

Université de Montréal

Évaluation de la surface frontale comme élément d'amélioration de l'aérodynamisme en cyclisme

par Thomas Bonamy-Cossard

École de kinésiologie et des sciences de l'activité physique
Faculté de Médecine

Mémoire présenté
en vue de l'obtention du grade de Maîtrise
Sciences de l'activité physique

Novembre 2019

© Thomas Bonamy-Cossard 2019

Université de Montréal
École de kinésiologie et des sciences de l'activité physique (EKSAP), Faculté de Médecine

Ce mémoire intitulé

Évaluation de la surface frontale comme élément d'amélioration de l'aérodynamisme en cyclisme

Présenté par
Thomas Bonamy-Cossard

A été évalué par un jury composé des personnes suivantes

Prénom Nom
Mickaël Begon, Ph. D.

Prénom Nom
Daniel Curnier, Ph. D.

Prénom Nom
Maxime Raison, Ph. D.

Résumé

Introduction : En cyclisme, la résistance aérodynamique est la force principale qui s'oppose à son déplacement et devient non négligeable dès 10 m/s. La surface de traînée (C_{DA_P}) constitue un facteur important de cette dernière et varie en fonction de la surface frontale (A_P). Ce projet de recherche veut évaluer la fiabilité et la validité d'une méthode de mesure accessible de la surface frontale (A_P). **Méthode :** 14 cyclistes ont été sélectionnés : 31 ± 14 ans; $177,21 \pm 6,73$ cm; $74,83 \pm 8,97$ kg et divisés en deux groupes, amateurs et experts. La méthode par digitalisation est utilisée pour l'évaluation de A_P et une méthode par régression linéaire est utilisée pour C_{DA_P} en utilisant le logiciel MATLAB_R2019. **Résultats :** la surface frontale obtenue est $A_P = P_1, 0,433 \pm 0,05 \text{ m}^2$; $P_2, 0,413 \pm 0,04 \text{ m}^2$; $P_3, 0,387 \pm 0,05 \text{ m}^2$ avec un ICC intra ; 0,998, et un ICC inter ; 0,523 ($p < 0,05$). Pour $C_{DA_P} = P_1, 0,414 \pm 0,07 \text{ m}^2$; $P_2, 0,435 \pm 0,14 \text{ m}^2$; $P_3, 0,399 \pm 0,12 \text{ m}^2$ avec une variation de $R = 0,10$ à $0,34$. **Conclusion :** la mesure de A_P avec une méthode simple est valide et fiable, mais la précision varie selon l'expertise de l'opérateur. La faible corrélation entre A_P et C_{DA_P} montre que A_P ne devrait pas être la seule variable à laquelle nous pouvons nous fier pour améliorer C_{DA_P} . L'évaluation de la surface frontale projetée par digitalisation permettrait d'améliorer la performance aérodynamique en cyclisme. D'autres recherches d'optimisation des outils d'évaluation aérodynamique permettraient d'obtenir des résultats plus précis.

Mots-clés : Cyclisme, aérodynamisme, performance, sports, surface frontale projetée.

Abstract

Introduction : In the cycling world, aerodynamic resistance is the principal force that oppose a moving cyclist and is most important at 10 m/s. Drag area (C_{DA_P}) is an important factor of this force and depends of the frontal area (A_P). This project wants to evaluate the reliability and the validity of an accessible method of measurements of the frontal area (A_P). **Method :** 14 cyclists were selected : 31 ± 14 years; $177,21 \pm 6,73$ cm; $74,83 \pm 8,97$ kg and divided in two groupes, amateurs et experts. The digital method is used for the evaluation of A_P and a linear regression is used with MATLAB_R2019 for finding C_{DA_P} . **Résultats :** the obtained frontal area $A_P = P_1, 0,433 \pm 0,05$ m²; $P_2, 0,413 \pm 0,04$ m²; $P_3, 0,387 \pm 0,05$ m² with an ICC intra-operator; 0,998, and an ICC inter-operator; 0,523 ($p < 0,05$). Pour $C_{DA_P} = P_1, 0,414 \pm 0,07$ m²; $P_2, 0,435 \pm 0,14$ m²; $P_3, 0,399 \pm 0,12$ m² with a correlation variation of $R = 0,10$ à $0,34$. **Conclusion :** Measuring A_P with a simple method is reliable and present good validity, but the precision will vary with the expertise of the operator. The weak correlation between A_P and C_{DA_P} show that A_P shouldn't be the only variable that we have to rely to reduce C_{DA_P} . In the end, the evaluation of frontal area with a simple digital method could increase aerodynamic performance in cyclist. Although, further research on optimising aerodynamic evaluation tools would allow to obtain results that are more precise.

Mots-clés : Cycling, aerodynamic, performance, sports, frontal area.

Table des matières

Résumé	2
Table des matières	4
Liste des tableaux	7
Liste des sigles	8
Remerciements	10
Introduction	11
Cadre théorique	13
Introduction	13
Cyclisme sport et performance	13
Performance humaine	14
Forces de résistances totales	15
Résistance aérodynamique	16
Surface de traînée aérodynamique.....	17
Coefficient de traînée aérodynamique	19
Surface frontale projetée.....	19
Masse volumique de l'air.....	21
Force totale de friction	22
Résistance au roulement	23
Force gravitationnelle.....	24
Méthodes d'évaluation aérodynamique en cyclisme	25
Soufflerie	26
CFD – Computational Fluid Dynamics	27
Régression linéaire	28
Décélération.....	30
Méthode par traction.....	31
Capteur de mesure directe du C_D	32
Calcul de la Surface frontale projetée	33
Méthode par pesée photographique.....	33
Méthode par digitalisation	34

Méthode par logiciel CAD (Computed-Aided Design).....	35
Méthode sans photo.....	35
Objectifs et hypothèse.....	36
Hypothèse.....	37
Méthodologie.....	38
Participants	38
Méthode par digitalisation.....	38
Méthode par régression linéaire	41
Lieu et Équipement.....	41
Calcul de la surface frontale effective C_{DA}	42
Essais	42
Collecte et conversion des fichiers.....	42
Détermination de C_{DA}	43
Analyse statistique	45
Résultats.....	46
Surface frontale projetée	46
Analyse statistique	46
Répétabilité.....	46
Détermination du C_{DAp}	47
Analyse statistique entre A_p et C_{DAp}.....	52
Discussion	56
Surface frontale projetée	57
Points forts.....	59
Points faibles	59
Détermination du C_{DAp}	60
Corrélation entre A_p et C_{DAp}.....	62
Points forts.....	62
Points faibles	63
Limites	64

Perspectives de recherche	65
Conclusion.....	66
Références	i

Liste des figures et tableaux

TABLEAU 1 : SURFACES DE TRAINÉES AÉRODYNAMIQUE DANS LA LITTÉRATURE POUR LES POSITIONS DONNÉES.....	ERREUR ! SIGNET NON DÉFINI.
TABLEAU 2 : SURFACE FRONTALE PROJÉTÉE DANS LA LITTÉRATURE POUR LES POSITIONS ÉTUDIÉES.....	ERREUR ! SIGNET NON DÉFINI.
TABLEAU 3 : MESURES ANTHROPOMÉTRIQUES DES SUJETS DE L'ÉTUDE	ERREUR ! SIGNET NON DÉFINI.
TABLEAU 4 : CALCULS DES SURFACES FRONTALES PROJÉTÉES	ERREUR ! SIGNET NON DÉFINI.
TABLEAU 5 : MESURES D'ICC INTRA-OPÉRATEUR ET INTER-OPÉRATEUR	ERREUR ! SIGNET NON DÉFINI.
TABLEAU 6 : SURFACES DE TRAINÉES AÉRODYNAMIQUES $C_D A_p$ DES SUJETS.....	ERREUR ! SIGNET NON DÉFINI.
TABLEAU 7 : CORRÉLATION DE PEARSON DE LA SURFACE DE TRAINÉE AÉRODYNAMIQUE	ERREUR ! SIGNET NON DÉFINI.
TABLEAU 8 : CORRÉLATION DE PEARSON ENTRE A_p ET $C_D A_p$	ERREUR ! SIGNET NON DÉFINI.
FIGURE 1 : RÉGRESSIONS LINÉAIRES DE CHAQUE GROUPES ET POSITIONS	51
FIGURE 2 : CORRÉLATIONS ENTRE LA SURFACE FRONTALE PROJÉTÉ A_p ET LA SURFACE DE TRAINÉE AÉRODYNAMIQUE $C_D A_p$	55

Liste des sigles

F_{RT} = total des forces de résistances qui s'applique au déplacement

F_{RA} = force de résistance aérodynamique

F_{RF} = force de résistance aux frictions

F_{RG} = force de résistance gravitationnelle

A_p = la surface frontale projetée du cycliste et son vélo (en m^2)

C_D = le coefficient de traînée aérodynamique (coefficient sans dimension)

$C_D A f_p$ = surface frontale effective

R_D = traînée aérodynamique

ρ = masse volumique de l'air (kg/m^3)

$\rho_0 = 1,293 kg/m^3$ (masse volumique à 760 mmHg et 273 K)

$P_{B_{ext}}$ = pression barométrique extérieure en mmHg

T = température extérieure

p = puissance

v = vitesse

C_R = coefficient de roulement (sans dimension)

R_e = nombre de Reynold (sans dimension)

P_r = pression des pneus (kPa)

m = masse du cycliste et son vélo (kg)

g = accélération gravitationnelle ($9,81 m/s^2$)

$\sin\theta$ = angle de la pente

A_{BSA} = surface corporelle totale en cm^2

W = masse corporelle du sujet sans son vélo (kg)

H = taille du sujet (cm)

C = constante de 94,9 (nombre sans dimension)

CP_x = couverture pixélisée du sujet en pixels

CP_y = couverture pixélisée de la zone d'étalonnage en pixels

SR_x = surface réelle du sujet en mm^2

SR_y = surface réelle de la zone d'étalonnage en mm^2

Remerciements

J'aimerais tout d'abord dédier et remercier mon défunt père qui nous a quittés durant ma maîtrise, le 25 février 2019. Son départ soudain et déchirant fut difficile. Il m'a supporté durant mes études et il le fait encore aujourd'hui même s'il nous a quittés. Malgré son absence, je sais qu'il est fier de ce que j'ai accompli.

