et une même puissance ($P = 300$ W). Un calcul par itération permettra de connaître la valeur estimée de la vitesse (en $m.s^{-1}$). Ainsi l'influence de l' A_f sur la vitesse de course sera démontrée.

Ces 2 cyclistes seront également comparés avec un Véhicule à Propulsion Humaine (VPH), le « Varna Diablo 2 » conçu par George Georgiev et piloté par Sam Whittingham (Fig. 4-7), et qui détient le record sur 200 m lancé (130 km/h) et le record sur 1 heure (84, 215 km) est en fait un vélo couché caréné.



Figure 4-6 Le vélo couché caréné : le « Varna Diablo 2 »

Les données de référence du « Varna Diablo 2 » sont référencées dans le **Tableau 4-2**, elles permettront de comparer ce VPH aux 2 autres cyclistes étudiés.

Tableau 4-2 Données techniques du « Varna Diablo 2 »

A_f (m ²)	0,191
C_x (sans unité)	0,097
C_r (N)	0,005
Masse (kg)	100

4.2.5 Analyses statistiques

La validité et la reproductibilité de la méthode numérique Pro/E ont été testées par rapport à la méthode de référence (méthode de pesage des photographies).

Pour déterminer la reproductibilité des 2 méthodes de mesure de l' A_c (méthode de pesage et méthode numérique Pro/E), la même position d'un sujet sans son vélo (A_c) est détournée 30 fois sur Pro/E et la photo correspondante est développée 30 fois. Le processus de découpage et de pesage est répété le même nombre de fois. Nous déterminons alors le coefficient de variation (CV) pour les 2 méthodes, avec s et m , respectivement, l'écart type et la moyenne de l'ensemble des données, calculé de la manière suivante :

$$CV = \left(\frac{s}{m} \right) \times 100 \quad (23)$$

Après avoir testé la normalité des données grâce au test de Kolmogorov-Smirnov, les valeurs d'Ac (n = 18) de la nouvelle méthode ont été comparées à la celles obtenues par la méthode de pesage, à l'aide du test T de Student en séries appariées. Le test de Bland & Altman (Altman and Bland, 1983; Bland and Altman, 1986; Grenier et al., 2000) a également été effectué. Le biais (moyenne des différences), la limite des concordances (biais \pm 2 ET), ainsi que l'intervalle de confiance à 95 % du biais (IC_{95%}) ont été calculés entre les 2 méthodes. Le lien existant entre les 2 méthodes a été évalué par un calcul de coefficient de corrélation de Bravais – Pearson (r). Le seuil de significativité était fixé à $p < 0,05$.

5 Résultats

Concernant la reproductibilité des 2 méthodes, les coefficients de variation, ainsi que les moyennes (ET) calculés sur les 2 méthodes sont présentés dans le **tableau 5-1** :

Tableau 5-1 Coefficient de variation des 2 méthodes comparées sur 30 valeurs mesurées

	Moy. \pm ET (m ²)	CV (%)
Méthode numérique Pro/E	0,330 \pm 0,0003	0,10
Méthode de pesage	0,335 \pm 0,0042	1,26

Concernant la validité de la nouvelle méthode par rapport à la méthode de référence, le test T de Student nous indique (**Tab. 5-2**) qu'il n'existe aucune différence significative entre les 2 méthodes de mesure de l' A_c dans la position « Montée de col » ($p = 0,43$) ainsi que dans la position « Aérodynamique » ($p = 0,14$).

Tableau 5-2 Comparaison des mesures de l' A_c des 2 méthodes

Position du cycliste	Méthode de pesage	Méthode numérique Pro/E
	Aire Corporelle (A_c) (m ²)	Aire Corporelle (A_c) (m ²)
« Montée de col »	0,432 \pm 0,030	0,430 \pm 0,031
« Aérodynamique »	0,341 \pm 0,029	0,338 \pm 0,029

Concernant le test de Bland & Altman (**Fig. 5-1**), le biais (∂) entre les 2 méthodes est de 0,003 m², les limites de concordance supérieure et inférieure du biais sont respectivement de 0,015 et - 0,010 m², et enfin les limites supérieure et inférieure de l'IC_{95%} sont respectivement de 0,006 et - 0,001 m².