Mon directeur de maîtrise, le docteur Daniel Curnier Ph. D., pour sa gentillesse et son support malgré mes difficultés. Il m'a aidé à parfaire mes connaissances, mon apprentissage et ma passion pour la science de l'activité physique.

Ma mère qui a joué son rôle de mère à la perfection pour m'offrir un support émotionnel malgré le drame que notre famille a vécu durant ma maîtrise.

Ma conjointe Élisabelle Gendron, qui m'a aidé à rester concentré et motivé dans mon projet pendant qu'elle faisait elle-même sa maîtrise.

M. Rémi Gagnon, M. Guillaume Dubois et M. Jean-Étienne Assaf, qui m'ont grandement aidé dans la portion programmation et mathématique du projet. Sans vous, je n'y serais jamais arrivé, je vous en suis éternellement reconnaissant.

Pour finir, j'aimerais également remercier la docteur Delphine Périé-Curnier Ph. D., M. Maxime Caru et M. Mojtaba Ghasemi, qui m'ont aidé à parfaire mes connaissances et à naviguer à travers plusieurs embûches durant le développement de mon projet.

Introduction

Dans la révolution des méthodes de déplacement, la bicyclette peut être considérée comme pionnière. L'invention de celle-ci par Karl Von Drais, au début du 19^e siècle, a permis aux populations de développer une plus grande autonomie en leur permettant de plus grands déplacements. Suivant son évolution, c'est vers la fin de ce siècle que les premiers évènements sportifs furent organisés. Le cyclisme devient officiellement un sport olympique en 1896 et à l'aube du 20^e siècle, l'Union Cycliste Internationale (UCI, 1900) est fondée. Tous sports confondus, le Tour de France, qui existe depuis plus de 100 ans, est une des épreuves sportives professionnelles dans les plus difficiles et les plus connues de toute la planète. Les athlètes doivent participer à 21 journées d'épreuves sur 23 jours pour un total d'environ 3 500 km. En cyclisme, la performance peut se simplifier en parcourant un trajet en moins de temps possible (Jeukendrup & Martin, 2001). De plus, lorsque l'on parle de sport professionnel, la notion de performance est capitale afin de permettre aux coureurs et aux équipes de gagner les différentes épreuves. Par conséquent, plus on augmente notre vitesse de déplacement, meilleure sera notre performance. La notion de performance se définit par deux facteurs : les facteurs internes (entraînement, nutrition) et les facteurs externes qui veulent freiner le cycliste dans son déplacement, principalement la force de résistance aérodynamique (Malizia & Blocken, 2020; Jeukendrup & Martin, 2001).

La grande popularité du cyclisme fait en sorte que sa pratique ne se limite pas uniquement aux professionnels et l'augmentation de la performance en cyclisme intéresse également les pratiquants non-experts. En effet, s'améliorer dans une activité qui nous passionne amène un sentiment de compétence et d'autonomie, ce qui augmente significativement les chances de continuer cette activité (Ryan & Deci, 2000). De plus, la bicyclette n'est plus qu'un simple moyen de déplacement ou une activité de performance, mais un moyen efficace et sécuritaire de faire de l'activité physique. Depuis plusieurs années, la littérature scientifique documente de manière exhaustive l'importance de la pratique d'activité physique pour améliorer la santé cardio-vasculaire (Berlin & Colditz, 1990).

Dans la littérature scientifique, les méthodes d'évaluation et d'amélioration des facteurs internes de la performance en cyclisme sont nombreuses et facilement accessibles à tous. Cependant, la recherche sur l'augmentation de la performance des facteurs externes, bien qu'elle soit documentée, vise surtout les cyclistes de haut niveau et les professionnels. La littérature scientifique visant les cyclistes amateurs est rare, voire presque inexistante. En effet, les vitesses évaluées (40 km/h à 60 km/h) dans les protocoles sont généralement trop élevées pour être soutenues par les cyclistes amateurs. De plus, les méthodes d'évaluations et les outils utilisés dans les protocoles sont généralement coûteux et hors de portée de la population générale (P Debraux, Bertucci, Manolova, Rogier, & Lodini, 2009; Pierre Debraux, Grappe, Manolova, & Bertucci, 2011). Un exemple est le coût d'utilisation des services de la soufflerie du William E. Boeing Department of Aeronautics & Astronautics, College (école d'ingénierie de l'Université de Washington) s'élève à 15 000 \$ pour une seule journée d'utilisation. Également, si l'on se tourne vers des méthodes numériques comme les logiciels de Computational Fluid Dynamics, ceux-ci demandent une forme d'expertise acquise en formation académique supérieure. En résumé, ces conditions font en sorte qu'il est difficile d'établir une association entre les résultats obtenus et les pratiquants amateurs.

Cadre théorique

Introduction

Dans le cadre de ce projet, la recension de la littérature englobe les différentes composantes de la performance en cyclisme, mais avec une attention particulière aux notions de mécanique spécifique à ce sport. Cela permet d'acquérir les différentes connaissances factuelles et conceptuelles qui forment une base de connaissances suffisantes pour entreprendre. En premier lieu, je ferai une introduction sur la définition et les critères d'atteintes de performance chez les cyclistes. Par la suite, les différentes forces mécaniques seront discutées. La première de ces forces est la portion principale de ce projet, soit la force de résistance aérodynamique. Ensuite, je discuterai de la force de résistance au roulement ainsi que la force gravitationnelle. La dernière portion du cadre théorique expliquera les différentes méthodes d'évaluation des deux variables les plus importantes de la résistance aérodynamique, soit le coefficient de traînée aérodynamique et la surface frontale projetée. En conclusion, la cible de ce cadre théorique est de comprendre les éléments qui définissent la performance en cyclisme.

Cyclisme sport et performance

La performance en cyclisme peut se résumer en l'atteinte du point d'arrivée le plus rapidement possible. Les athlètes doivent parcourir une distance déterminée en moins de temps possible. La vitesse de déplacement est donc un aspect crucial de leur performance.

Le record de l'heure est un standard dans l'évaluation de la performance en cyclisme depuis plusieurs années. En plus d'être le seul événement compétitif en cyclisme qui a toujours été pratiqué dans des conditions standardisées, celui-ci existe officiellement depuis 1893 (J. D. Bassett, Kyle, Passfield, Broker, & Burke, 1999; Padilla, Mujika, Angulo, & Goiriena, 2000). Le participant doit parcourir la plus grande distance possible en une heure. Il doit être seul à pédaler sur une piste de vélodrome sur un vélo à pignon fixe (Règlement UCI). Cette

standardisation de l'épreuve a permis au fil des années d'établir que la performance en cyclisme sur route/piste est principalement dépendante de deux facteurs : la performance physiologique humaine et le combat contre les forces de résistances qui freinent l'avancement du cycliste (Malizia & Blocken, 2020; Crouch, Burton, LaBry, & Blair, 2017; Padilla et al., 2000).

Performance humaine

Le premier des deux facteurs de performance est la forme physique et physiologique du cycliste. En sciences de la santé, il est établi depuis de nombreuses années que c'est la molécule d'ATP qui sert de substrat pour la production d'énergie chez l'humain. Cette production d'énergie peut se faire par différents systèmes, anaérobie et aérobie. Chacun de ces systèmes est sollicité en fonction de la demande de l'activité physique (McArdle, Katch, & Katch, 2010). Comme le cyclisme est un sport d'endurance, le système aérobie sera le plus sollicité et sera déterminant d'une bonne performance (Abbiss & Laursen, 2005; I. E. Faria, 1992; Jeukendrup & Martin, 2001; Wenger & Bell, 1986).

Depuis de nombreuses années, il est établi que le déterminant principal qui prédit une bonne performance aérobie en sport d'endurance est le VO₂max (D. R. Bassett & Howley, 2000; Rønnestad & Mujika, 2014; Westgarth-Taylor et al., 1997). Le VO₂max est la consommation maximale d'oxygène d'une personne. Il serait donc logique de penser qu'une augmentation du VO₂max amènerait une augmentation de la performance. En effet, plusieurs études sur des sujets amateurs ayant un VO₂max initial de 56,8 ml/kg/min à 65,7 ml/kg/min ont démontré le lien entre l'augmentation du VO₂max et l'amélioration de la performance en cyclisme lorsqu'ils suivent un entraînement spécifique par intervalle 4 à 8 semaines. Cette performance était quantifiée en gain en temps sur une épreuve cycliste de contre-la-montre de 40 km. Les résultats démontrent clairement que l'entraînement spécifique par intervalle amène une augmentation du VO₂max 5 à 10 % et une diminution du temps dans l'épreuve de contre-la-montre de 3 à 7 %. Cependant, il a été remarqué que plus le VO₂max initial est élevé, moins l'augmentation de la

performance était présente (Jeukendrup & Martin, 2001; Rønnestad & Mujika, 2014; Stepto, Hawley, Dennis, & Hopkins, 1999; Westgarth-Taylor et al., 1997).

Le positionnement peut également affecter l'effort donné par le cycliste. Une différence significative a été remarquée lorsqu'un cycliste passe d'une position relevée sur le guidon à une position plus aérodynamique dans la partie basse du guidon (F Grappe, Candau, Busso, & Rouillon, 1998). Cette différence serait causée par l'augmentation de la flexion du tronc et la compression abdominale, ce qui modifierait le mécanisme respiratoire et diminuerait le volume pulmonaire (I. Faria, Dix, & Frazer, 1978; D. Heil, Derrick, & Whittlesey, 1997).

Forces de résistances totales

La physique fondamentale qui gouverne le déplacement d'un cycliste est bien connue de la littérature scientifique. La deuxième méthode d'évaluation de la performance en cyclisme peut donc se présenter comme l'évaluation des forces externes s'opposant à l'avancement de ce dernier (Malizia & Blocken, 2020, P Debraux et al., 2009; di Prampero, 1986; Di Prampero, Cortili, Mogioni, & Saibene, 1979; Frédéric GRAPPE, 2005; Jeukendrup & Martin, 2001). En diminuant celles-ci, le cycliste augmentera sa vitesse pour un même effort donné, ainsi s'ensuit une meilleure performance. De plus, comme le cyclisme se catégorise comme un sport de longue durée et d'endurance, l'économie d'énergie est un facteur important à prendre en considération. Ces résistances peuvent être présentées comme un total des forces (F_{RT}) s'opposant à la force de déplacement du cycliste. Les forces totales se manifestent par ordre d'importance comme la force de résistance aérodynamique (F_{RA}), la force de résistance aux frictions (F_{RF}) et la force de résistance gravitationnelle (F_{RG}) (Pierre Debraux et al., 2011; Frédéric GRAPPE, 2005). Ce concept a ensuite été validé par un modèle mathématique permettant de calculer toutes les forces s'opposant à la force de propulsion développée par le cycliste (Martin, Milliken, Cobb, McFadden, & Coggan, 1998).

$$F_{RT} = F_{RA} + F_{RF} + F_{RG} \quad [1]$$

Résistance aérodynamique

Dans le domaine de la dynamique des fluides, la résistance aérodynamique peut se définir comme l'écoulement d'un fluide sur un corps en déplacement. Dans le cadre de ce projet, le fluide en question est l'air. Cette résistance est composée de deux forces, la force de traînée et la force de portance. En cyclisme, à cause des vitesses trop basses, la force de portance est considérée comme négligeable. C'est donc la force de traînée qui nous intéresse (Belluye & Cid, 2001; P Debraux et al., 2009; Pierre Debraux et al., 2011; Jeukendrup & Martin, 2001). La traînée se présente comme la force de relation entre un corps en déplacement et l'air qui circule sur sa surface ; elle est dépendante de plusieurs facteurs : les propriétés physiques du fluide, la forme ainsi que la vitesse du sujet. Dans le domaine du cyclisme, elle est directement proportionnelle à ces facteurs. Ceci fait en sorte qu'elle est la plus importante s'opposant au déplacement du cycliste lorsqu'il est sur un terrain plat. La force de traînée (F_{RA}) peut s'exprimer par la fonction suivante (Malizia & Blocken, 2020; Belluye & Cid, 2001; Crouch et al., 2017; P Debraux et al., 2009; Pierre Debraux et al., 2011; Di Prampero et al., 1979; Frédéric GRAPPE, 2005; Jeukendrup & Martin, 2001; C. Kyle & Weaver, 2004).

$$F_{RA} = \frac{1}{2} \rho C_D A_p v^2 \quad [2]$$

Où :

A_p = La surface frontale projetée du cycliste et son vélo (m^2)

C_D = Le coefficient de traînée aérodynamique (coefficient sans dimension)

ρ = la masse volumique de l'air (kg/m^3)

v^2 = le carré de la vitesse relative au fluide (m/s)

À des vitesses de 40 km/h, la force de traînée aérodynamique composerait jusqu'à 90 % (Malizia & Blocken, 2020; Belluye & Cid, 2001; Crouch et al., 2017; Frederic Grappe, Candau, Belli, & Rouillon, 1997; C. Kyle & Weaver, 2004) des résistances totales et plus la vitesse augmente plus cette force devient importante. Il est donc nécessaire d'analyser les composantes impliquées et de diminuer l'implication de ces forces si nous voulons augmenter la performance d'un cycliste.

Surface de traînée aérodynamique

La surface de traînée aérodynamique ou surface de traînée effective se présente comme dépendante du produit de la surface frontale projetée (A_P) du cycliste et du coefficient de traînée (C_D). C'est la variable d'importance lorsque l'on cherche à augmenter la performance aérodynamique. En effet, une diminution de la surface frontale effective amène automatiquement une diminution de la résistance aérodynamique, car le flux d'air passera mieux autour du sujet (Malizia & Blocken, 2020; Crouch et al., 2017; P Debraux et al., 2009; Defraeye, Blocken, Koninckx, Hespel, & Carmeliet, 2010a; García-López et al., 2008; Frédéric GRAPPE, 2005). Dans la littérature, il a été démontré qu'à des vitesses de 40 km/h et plus, le positionnement du cycliste affecte majoritairement la résistance aérodynamique totale, et ce jusqu'à environ 75-80 % de la résistance aérodynamique totale et le reste aux composantes (Crouch et al., 2017; C. Kyle & Weaver, 2004). De plus, il est important de prendre en considération l'effet de fatigue du cycliste, car une fatigue trop élevée peut modifier la position de celui-ci et diminuer l'efficacité aérodynamique (Fintelman, Sterling, Hemida, & Li, 2015; Underwood & Jermy, 2013). Il est donc clair que travailler sur un positionnement aérodynamique efficace permettrait d'obtenir un rapport coût/bénéfice intéressant. En exemple, une séance d'ajustement avec un spécialiste en positionnement varie de 100 \$ à 400 \$ comparativement à de l'équipement qui peut coûter de quelques centaines jusqu'à plusieurs milliers de dollars. Depuis plusieurs années, différentes méthodes d'évaluation ont été développées afin de pouvoir calculer cette donnée. Cependant, ces différentes méthodes offrent leurs avantages et inconvénients. Le [tableau 1] nous montre la variabilité des différents résultats selon les méthodes qui seront décrites plus tard. Les trois positions présentées sont les plus

communes et seront décrites plus en détail au cours du document, car ce sont celles-ci qui ont été choisies pour l'entièreté du projet de recherche. La position 1 se définit comme les mains sur la partie droite du guidon, la position 2 avec les mains sur les leviers de vitesses et la position 3 avec les mains dans la partie basse du guidon avec les coudes fléchis.

Tableau 1 :: Surfaces de trainées aérodynamique dans la littérature pour les positions étudiées

Méthodes d'évaluations C_{DAp}	Traînée aérodynamique C_{DAp} (m ²)		
	Position 1	Position 2	Position 3
<u>Méthode par régression linéaire</u>			
Debraux et al. (2009)		0,361 ± 0,021	
Grappe et al. (1997)	0,299		0,276
<u>Soufflerie</u>			
Garcia-Lopez et al. (2008)		0,481 ± 0,017	
Defraeye et al. (2010)	0,270		0,243
Davies (1980)	0,280		
Kyle & Burke (1984)	0,32		0,26
Jeukendrup et al. (2001)	0,358		0,307
Gibertini & Graci (2008)	0,318-0,282		0,289-0,275
Barry et al. (2014)	0,343		0,332-0,295
<u>Décélération</u>			
Candau et al. (1999)	0,355		
<u>Méthode par traction</u>			
Capelli et al. (1993)	0,255		
Di prampero et al. (1979)			0,318

Coefficient de traînée aérodynamique

Le coefficient de traînée (C_D) est une variable sans unité qui varie en fonction de plusieurs facteurs. Il est fondamental à la dynamique des fluides et est utilisé pour modéliser les formes complexes et la position d'un objet face au vent (Crouch et al., 2017; Pierre Debraux et al., 2011; di Prampero, 1986; Di Prampero et al., 1979). Il sera affecté par un ratio entre la force de traînée aérodynamique (F_{RA}) et la pression dynamique d'un flux d'air (q) qui passe autour de l'objet multiplié par la surface frontale projetée de l'objet (A_p) (Malizia & Blocken, 2020; Pierre Debraux et al., 2011; Di Prampero et al., 1979; Martin, Gardner, Barras, & Martin, 2006; Martin et al., 1998; Pugh, 1970).

$$C_D = \frac{F_{RA}}{qA_p} \quad [3]$$

Où :

A_p = La surface frontale projetée du cycliste et son vélo (m^2)

F_{RA} = Force de résistance aérodynamique (N)

q = Flux d'air passant autour de l'objet (sans dimension).