Concernant le calcul du coefficient de corrélation de Bravais – Pearson ($r = 0,99$, $E_s = 0,006$ m²), il indique que les 2 méthodes sont fortement corrélées. L'analyse par régression linéaire également présentée en **figure 5-2** montre qu'il existe une relation linéaire entre les 2 méthodes.

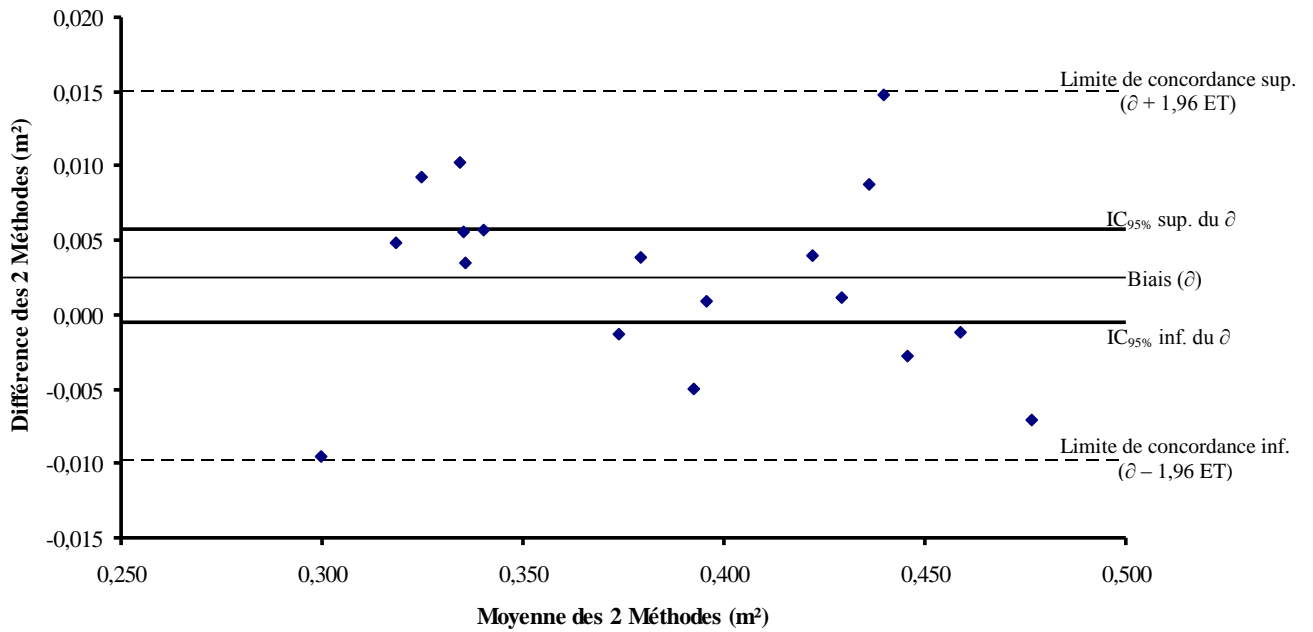


Figure 5-1 Test de Bland & Altman

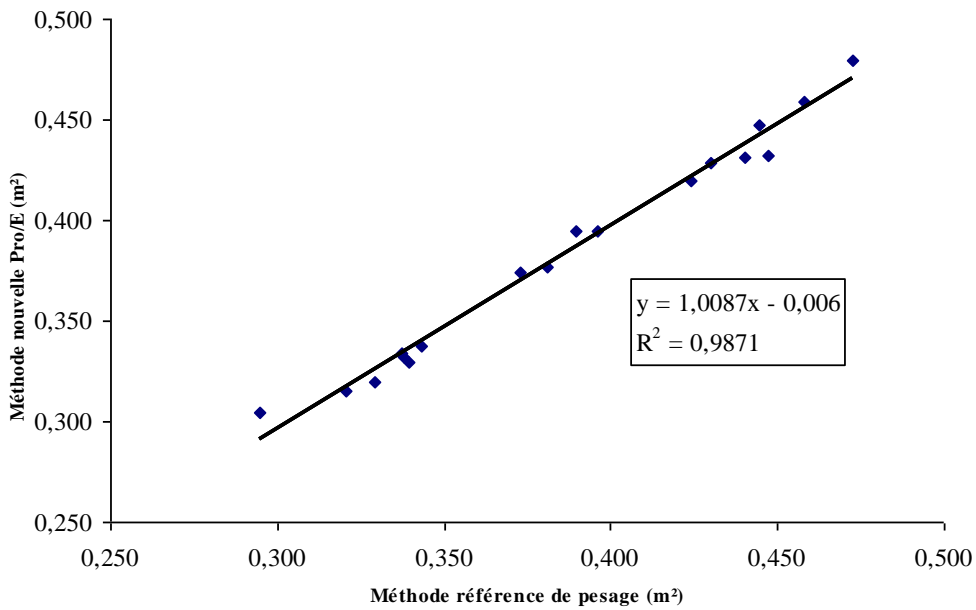


Figure 5-2 Corrélation entre la nouvelle méthode numérique Pro/E et la méthode référence de pesage

Les valeurs moyennes de l' A_c et de l' A_t pour chacune des 2 positions mesurées, ainsi que la différence $A_t - A_c$ (A_v) sont reportées dans le **tableau 5-3**.

Tableau 5-3 Valeurs moyennes des aires mesurées numériquement dans les 2 positions étudiées

<i>Position des cyclistes</i>	<i>Aire Corporelle (A_c) (m²)</i>	<i>Aire Totale (A_t) (m²)</i>	<i>Différence moyenne ^a (m²)</i>
« Montée de col »	0,430 ± 0,031	0,533 ± 0,031	0,103 ± 0,008
« Aérodynamique »	0,338 ± 0,029	0,426 ± 0,031	0,088 ± 0,006

^a La différence moyenne correspond à la moyenne des aires observables des vélos (A_v)

Le rapport A_c / A_{ct} permet d'obtenir le pourcentage de la surface corporelle totale utilisée, et donc de caractériser la position employée. Comme indiqué précédemment, les pourcentages de tous les sujets ont été mesurés avec l' A_{ct} calculée à l'aide de l'équation de [Shuter et Aslani \(2000\)](#). La position « Montée de col » vaut environ 22,94 % et la position « Aérodynamique » vaut 18,02 % de l'aire cutanée totale.

Concernant l'application pratique démontrant l'intérêt de l' A_t dans la performance en cyclisme pour une même puissance développée, tous les paramètres ainsi que la vitesse résultante théorique, sont indiqués dans le **tableau 5-4**. Pour la même puissance développée de 300 W, le sujet 1 dont l' A_t est égale à 0,385 m² parcourt 41,02 km en 1 heure, soit 1,38 km de plus que le sujet 2 dont l' A_t est égale à 0,425 m², soit une aire supplémentaire de 0,04 m² par rapport au sujet 1. Pour le « Varna Diablo 2 », la distance parcourue en 1 heure pour une puissance de 300 W est de 88,70 km, soit plus du double réalisé par le sujet 1.