De plus, lorsqu'un fluide rencontre un objet, celui-ci exercera des forces dépendamment de sa vitesse, sa densité et sa viscosité. Alors, le coefficient de traînée (C_D) est également dépendant d'un autre coefficient sans dimension appelé le nombre de Reynold (R_e). Ce coefficient a son importance, car il sert à mesurer le ratio des forces de viscosité d'un fluide et ses forces inertielles (Pugh, 1970).

Surface frontale projetée

Comme rapporté dans (Debraux, Grappe, Manolova, & Bertucci, 2011) cette composante A_p fait référence à la forme de l'objet et la surface à laquelle il présente au vent en vue de face. Plus cette surface est diminuée, moins le cycliste offrirait de résistance au vent

(Blocken, van Druenen, Toparlar, & Andriane, 2019; Merkes, Menaspà, & Abbiss, 2019; Crouch et al., 2017; P Debraux et al., 2009; Defraeye et al., 2010a; Fintelman et al., 2015; D. P. Heil, 2001; T. Olds & Olive, 1999; Debraux et al., 2011). En cyclisme, celle-ci joue un rôle important sur la résistance aérodynamique, car son corps compose environ 70% de la surface frontale totale (Blocken, Defraeye, Koninckx, Carmeliet, & Hespel, 2013; Blocken et al., 2019; Merkes et al., 2019; Barelle, Chabroux, & Favier, 2010; Belluye & Cid, 2001; Defraeye et al., 2010a; C. Kyle & Weaver, 2004; T. S. Olds et al., 1995). Cette variable est dépendante de la taille et de la masse du sujet, mais aussi de la position et de l'équipement du cycliste.

Comme mentionné plus tôt, la position d'un cycliste sur son vélo a une importance capitale sur la surface frontale projetée. De plus, une modification de la posture du cycliste pourrait diminuer la résistance de traînée aérodynamique de 10 % à 30 %, ce qui est significatif dans une situation de gain de performance ((Blocken et al., 2019; Peeters, Vleugels, Verwulgen, & De Bruyne, 2019) Barry, Burton, Sheridan, Thompson, & Brown, 2014; Defraeye et al., 2010a; Fintelman, Sterling, Hemida, & Li, 2014; D. P. Heil, 2002). Pour les mêmes positions que la surface de traînée aérodynamique présentée au tableau 1, le tableau 2 illustre les différents résultats obtenus par les méthodes d'évaluation de la surface frontale projetée qui ont été trouvées dans la littérature. Il faut noter que les positions présentées dans le [tableau 2] sont exactement les mêmes que pour le [tableau 1]. Une autre variable pouvant affecter la résistance de traînée aérodynamique (C_{DAp}) est l'équipement utilisé par le cycliste. Depuis plusieurs années, un bon nombre de recherches ont évalué l'intérêt d'améliorer les composantes en cyclisme afin d'augmenter la performance aérodynamique des cyclistes, particulièrement les roues, le cadre du vélo, le casque et les vêtements (Barelle et al., 2010; Crouch et al., 2017; Jeukendrup & Martin, 2001; C. R. Kyle & Burke, 1984; Oggiano, Troynikov, Konopov, Subic, & Alam, 2009).

Tableau 2 : Surface frontale projetée dans la littérature pour les positions étudiées

Méthodes d'évaluations A_p	Surface frontale projetée A_p (m ²)		
	Position 1	Position 2	Position 3
<u>Méthode par photographie digitale</u>			
Jensen 2010		0,389	0,386
Debraux et al. (2009)	0,533 ± 0,031		
Dorel et al. (2005)			0,531 ± 0,014
<u>Pesée photographique</u>			
Heil (2002)	0,525 ± 0,01		0,531 ± 0,008
Olds & Olive (1999)		0,605 ± 0,069	0,563 ± 0,071
Capelli et al. (1998)	0,420 ± 0,028		
Capelli et al. (1993)	0,394		
Garcia-Lopez et al. (2008)		0,364 ± 0,012	
Gross et al. (1983)		0,399	
McLean (1994)			0,387
Faria and Cavanagh (1978)		0,5	
Neuman (1992)		0,6	0,5
Nonweiler (1956)		0,396	
Pugh (1974)		0,47	0,46
<u>CAD</u>			
Debraux et al. (2009)	0,565 ± 0,037		

Masse volumique de l'air

La masse volumique de l'air ρ (kg/m³) est une variable qui affecte la force de traînée. Plus elle est élevée, plus elle exerce une force sur le cycliste en déplacement ce qui le force à déployer plus de puissance pour une même vitesse. La masse volumique de l'air aurait d'ailleurs

été une des causes de l'établissement du record de 49,9 km du champion cycliste Eddy Merckx, lors de sa performance dans l'épreuve du record de l'heure à Mexico en 1972. En effet, comme la ville de Mexico est située à une altitude de 2 250 mètres au-dessus du niveau de la mer, la masse volumique de l'air plus basse aurait contribué à diminuer la résistance aérodynamique s'appliquant à lui. Selon Di Prampero (di Prampero, 1986), la masse volumique de l'air est directement proportionnelle à la pression barométrique et inversement proportionnelle à la température (Beaumont et al., 2019). Également, comme le taux d'humidité dans l'air porte un effet négligeable sur la masse volumique de l'air, il sera ignoré. Cette masse volumique s'exprime :

$$\rho = \rho_o \times \frac{PB_{ext}}{760} \times \frac{273}{T} \quad [4]$$

Où :

$\rho_o = 1.293 \text{ kg/m}^3$ (masse volumique de l'air à 760 mmHg et 273 K)

PB_{ext} = pression barométrique extérieure (mmHg)

T = Température (K)

Force totale de friction

La force totale de friction (F_{RF}) peut se diviser en deux types de résistances. La résistance au roulement (F_{RR}) et la résistance due au frottement de la transmission. Cette résistance est dépendante de la vitesse du cycliste. À une vitesse de 25 km/h, celle-ci peut être responsable de 30% des résistances totales, tandis qu'à 40 km/h elle ne participe qu'à 10 % des résistances totales. Ce qui la rend négligeable à haute vitesse (Candau et al., 1999; F Grappe et al., 1999; Pugh, 1970) (Di Prampero et al., 1979) (Frédéric GRAPPE, 2005; Millet & Candau, 2002).

La résistance de frottement due à la transmission est définie par tout type de roulement mécanique du vélo, entre autres : l'axe des pédales, le boîtier de pédalier, le roulement dans l'axe des roues ainsi que les galets du dérailleur arrière et la chaîne. Cette résistance, bien que présente, est tellement faible qu'elle est considérée comme négligeable dans la formulation de la somme des résistances s'appliquant à un cycliste (Di Prampero et al., 1979; Whitt, 1971).

Résistance au roulement

La résistance au roulement reste une notion importante dans la performance en cyclisme depuis plusieurs dizaines d'années. Plus la force exercée sur la surface de contact entre le pneu et le sol est réduite, moins de travail sera requis pour garder une vitesse donnée. L'avancement de différentes technologies de l'industrie a permis de diminuer cette force de résistance (F_{RR}) en améliorant le coefficient de roulement des pneus (C_R) et en réduisant la masse des vélos (m), car cette force est la résultante du produit de ces deux variables (Pierre Debraux et al., 2011; F Grappe et al., 1999).

$$F_{RR} = C_R m g \quad [5]$$

Où :

C_R = coefficient de roulement (sans dimension)

m = du cycliste et son vélo (kg)

g = accélération gravitationnelle (9,81 m/s²)

Le coefficient de roulement (C_R) se caractérise par plusieurs variables. Comme rapporté dans (Frédéric GRAPPE, 2005; F Grappe et al., 1999), les caractéristiques de la route, du pneu (largeur, matériel utilisé), ainsi que la pression du pneu. Ce coefficient peut donc être interprété

par le niveau de déformation du pneu. De plus, il a démontré que c'est la pression du pneu (P_r , Kpa) qui affecte principalement ce coefficient (C_R) et qu'il peut être calculé (F Grappe et al., 1999) :

$$C_R = 0.1071 \times P_r^{-0.477} \quad [6]$$

Force gravitationnelle

En physique fondamentale, la force gravitationnelle (F_{RG}) se présente comme la force de l'accélération de la masse du cyclisme et de son vélo vers le bas. Comme la résistance aérodynamique, celle-ci se présente comme une fonction linéaire dépendante de la vitesse et de la masse du cycliste. Plus l'élévation de la pente est élevée, plus le travail que le cycliste doit donner est élevé (Pierre Debraux et al., 2011; C. Kyle & Weaver, 2004; C. R. Kyle & Burke, 1984; Martin et al., 1998). Nous pouvons donc formuler la puissance nécessaire comme énergie potentielle en fonction de la masse du cycliste, la gravité et l'élévation du terrain.

$$F_{RG} = mg \sin \theta \quad [7]$$

Où :

m = masse du cycliste et son vélo (kg)

g = accélération gravitationnelle (9,81 m/s²)

$\sin\theta$ = angle de la pente

C'est pour cette raison que les cyclistes se spécialisant dans les courses ayant beaucoup de côtes sont plus légers que leurs coéquipiers. Ils doivent avoir un haut rapport puissance/masse (Pierre

Debraux et al., 2011; C. Kyle & Weaver, 2004; Martin et al., 1998). Cependant, dans une situation sur terrain plat comme celle de notre projet, la résistance gravitationnelle sera nulle.

Méthodes d'évaluation aérodynamique en cyclisme

Comme mentionné précédemment, la résistance aérodynamique est un facteur important de la performance en cyclisme. Plusieurs méthodes d'évaluation ont donc été développées afin d'améliorer les variables affectant cette résistance. Il est crucial de diminuer cette force afin d'augmenter notre vitesse, car dans un contexte compétitif, c'est ce qui peut définir une victoire d'une défaite en course (Malizia & Blocken, 2020; Crouch et al., 2017; D. Heil et al., 1997; D. P. Heil, 2001; Jeukendrup & Martin, 2001).

Deux catégories générales de méthodes existent : l'évaluation de la surface frontale effective et l'évaluation de la surface frontale projetée. La première est la plus précise, car elle simule des situations réelles et permet de mesurer les forces s'appliquant au cycliste. La deuxième estime le coefficient de traînée (C_D) dans un environnement où les forces externes ne sont pas présentes. Bien que plus précises, les méthodes d'évaluation de surface effectives sont plus coûteuses et compliquées que les méthodes d'évaluation de la surface frontale projetée (Pierre Debraux et al., 2011).

Les méthodes d'évaluations présentées dans ce cadre théorique offrent des qualités de validité, fiabilité, résolution et faisabilité à différents niveaux. Cependant, avant de présenter ces méthodes, il est important de définir ces termes afin de mieux évaluer quel outil est le plus adapté selon notre l'objectif.

Validité : la validité se réfère au degré d'exactitude d'un résultat obtenu en utilisant une méthode quelconque par rapport au résultat attendu ou à la réalité. Si l'on prend le cas d'un

cycliste qui roule exactement à 30 km/h, il est souhaitable qu'un capteur de vitesse mesure 30 km/h pour montrer une bonne validité.

Fiabilité : la fiabilité se définit par la capacité à obtenir le même résultat à chaque fois que l'on répète l'expérience, qu'il soit exact ou non. L'importance de la fiabilité se résume à sa constance dans les mesures. Plus les résultats d'une même mesure sont constants, plus la méthode est fiable.

Résolution : lorsque l'on parle de résolution, il est important de ne pas la confondre avec la validité, car celle-ci ne se réfère pas à l'exactitude du résultat, mais à la plus petite unité qui est possible de mesurer. En exemple, un outil qui mesure des millimètres à une meilleure résolution qu'un outil qui mesure des mètres.

Faisabilité : la faisabilité dépend des ressources nécessaires pour l'expérimentation, en d'autres mots, si la méthode est peu coûteuse, elle a une bonne faisabilité.

Soufflerie

La méthode d'évaluation en soufflerie se présente comme le standard le plus élevé du marché, de par sa grande validité et fiabilité. Avec un environnement où toutes les variables sont contrôlées, il est possible d'obtenir d'excellents résultats sur l'évaluation de la surface frontale effective d'un cycliste (Malizia & Blocken, 2020; Crouch et al., 2017; Pierre Debraux et al., 2011; Defraeye et al., 2010a; García-López et al., 2008; D. P. Heil, 2001).

Le cycliste et ses bicyclettes sont placés sur une plateforme de force sur une station statique et un flux d'air est généré artificiellement. Avec le type de courant d'air généré, il est possible de contrôler les facteurs environnementaux comme la température ambiante, la pression atmosphérique ainsi que la direction du vent. La force verticale générée lorsque le flux d'air rencontre le cycliste est mesurée par la plateforme de force sur laquelle il est installé. Avec la haute sensibilité de la plateforme, la résistance du cycliste qui s'oppose à ce flux d'air peut être mesurée, c'est la traînée aérodynamique. Avec cette traînée, il est possible de calculer l'air frontal effectif (Malizia & Blocken, 2020; Crouch et al., 2017; Defraeye et al., 2010a), soit :

$$C_D A_p = \frac{R_D}{0.5 \rho v_f^2} \quad [8]$$

Où :

$C_D A_p$ = surface frontale effective

R_D = traînée aérodynamique

ρ = masse volumique de l'air (kg/m^3)

v_f^2 = Vitesse du flux de l'air (m^2/s^2)

En circuit de course professionnel, cette méthode est avantageuse, car il est possible de mesurer avec précision une immense quantité de facteurs affectant la performance des cyclistes (Malizia & Blocken, 2020; Crouch et al., 2017; Pierre Debraux et al., 2011; Defraeye et al., 2010a; García-López et al., 2008). Que ce soit le positionnement, les composantes du vélo ou les types de tissus utilisés pour les vêtements cyclistes. Cependant, elle reste extrêmement coûteuse ce qui rend son utilisation difficile pour la recherche (Crouch et al., 2017; Pierre Debraux et al., 2011). Ce sont principalement les grandes entreprises qui utilisent cette méthode pour le développement de produits ou pour optimiser la performance des cyclistes professionnels.

CFD – Computational Fluid Dynamics

L'utilisation de logiciel de simulation de dynamique de fluides (CFD) devient de plus en plus populaire avec l'avancement des technologies informatiques et l'amélioration de la puissance des ordinateurs. Cette méthode est de plus en plus utilisée par les industries afin de développer de nouveaux produits visant à améliorer la performance dans le sport (Blocken, Defraeye, Koninckx, Carmeliet, & Hespel, 2013; Blocken & Toparlar, 2015; Blocken et al., 2018; Defraeye et al., 2010a; Defraeye, Blocken, Koninckx, Hespel, & Carmeliet, 2010b). Elle consiste à simuler un flux d'air à l'aide d'un logiciel CFD autour d'une maquette modélisée en trois dimensions. En plus de manipuler les variables entourant le sujet, il est possible de mesurer les forces de résistances s'appliquant à lui. Cette méthode peut être vue comme la simulation

informatique d'un tunnel de soufflerie. En plus, cette méthode offre comme avantage d'augmenter le volume d'air environnant le cycliste tant que l'ordinateur utilisé est assez puissant. De cette manière, il est possible pour les chercheurs d'évaluer différentes variables qui modifient les comportements de l'air ce qui serait impossible à faire en soufflerie à cause de la limitation de l'espace du tunnel (Malizia & Blocken, 2020; Crouch et al., 2017). Pour finir, les logiciels de simulation de dynamique de fluides sont moins dispendieux que l'utilisation d'un tunnel de soufflerie, tout en offrant une validité et fiabilité de résultat intéressant.

Régression linéaire

Cette méthode peut être utilisée en situation réelle dans un environnement contrôlé. Celle-ci est souvent utilisée dans un vélodrome ou sur une route qui permet de simuler une « soufflerie naturelle », soit une section de route sans pente et à l'abri du vent le plus possible (Malizia & Blocken, 2020; Pierre Debraux et al., 2011; Frederic Grappe et al., 1997). Le cycliste doit être également équipé d'un capteur de puissance (SRM, garmin) et d'un capteur de vitesse. Cet équipement sert à mesurer la puissance mécanique appliquée à certaines vitesses dans certaines positions. En effet, le cycliste doit effectuer plusieurs essais afin de collecter une quantité suffisante de données qui permettront de créer un nuage de point.