Tableau 5-4 Récapitulatif des paramètres nécessaires pour obtenir la vitesse théorique (m.s⁻¹ et km.h⁻¹) des 2 cyclistes et du VPH pour la même puissance

	<i>Sujets 1</i>	<i>Sujets 2</i>	<i>« Varna Diablo 2 »</i>
<i>m (Sujet + véhicule) (kg)</i>	71	77	100
<i>ρ₀ (kg.m⁻³)</i>		1,293	
<i>g (m.s⁻²)</i>		9,81	
<i>C_x (sans unité)</i>	0,75	0,75	0,097
<i>C_r (sans unité)</i>	0,003	0,003	0,005
<i>A_t (m²)</i>	0,385	0,425	0,191
<i>Puissance (W)</i>		300	
<i>Vitesse (m.s⁻¹)</i>	11,39	11,01	24,64
<i>Vitesse (km.h⁻¹)</i>	41,02	39,64	88,70

6 Discussion

Les coefficients de variation de la méthode numérique Pro/E et de la méthode de pesage sont respectivement 0,10 et 1,26 %. Aux vues de ces résultats, il apparaît que la méthode numérique Pro/E possède une excellente reproductibilité, et que celle-ci semble être supérieure à celle de la méthode de pesage.

Ceci peut s'expliquer : *i*) par la taille des photographies développées (10 × 13 cm)^{**}, qui si elle était plus grande permettrait une plus grande précision ; *ii*) par la méthode de découpage employée pour détourer le corps du cycliste sur les photographies développées, il est nécessaire d'utiliser un outil très coupant et d'une grande précision ; *iii*) par l'agrandissement qui est utilisé lors du traitement de l'image sur Pro/E ; *iv*) par la plus grande précision obtenue lors du détourage numérique à l'aide des courbes de Bézier qui épousent plus facilement les contours sinueux du corps humain.

Le test t de Student montre qu'il n'existe aucune différence significative entre la méthode numérique utilisant Pro/E et la méthode de pesage pour les 2 positions testées (« Montée de col » et « Aérodynamique »).

Le test de Bland & Altman utilisé permet d'obtenir le biais (∂) de cette méthode en comparaison à la méthode de pesage des photographies. Celui-ci exprime la différence moyenne systématiquement observée entre les 2 méthodes, et $\partial = 0,003 \text{ m}^2$. Intervalle de Confiance à 95 % du biais indique une étendue très faible ($0,0064 \text{ m}^2$). Cela signifie que si l'échantillon était plus important, l'erreur de mesure pourrait varier dans cette zone.

Le test du coefficient de corrélation de Bravais – Pearson a montré que les 2 méthodes étaient fortement corrélées ($r = 0,99$, $Es = 0,006 \text{ m}^2$) ($p < 0,01$).

^{**} Développement au format numérique standard, le format 10 × 15 étant réservé aux photographies argentiques ou aux agrandissements numériques.

Donc, en sachant que les résultats des 2 méthodes sont corrélés positivement, que la reproductibilité de la méthode numérique Pro/E est de 0,1 %, et qu'il n'existe qu'un biais de 0,003 m² avec la méthode de pesage traditionnelle, ces résultats suggèrent que **la méthode numérique Pro/E est reproductible et valide pour mesurer l'aire projetée** par rapport à la méthode de pesage des photographies.

Les valeurs mesurées grâce à la méthode numérique Pro/E sont comparées à celles observées dans la littérature. Ces 2 positions correspondent à 2 des 4 positions étudiées par Heil (2002). Ainsi pour la position « Montée de col », les aires frontales projetées moyennes mesurées numériquement sont respectivement comparées aux données de Heil : $0,430 \pm 0,031$ vs de $0,401 \pm 0,0089$ m² pour A_c et $0,533 \pm 0,031$ vs $0,525 \pm 0,0099$ m² pour A_t . Pour la position « Aérodynamique », les valeurs moyennes observées sont respectivement comparées aux données de Heil : $0,338 \pm 0,029$ vs $0,342 \pm 0,0077$ m² pour A_c et $0,426 \pm 0,031$ vs $0,460 \pm 0,0091$ m² pour A_t . Les valeurs de ces 2 études sont dans un même ordre de grandeur. Cette variation peut être attribuée aux différences inter – et intra – individuelles des cyclistes sur les vélos. Même avec des consignes de position précises, chaque cycliste adoptera une position un peu différente qui dépendra de sa souplesse articulaire et musculaire. Cette différence peut aussi être due au fait que la méthode de digitalisation exige une aire de calibration pour calculer un ratio. Or Heil (2001 ; 2002) a choisi une zone de calibration dont l'aire, qui est égale à 0,4185 m², est plus grande que l' A_t de la position la plus aérodynamique. Ce qui nuit grandement la précision du ratio et donc la mesure de l'aire frontale projetée.