La méthode par régression linéaire se calcule en utilisant le total des forces (F_{RT}) qui s'opposent à un cycliste lorsqu'il pédale sur un terrain plat et à une vitesse constante. Celles-ci peuvent se résumer comme le total des forces de résistance au roulement (F_{RR}) et le total des forces de résistance aérodynamique (F_{RA}) (Crouch et al., 2017; Pierre Debraux et al., 2011; Martin et al., 1998) soit :

$$F_{RT} = F_{RA} + F_{RR} \quad [9]$$

Avec comme équation la force de résistance aérodynamique :

$$F_{RA} = \frac{1}{2} \rho C_D A_p v_f^2 \quad [10]$$

Et la force de résistance au roulement :

$$F_{RR} = C_R m g \quad [11]$$

Avec ces deux formules, il est possible de créer une fonction linéaire de type $f(x) = ax + b$ en posant $V = v^2$

:

$$F_{RA} = \frac{1}{2} \rho C_D A_p V + C_R m g \quad [12]$$

Avec des constantes :

$$F_{RT} = \alpha_1 v_f^2 + \beta_1 \quad [13]$$

Où :

$$\alpha_1 = \frac{1}{2} \rho C_D A_p$$

$$\beta_1 = C_R m g$$

De plus, les forces totales s'opposant à l'avancement peuvent être exprimées par la puissance mécanique produite en fonction de la vitesse de déplacement. Cette situation peut s'exprimer sous la fonction (8, 24):

$$F_{RT} = \frac{p}{v} \quad [14]$$

L'intérêt est de nous amener à une formule de type :

$$\frac{p}{v} = F_{RT} = \alpha_1 v_f^2 + \beta_1 \quad [15]$$

Une fois les données collectées, il sera possible de créer un graphique sous forme ax^2+b avec comme abscisse la vitesse (v^2 , m^2/s^2) et l'ordonnée la puissance P/V (N) pour ensuite identifier la surface frontale effective ($C_D A_P$). En résumé, cette méthode offre une validité et fiabilité en comparaison avec la soufflerie (Crouch et al., 2017; Martin et al., 1998). L'avantage de la régression linéaire comparativement à la soufflerie est le coût plus faible de l'équipement requis et le fait qu'elle s'applique plus dans une situation réelle (Crouch et al., 2017; C. R. Kyle & Burke, 1984; Martin et al., 1998).

Décélération

La méthode par décélération est une autre manière d'évaluer la force de résistance aérodynamique en situation réelle. Elle se base sur la deuxième loi du mouvement de Newton pour évaluer le coefficient de traînée aérodynamique (Candau et al., 1999). L'énoncé original de cette loi est présenté comme suit : les changements qui arrivent dans le mouvement sont proportionnels à la force motrice ; et se font dans la ligne droite dans laquelle cette force a été imprimée. En d'autres mots, lorsqu'une force est exercée sur un objet pour qu'il se déplace dans une direction rectiligne, celle-ci est toujours égale au produit de la masse de cet objet par son accélération dans cette même direction. Dans le cas spécifique du cycliste, lorsqu'il arrête de pédaler sa force de propulsion est nulle, mais son accélération est toujours présente sous forme de décélération. Avec cette loi, il est donc possible de mesurer la somme des forces de déplacement, avec la formule suivante :

$$F_{RT} = m \times \frac{dv}{dt} = \frac{1}{2} \rho A C_D v_f^2 + C_R m g \quad [16]$$

Selon Candau et al. (1999), cette méthode a tendance à surestimer la force de traînée aérodynamique comparativement aux méthodes utilisées en soufflerie. Cette surestimation est causée en premier lieu par l'absence d'interaction aérodynamique entre le sol et le vélo dans la méthode par décélération, tandis qu'en soufflerie elle y est présente. Également, avec la méthode de décélération, la traînée aérodynamique causée par le mouvement des rayons des roues et le mouvement des membres inférieurs vont affecter les mesures contrairement à la soufflerie.

Cette méthode utilise un système de capture photo-électrique pour mesurer l'accélération ou la décélération d'un cycliste sur une distance donnée. Trois bornes (C1, C2, C3) sont nécessaires afin de pouvoir mesurer l'accélération sur la distance entre C2 et C3. Également, dans les deux méthodes, le sujet doit arriver au premier passage de mesure à une vitesse donnée et arrêter de pédaler pour déterminer l'influence des résistances qui s'appliquent à lui. Comme pour la méthode par régression linéaire, un terrain sans vent et offrant le moins de résistance au roulement possible est à prioriser. De cette manière, nous éliminons les variables parasites qui pourraient diminuer la précision des mesures (Candau et al., 1999). Finalement, la différence entre une méthode d'accélération et décélération est que pour l'accélération il faut utiliser un terrain en pente négative, tandis que pour la décélération il faut idéalement un terrain plat.

Méthode par traction

La méthode par résistance de traction (R_T) existe également. La mesure du coefficient de traînée (C_D) se fait par le même principe que la méthode de régression linéaire. La différence principale est l'outil et la manière dont la force de résistance aérodynamique du cycliste est mesurée. Un capteur de force attaché à un câble est utilisé. Celui-ci doit relier un véhicule motorisé au cycliste sur son vélo pour ensuite faire les essais. Il est important d'avoir un câble

assez long pour éviter le plus possible les turbulences parasites créées par le véhicule. Comme pour la régression linéaire, plusieurs essais doivent être menés à différentes vitesses et le sujet doit garder sa position pendant les essais. Celui-ci peut également pédaler dans le vide pour simuler la turbulence causée par le pédalage (Capelli et al., 1993). La résistance de traction (R_T , N) mesurée par le capteur pourra servir dans le calcul d'équivalence des forces comme pour la régression linéaire.

De cette manière il est possible de créer un graphique de fonction linéaire et identifier le coefficient (C_D) comme dans les calculs de la méthode de régression linéaire. Finalement, cette méthode reste peu utilisée dans la littérature scientifique pour les cyclistes, ce qui fait en sorte qu'il est difficile d'évaluer la précision et la fiabilité de celle-ci (Capelli et al., 1993).

Capteur de mesure directe du C_D

Cette méthode relativement récente utilise la troisième loi de Newton énoncée, l'action est toujours égale à la réaction ; c'est-à-dire que les actions de deux corps l'un sur l'autre sont toujours égales et de sens contraires (Valenzuela et al., 2020). En d'autres mots, le total des forces externes s'opposant au cycliste devrait être égal à la force mécanique appliquée aux pédales.

Afin de mesurer toutes ces forces externes, un appareil muni d'un tube de Pitot, d'un accéléromètre, d'un capteur de pression dynamique ainsi qu'un baromètre doit être utilisé. De plus, il est nécessaire d'utiliser un capteur de cadence et de vitesse pour faire fonctionner le tout. Afin d'obtenir une mesure de puissance adéquate, il faut également prendre en considération la taille et la masse corporelle du cycliste avec son vélo, sa position, la largeur des pneus et finalement la surface sur laquelle il va rouler. Ces données permettent à l'appareil de calculer le coefficient de traînée (C_D) et le coefficient de roulement (C_R) pour déterminer la puissance produite. Il a été rapporté par Valenzuela et al. (2020) qu'un outil du même type d'un autre fabricant (Notion Konect™) offre un potentiel d'évaluation de la surface frontale projetée

(C_{DAp}) intéressant. En effet, cet outil serait fiable et présente une bonne corrélation avec des modèles existants qui sont considérés comme viables. De plus, ce type d'outil a pour avantage d'évaluer le C_{DAp} en temps réel ce qui permet au cycliste d'ajuster sa position pour qu'elle soit plus aérodynamique (Valenzuela et al., 2020). En résumé, bien que peu coûteuse (environ 500 \$), ce type de technologie reste développé par de petites entreprises et peu de littérature scientifique est disponible sur le sujet.

Calcul de la Surface frontale projetée

Méthode par pesée photographique

La méthode de pesée photographique, bien que rudimentaire, est utilisée depuis plusieurs dizaines d'années (Capelli et al., 1998; P Debraux et al., 2009; D. P. Heil, 2001; T. S. Olds et al., 1995; Padilla et al., 2000), afin de calculer la surface frontale projetée d'un objet de forme irrégulière ou d'une personne. En utilisant un appareil photo argentique, le sujet doit être pris en photo avec zone d'étalonnage (zone de référence avec une surface réelle connue). Une fois les photographies développées, il suffit de les découper avec le plus de précision possible pour ensuite les peser séparément sur une balance avec une résolution de $\pm 0,001$ g. Avec la pesée, nous obtenons la masse des deux photos. La dernière étape consiste simplement à calculer le ratio par méthode du produit croisé, soit une division de la masse de la photo du sujet par la zone d'étalonnage, pour finalement multiplier par la surface connue en m^2 de cette zone.

La simplicité méthodologique de cette méthode reste à son avantage. Mais certaines contraintes restent présentes. À cause de la grandeur de la photo développée, un manque de précision pendant le découpage de la photo affecterait la masse de celle-ci. De plus, encore une fois à cause de la taille de la photo, découper manuellement le vélo s'avère impossible à cause de sa grosseur, l'estimation se ferait donc pour le cycliste seulement (P Debraux et al., 2009).

Méthode par digitalisation

Avec l'accès à la technologie digitale d'aujourd'hui, cette méthode reste simple et efficace. De plus, la qualité des produits disponibles sur le marché permet d'obtenir une estimation de la surface frontale projetée avec précision. Cette méthode développée par (Swanton, Shafat, & Anderson, 2006) consiste à prendre en photo le sujet avec une zone d'étalonnage à une distance fixe, comme pour la méthode par pesée photographique. Cependant, c'est un appareil photo numérique et un logiciel traitement photo (Photoshop, Adobe inc.) qui sont utilisés afin d'effectuer les manipulations nécessaires. Une fois la photo importée dans le logiciel, le sujet et la zone de référence sont sélectionnés avec la plus grande précision possible via les outils de découpe du logiciel. Il est important de mentionner que le sujet doit idéalement être pris devant un fond d'une couleur la plus unie possible (vert chromatique), ce qui facilitera les manipulations et la précision dans le découpage. Avec la fonction de statistique du logiciel, il est ensuite possible d'avoir la surface des deux images en nombre de pixels. Finalement, il suffit de diviser la surface pixélisée du sujet par la surface de la zone d'étalonnage, pour ensuite la multiplier par la surface connue de celle-ci (Jensen, Balasubramani, Burley, Kaukola, & LaChapelle, 2010; Swanton et al., 2006).

Cette méthode comporte plusieurs avantages. Plus l'appareil photo utilisé offre un capteur avec un plus grand nombre de pixels, plus la précision de la surface calculée sera élevée. L'utilisation d'un appareil photo numérique permet également de prendre plusieurs photos, ce qui permettrait d'analyser un plus grand nombre de positions en peu de temps comparativement à la pesée photographique. Deux contraintes ont été observées pour cette méthode. La première est le niveau d'expertise de la personne qui effectue les manipulations. En effet, il y aurait présence d'un effet d'apprentissage chez les débutants ce qui affecterait la fiabilité des résultats (Jensen et al., 2010). La deuxième contrainte est qu'il y a un risque de différence significative d'estimation de la surface frontale si plusieurs personnes différentes font des manipulations (Jensen et al., 2010; Winter, 2009). Il est donc suggéré qu'une seule personne fasse les manipulations et qu'elle soit familière avec l'utilisation de ce genre de logiciel.

Méthode par logiciel CAD (Computed-Aided Design)

Cette méthode est similaire à l'utilisation d'un logiciel d'infographie comme Photoshop. Cependant, c'est un logiciel de modélisation qui sera utilisé (Pro/Engineer Wildfire). Une fois le découpage terminé, il faut transformer la zone 2D en 3D, car ce type de logiciel ne peut pas mesurer une surface sur des objets en deux dimensions. Il faut donc extruder l'image afin de lui donner un volume en trois dimensions. Pour la mesure de surface frontale, il n'est pas nécessaire d'avoir une zone d'étalonnage, car avec des systèmes CAD il suffit de connaître une mesure horizontale et verticale sur la photo (exemple : largeur de guidon, hauteur de la roue). Cette méthode peut être intéressante et efficiente, mais ce type de logiciel reste dispendieux (P Debraux et al., 2009).

Méthode sans photo

Cette méthode de calcul du coefficient aérodynamique reste la plus rudimentaire, car elle ne requiert que la taille et la masse corporelle du sujet. Certains chercheurs auraient établi que la surface frontale projetée serait une fraction constante de la surface corporelle totale (Capelli et al., 1998; Di Prampero et al., 1979; T. Olds, 1998; T. S. Olds et al., 1995). Alors, il est possible de calculer la traînée aérodynamique en calculant la surface corporelle totale (A_{BSA} , cm²) du sujet (du Bois & du Bois, 1916; Mitchell, Strydom, Van Graan, & Van Der Walt, 1971; Shuter & Aslani, 2000).

$$A_{BSA} = W^{0.441} \times H^{0.655} \times C \quad [17]$$

Où :

W = masse corporelle du sujet (kg)

H = taille du sujet (cm)

C = constante de 94,9 (nombre sans dimension)

Il est important de savoir que la formule du calcul de la surface corporelle de du Bois et du Bois (1916) a été révisée par Shuter & Aslani (2000) qui avait comme critique le nombre trop faible de sujets. Par la suite, Heil 2001 (D. P. Heil, 2001) aurait confirmé que l'estimation est correcte si la masse du cycliste se situe entre 60 kg et 80 kg. Il aurait été démontré que la surface frontale ne serait pas proportionnelle lorsqu'elle est calculée chez les cyclistes avec une masse plus élevée (Capelli et al., 1998; Di Prampero et al., 1979; T. Olds, 1998; T. S. Olds et al., 1995) (du Bois & du Bois, 1916; D. Heil, 2001; Mitchell et al., 1971; Shuter & Aslani, 2000).

Objectifs

Avec toutes ces connaissances acquises, il est important d'être judicieux dans le choix des outils qui seront utilisés pour atteindre l'objectif général du projet qui consiste à optimiser sa performance aérodynamique en cyclisme en utilisant la surface frontale projetée. De plus, les tests sont effectués dans des conditions qui se veulent plus proches de celles qui représentent la population des pratiquants amateurs, comme la vitesse et le positionnement. Comme dernier point, ce projet tente de comparer la faisabilité, la répétabilité et la validité d'une méthode d'évaluation aérodynamique qui est facilement réalisable pour la population cycliste amateur. Pour la bonne exécution du projet, plusieurs tâches sont nécessaires.

- a.** Acquérir une connaissance de la littérature scientifique sur les notions et méthode d'analyse de la performance en cyclisme.
- b.** Déterminer les méthodes d'évaluation aérodynamique et de surface frontale projetée les plus appropriées selon les ressources disponibles.
- c.** Créer et utiliser un protocole pour méthode d'évaluation de la surface frontale projetée par digitalisation et évaluer sa répétabilité.
- d.** Comparer la méthode d'évaluation de la surface frontale avec une méthode de terrain de référence (méthode de régression linéaire).

Finalement, l'analyse et la discussion des résultats permettraient de justifier s'il y a un intérêt pour un cycliste amateur de mettre l'emphase sur l'efficacité aérodynamique et d'être auto-évaluatif pour augmenter sa performance. Cette amélioration de la performance amènerait les pratiquants à poursuivre leur pratique de l'activité physique et à s'améliorer dans celle-ci.

Hypothèse

Un cycliste (amateur et expert) peut optimiser sa performance aérodynamique avec la mesure de la surface frontale par un protocole de digitalisation.

Méthodologie

Participants

Dans le cadre de ce projet approuvé par le Comité d'éthique de la recherche clinique (CERC-18-002-P), un groupe de 14 hommes, 31 ± 14 ans, $74,83 \pm 8,97$ kg, 177 ± 7 cm sans problèmes de santé ont été sélectionnés. Avant de participer aux tests, les sujets ont tous signé le document de consentement émis par le CERC ainsi que le questionnaire « menez une vie plus active de la Société canadienne de Physiologie de l'Exercice (SCPE) ». Ils ont été divisés en deux groupes selon l'expérience et le niveau d'expertise qu'ils possèdent dans le domaine cycliste [tableau 3].

Tableau 3 : Mesures anthropométriques des participants de l'étude

Groupes de sujets	Âge (année)	Taille (cm)	Masse (kg)
Expert (n=7)	$34,0 \pm 16,7$	$179,3 \pm 6,8$	$77,11 \pm 5,72$
Amateur (n=7)	$29,0 \pm 12$	$175,1 \pm 6,4$	$72,54 \pm 11,36$

Méthode par digitalisation

Les sujets devaient d'abord commencer par la prise de photo de chacune des positions évaluées dans le projet. Ces positions sont les plus communes en cyclisme, soit : les mains sur la partie haute du guidon (P_1), mains sur les leviers de vitesse (P_2), mains dans la partie basse du guidon (P_3) (Barry et al., 2014; Jeukendrup & Martin, 2001; C. R. Kyle & Burke, 1984). Ensuite, chaque sujet devait utiliser exactement le même équipement pour tous les tests. Pour chacune des photos, le sujet se place devant un mur d'une couleur blanche unie. Idéalement, le sujet doit être statique avec son vélo accroché sur un support pour avoir une position la plus droite possible. De plus, l'appareil photo devrait idéalement être fixé sur un trépied afin de garder une hauteur constante. Cependant, à cause du manque de ressources financières, aucune base de support n'était accessible, alors le chercheur a adapté la situation en permettant au

cycliste de se laisser rouler le plus lentement possible devant lui pour prendre une photo de face à une distance de 2 à 5 mètres de distance. C'est pourquoi le sujet avait comme indication de se laisser rouler le plus droit possible sans bouger. Cette situation devra être ajusté lors de la phase de traitement photographique à l'ordinateur. Un appareil photo numérique avec un capteur de 24 Mpx (Fujifilm XT-20) et un objectif (Fujifilm 18–55 mm F2.8-F4) ont été utilisés. Pour toutes les photos, l'objectif a été fixé à une distance focale de 23 mm pour éliminer la distorsion optique créée par celui-ci.

Une fois toutes les photos prises et importées, un profil de correction d'objectifs a été utilisé pour éliminer les défauts créés par l'objectif (Adobe Lightroom CC 2019, Fujifilm Inc.). Les profils d'objectifs servent à corriger le vignettage et la distorsion excessive qui sont en situation réelle et qui ne concordent pas avec le profil optique théorique de l'objectif. Ces profils sont créés par les fabricants et sont spécifiques à chacun des objectifs présents sur le marché.