Néanmoins Dorel et al. (2005) a utilisé la même méthode que Heil (2001 ; 2002) pour mesurer l' A_t d'une position de cyclistes sur pistes, mais avec une aire de calibrage bien plus petite (0,16 m²). Cette position avait été également mesurée par Heil en 2002. Ce dernier et Dorel et al. ont trouvé la même valeur moyenne d' A_t (0,531 m²). Pourtant l'échantillon de

sujets de Dorel et al. possède un gabarit moyen plus important que celui de Heil (Sujets de même taille avec 10 kg de plus).

La différence moyenne mesurée représente l'aire observable du vélo. Celle-ci est variable en fonction de la position, car des parties du vélo peuvent être cachées par le corps. Ainsi les valeurs moyennes d' A_v sont respectivement 0,103 et 0,088 m² pour les positions « Montée de col » et « Aérodynamique », soit respectivement 19,3 et 20,6 % de l' A_t moyenne. Cela confirme l'intérêt à diminuer l'aire frontale projetée du vélo, en profilant le cadre, et également tout le matériel, comme par exemple la gourde qui peut être placée derrière la selle.

La comparaison entre 2 cyclistes développant la même puissance a pu montré l'importance que joue l' A_t dans la performance. Pour une différence de 0,04 m² (soit 9,4 % de l' A_t), il y a un gain de 1,38 km.h⁻¹ (soit 3,4 % de la vitesse). Et l'illustration parfaite est le vélo couché avec carénage. En effet, en réduisant au maximum l' A_t et le C_x , les pilotes peuvent atteindre de très grandes vitesses (130 km.h⁻¹ sur le 200 m lancé, avec le « Varna Diablo 2 » piloté par Sam Whittingham). En développant une puissance assez modeste (≈ 275 W, valeur moyenne mesurée par SRM pour Sam Whittingham dans son « Varna Diablo 2 »), le record de l'heure établi dans ces conditions est 84,215 km.

Les exemples de notre étude montrent bien l'intérêt de la mesure et de la réduction de l'aire frontale projetée. Ainsi l'amélioration des performances est fortement corrélée avec l'amélioration de l'aérodynamisme (Millet et Candau, 2002). La réduction de l'aire frontale projetée semble donc être un des paramètres fondamentales sur lequel les chercheurs et les entraîneurs doivent porter leur attention.

7 Conclusion

Le résultat principal de notre étude indique que la nouvelle méthode numérique est valide et reproductible par rapport à la méthode de pesage des photographies déjà validée. En outre elle a pour avantage non négligeable de ne pas nécessiter de zone de calibration. En effet, un étalonnage est à faire sous l'interface de Pro/ENGINEER, et celui-ci nécessite de connaître uniquement une distance verticale ou horizontale. Cela peut permettre par exemple de prendre des photographies en situation de course (contrairement aux autres méthodes), ou bien encore de les prendre à partir d'un véhicule qui précède le sportif. Cette « étalonnage direct » permet également de gagner en précision, en effet, en se passant de zone de calibration, on évite le calcul du ratio dont la précision est entièrement dépendante de la taille de la zone de calibration. Il faut noter également que cette méthode est très rapide grâce aux courbes de Bézier qui facilitent le travail de détournage en épousant assez facilement les contours du cycliste, et précise au mm².

Dans un avenir proche, cette méthode servira de base pour l'étude plus poussée du coefficient de traînée en cyclisme (via une méthode décélération, [Candau et al., 1999](#)), avec un plus grand nombre de positions étudiées, et plus de paramètres (avec casque et sans casque, avec prolongateur aérodynamique...). Ce sera également le cas dans d'autres domaines sportifs, tels que le cyclisme sur piste, le BMX, le ski, le ski à roulette et enfin le roller – skating.

Elle permettra également de travailler dans le domaine médical en quantifiant les résistances à l'avancement subies par les handicapés en fauteuil roulant, traditionnel et handisport. Ainsi il sera possible de concevoir des équipements sportifs et médicaux adaptés aux utilisateurs, et permettant un meilleur coût énergétique. Dans ce cas, ces personnes ayant une capacité physique réduite pourraient soit se déplacer à leur vitesse habituelle à moindre coût énergétique, soit se déplacer à une plus grande vitesse.

8 Références

- 1 Altman, D. G., Bland, J. M., (1983). Measurement in medicine:the analysis of the method comparison studies. *Statistician* **32**, 307-317.
- 2 Bland, J. M., Altman, D. G., (1986). Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *Lancet* **1**, 307-310.
- 3 Candau, R., Grappe, F., Ménard, M., Barbier, B., Millet, G. P., Hoffman, M. D., Belli, A. R., Rouillon, J. D., (1999). Simplified deceleration method for assessment of resistive forces in cycling. *Medicine & Science in Sports & Exercice* 1441-1447.
- 4 Capelli, C., Rosa, G., Butti, F., Ferretti, G., Veicsteinas, A., (1993). Energy cost and efficiency of riding aerodynamics bicycles. *European Journal Applied Physiology* **67**, 144-149.
- 5 Clarys, J. P., (1979). Human Morphology and Hydrodynamics. *International Series on Sport Sciences* **8**, 3-41.
- 6 Dorel, S., Hautier, C. A., Rambaud, O., Rouffet, D., Van Praagh, E., Lacour, J.-R., Bourdin, M., (2005). Torque and power-velocity relationships in cycling:Relevance to track sprint performance in world-class cyclists. *Int J Sports Med* **26**, 739-746.
- 7 Du Bois, D., Du Bois, E. F., (1915). Clinical calorimetry: the measurement of the surface area of man. *Arch Intern Med* **15**, 868-881.
- 8 Du Bois, D., Du Bois, E. F., (1916). Clinical Calorimetry:a formula to estimate the approximate surface area if height and weight be known. *Arch Intern Med* **17**, 863-871.

- 9 Grappe, F., Candau, R., Barbier, A., Hoffman, M. D., Belli, A., Rouillon, J. D., (1999). Influence of tire pressure and vertical load on coefficient of rolling resistance and simulated cycling performance. *Ergonomics* **10**, 1361-1371.
- 10 Grappe, F., Candau, R., Belli, A., Rouillon, J. D., (1997). Aerodynamic drag in field cycling with special reference to the Obree's position. *Ergonomics* **40**, 1299-1311.
- 11 Grenier, B., Dubreuil, M., Journois, D., (2000). Comparaison de deux méthodes de mesure d'une même grandeur: méthode de Bland et Altman. *Ann Fr Anesth Réanim* 2000 **19**, 128-135.
- 12 Heil D.P., (2001). Body mass scaling of projected frontal area in competitive cyclists. *European Journal Applied Physiology* **85**, 358-366.
- 13 Heil D.P., (2002). Body mass scaling of frontal area in competitive cyclists not using aero-handlebars. *European Journal Applied Physiology* **87**, 520-528.
- 14 Heil D.P., (2005). Body size as a determinant of the 1-h cycling record at sea level and altitude. *European Journal Applied Physiology* **93**, 547-554.
- 15 Martin, J. C., Milliken, D. L., Cobb, J. E., McFadden, K. L., Coggan, A. R., (1998). Validation of a mathematical model for road cycling power. *Journal applied of Biomechanics* **14**, 245-259.
- 16 Millet, G. P., Candau, R., (2002). Facteurs mecaniques du cout energetique dans trois locomotions humaines: Mechanical factors of the energy cost in three human locomotions. *Science & sports* **17**, 166-176.
- 17 Olds, T. S., Norton, K. I., Craig, N. P., (1993). Mathematical model of cycling performance. *Journal applied of physiology* **75**, 730-737.

- 18 Olds, T. S., Norton, K. I., Lowe, E. L. A., Olive, S., Reay, F., Ly, S., (1995). Modeling road-cycling performance. *Journal applied of physiology* **78**, 1596-1611.
- 19 Padilla, S., Mujika, I., Angulo, F., Goiriena, J.J. (2000). Scientific approach to the 1-h cycling world record : a case study. *Journal applied of physiology* **89**, 1522-1527.
- 20 Shuter, B., Aslani, A., (2000). Body Surface Area : Du Bois and Du Bois revisited. *European Journal Applied Physiology* **82**, 250-254.
- 21 Swain, D. P., (1987). Influence of body size on oxygen consumption during bicycling. *Journal applied of physiology* **62**, 668-672.
- 22 Toussaint, H. M., Roos, P. E., Kolmogorov, S., (2004). The determination of drag in front crawl swimming. *Journal of biomechanics* **37**, 1655-1663.
- 23 Vennell, R., Pease, D., Wilson, B., (2006). Wave drag on human swimmers. *Journal of biomechanics* **39**, 664-671.

Liste des Tableaux

Tableau 2-1 Caractéristiques des détenteurs du record de l'heure sur piste en cyclisme (d'après Padilla et al., 2000).....	18
Tableau 4-1 Résumé des mesures descriptives et anthropométriques de n = 9 cyclistes masculins.....	25
Tableau 4-2 Données techniques du « Varna Diablo 2 ».....	32
Tableau 5-1 Coefficient de variation des 2 méthodes comparées sur 30 valeurs mesurées....	34
Tableau 5-2 Comparaison des mesures de l'Ac des 2 méthodes	34
Tableau 5-3 Valeurs moyennes des aires mesurées numériquement dans les 2 positions étudiées.....	35
Tableau 5-4 Récapitulatif des paramètres nécessaires pour obtenir la vitesse théorique ($m.s^{-1}$ et $km.h^{-1}$) des 2 cyclistes et du VPH pour la même puissance.....	36

Table des Illustrations

Figure 2-1 Position de Graeme Obree (1993)	18
Figure 2-2 Position « Superman » de Boardmann en 1996.....	19
Figure 2-3 Schéma d'un cycliste en soufflerie sur plateforme de force vue de profil	21
Figure 2-4 Evolution typique de la résistance totale à l'avancement en fonction du carré de la vitesse	23
Figure 4-1 Mesures anthropométriques du cycliste (H_a) et de son vélo (H_v).....	26
Figure 4-2 Vue du 2 ^{ème} appareil photographique numérique et position des pédales.....	27
Figure 4-3 Exemple de photographies d'un sujet sur son propre vélo dans les 2 positions : A « Montée de col » B « Aérodynamique ».....	28
Figure 4-4 Processus de mesure de l'aire frontale projetée dans Pro/ENGINEER.....	29
Figure 4-5 Détourage numérique à l'aide de « B-spline » dans les 2 positions étudiées.....	30
Figure 4-6 Le vélo couché caréné : le « Varna Diablo 2 ».....	32
Figure 5-1 Test de Bland & Altman.....	35
Figure 5-2 Corrélation entre la nouvelle méthode numérique Pro/E et la méthode référence de pesage	35