Par la suite, elles ont été exportées dans le logiciel Adobe Photoshop CC 2019. Le découpage de toutes les photos a été fait avec les outils de Lasso magnétique (L : 10 px Contraste : 75 %, Fréquence : 100), lasso manuel, lasso polygonal et la baguette magique (Tolérance : 80). Le premier découpage est celui de la roue avant en vue de face qui sert de zone d'étalonnage, car la dimension réelle du pneu est connue ; 700 mm diamètre (ISO 5775) et 27 mm d'épaisseur mesurés. La découpe se fait sur chacune des photos, à cause de la variation de la distance entre le sujet et le photographe. Pour la découpe du cycliste sur son vélo, les manœuvres et outils sont les mêmes. Après chacune des découpes complétées, il faut noter la couverture de pixel à l'aide de la fonction statistique du logiciel Photoshop. La quantité de pixels notés est ensuite inscrite dans un document Excel (Office 2019) qui permet de convertir les pixels en m² avec la formule :

$$\frac{CP_y}{CP_x} \times SR_y = SR_x \quad [18]$$

Où :

CP_x = couverture pixélisée du sujet en pixels

CP_y = couverture pixélisée de la zone d'étalonnage en pixels

SR_x = surface réelle du sujet en mm^2

SR_y = surface réelle de la zone d'étalonnage en mm^2



Méthode par régression linéaire

Lieu et Équipement

Les essais sur terrain effectués pour la méthode par régression linéaire ont tous été réalisés au même endroit, soit l'allée de puits au Circuit Gilles-Villeneuve (Montréal, Québec, 6 mètres au-dessus du niveau de la mer). En plus d'être sécuritaire pour les sujets, la protection du vent par le bâtiment des espaces paddocks et le muret qui sépare le circuit de la route dans l'allée des puits constituent l'avantage de cet endroit. La qualité de l'asphalte qui est soigneusement entretenue pour les courses automobiles est un autre avantage du circuit. La distance mesurée du parcours pour les essais est de 100 mètres et est visuellement délimitée. Les tests ont été exécutés à des températures de 294 ± 5 K et à une pression barométrique de $758,39 \pm 6,74$ mmHg. Les conditions environnementales ont été recueillies selon les données d'environnement Canada.

L'équipement utilisé pour les tests comporte plusieurs capteurs qui sont installés sur le vélo du sujet. Ceux-ci s'installent rapidement, ce qui permet une facilité d'utilisation. Un capteur de vitesse (Garmin speed sensor) permet de calculer la vitesse avec la rotation de la roue, un capteur de cadence (Garmin cadence sensor) permet de mesurer la cadence de pédalage du sujet et un capteur de puissance (Aeropod, Velocomp inc.) mesure l'entrée du vent pour ainsi faire un calcul théorique de la puissance. Cette dernière n'est donc pas mécanique, mais une puissance aérodynamique théorique. Celle-ci est donc estimée à partir d'une combinaison de capteurs : accéléromètre, pression dynamique et pression barométrique qui permettent d'estimer la puissance développée par le cycliste avec sa vitesse mesurée par le capteur de vitesse (Velocomp inc., Garmin inc.). Une montre GPS (Garmin fenix 3 sapphire) est également installée pour permettre la lecture de la vitesse en temps réel et l'enregistrement des données.

Calcul de la surface frontale effective C_{DA}

Essais

Afin d'obtenir une vitesse moyennée, le sujet fait trois essais pour chaque vitesse et chaque position sur une distance mesurée, pour un total de 27 essais. Les vitesses choisies sont 20 km/h, 30 km/h et 40 km/h et la distance mesurée est de 120 m. Les positions choisies sont les mêmes que pour l'étape de la surface frontale projetée, soit : mains sur la partie haute du guidon (P_1), mains sur les leviers de vitesses (P_2) et mains sur la partie basse du guidon avec coudes fléchis (P_3).

Pour chaque essai, le sujet doit franchir la distance mesurée à vitesse constante mesurée, mais il lui est indiqué qu'il peut prendre la distance qu'il veut pour accélérer. Avant de franchir le premier indicateur de la distance mesurée, il doit appuyer sur le bouton-START de la montre pour démarrer une capture de donnée et appuyer sur le bouton-STOP pour terminer l'enregistrement. Une fois les données sauvegardées, il peut continuer ses essais. L'ordre des positions et des vitesses a été le même pour les deux groupes.

Collecte et conversion des fichiers

La plateforme Garmin connect est employée pour recueillir les fichiers de données qui seront utilisés pour déterminer le C_{DA} avec le logiciel MATLAB_R2019b. Cependant, nous voulons uniquement les données de la distance mesurée et le seul format offert par Garmin qui possède les données brutes est le format original avec l'extension .FIT. De plus, comme ce dernier n'est pas pris en charge par le logiciel MATLAB_R2019b, il est nécessaire de le convertir en fichier .CSV. La conversion des fichiers .FIT en .CSV s'effectue avec une maquette de programmation sur le logiciel Python (Python inc.).

Détermination de C_{DA}

Pour calculer la surface frontale effective (C_{DA}), il faut d'abord filtrer les données brutes de chacun des essais pour obtenir la portion de vitesse constante sur la distance mesurée. Celle-ci se fait avec une maquette programmée sur MATLAB_R2019b et les critères d'inclusion ont été choisis arbitrairement, soit : la vitesse prédéterminée pour l'essai ± 5 km/h, une accélération en dessous de $2,00 \text{ km/h}^2$ ainsi qu'un temps de vitesse constante maintenue à ≥ 5 secondes.

Une fois les données filtrées, il faut calculer les variables et les constantes nécessaires en se référant aux l'équation [13, 14, 15] :

$$\frac{P}{v} = F_{RT} = \alpha_1 v_f^2 + \beta_1 \quad [19]$$

Où :

$$\alpha_1 = \frac{1}{2} \rho A C_D \quad [20]$$

$$\beta_1 = C_R m g \quad [21]$$

La puissance P est obtenue par le capteur de puissance (Aeropod, Velocomp Inc.), la vitesse V et la vitesse au carré v^2 sont mesurées par le capteur de vitesse (Garmin). La variable m est la moyenne de masse corporelle des sujets incluant leur vélo soit ; $82,41 \pm 8,94$ kg, la gravité (g) est de $9,81 \text{ m/s}^2$.

Le taux d'humidité dans l'air peut être considéré comme négligeable, donc la masse volumique de l'air ρ se mesure par la formule [4] (Capelli et al., 1993; di Prampero, 1986) :

$$\rho = \rho_o \times \frac{PB_{ext}}{760} \times \frac{273}{T} \quad [22]$$

Où :

$\rho_o = 1.293 \text{ kg}\cdot\text{m}^3$ (masse volumique de l'air à 760 mmHg et 273 K)

PB_{ext} = pression barométrique extérieure (mmHg)

T = Température extérieure (K)

Il est possible de calculer le coefficient de roulement C_R en connaissant la pression des pneus en kilopascal (kPa) (F Grappe et al., 1999). Tous les sujets ont gonflé leurs pneus à une pression de 700 kPa avant leurs essais. Suivant l'équation [6] :

$$C_R = 0.1071 \times P_r^{-0.477} \quad [23]$$

Où :

P_r = Pression des pneus (kPa)

Une fois toutes les données importées, on crée un graphique en nuage de points avec pour ordonnée la résistance totale (F_{RT} , N) et comme abscisse la vitesse au carré (v^2 , m^2/s^2). Avec le graphique, on en sort une fonction linéaire sous la forme de $f(x) = ax + b$ en posant $V = v^2$.

Analyse statistique

Afin d'évaluer le niveau de fiabilité du résultat des manipulations sur l'évaluation de la surface frontale projetée (A_p), des tests d'ICC intra-opérateur et inter-opérateur ont été effectués avec un intervalle de confiance de 95 % (0,95). Pour la répétabilité intra-opérateur, trois manipulations sur chacune des positions d'un sujet choisi arbitrairement sont effectuées par le chercheur. Ensuite, un test d'ICC à deux facteurs mixtes est exécuté avec un facteur fixe sur l'évaluateur et un facteur aléatoire sur les essais. Dans le cas de la répétabilité inter-opérateur, cinq opérateurs avec peu ou aucune expérience avec le logiciel Photoshop ont effectué trois essais sur une seule photo. Le sujet utilisé est le même que pour l'évaluation intra-opérateur, mais seulement la photo de la position P_1 sera manipulée. Ensuite, un ICC à deux facteurs mixtes est également utilisé, mais cette fois-ci les essais sont déterminés comme facteur fixe et le facteur aléatoire est les opérateurs (Jensen, Balasubramani, Burley, Kaukola, & LaChapelle, 2010). Pour calculer le niveau de fiabilité de la méthode de régression linéaire, une corrélation de Pearson a été calculée entre la vitesse au carré (v^2 , m^2/s^2) et la force (N) de tous les sujets ensemble, pour chacune des positions dans chacun de leurs groupes respectifs. Pour finir, les analyses statistiques ont toutes été réalisées avec la plateforme SPSSStatistics 25 (2019).

Résultats

Surface frontale projetée

Une moyenne et un écart-type ont été calculés pour la surface frontale projetée respective à chaque position et chaque groupe présenté dans le [tableau 4]. Ceux-ci suivent les données actuelles de la littérature et les résultats de chaque groupe démontrent une surface frontale décroissante en ordre de la position P₁ à la position P₃.

Tableau 4 : Calculs des surfaces frontales projetées

Photographie digitale	Taille (cm)	Masse (kg)	Surface frontale projetée A _P (m ²)		
			Position 1	Position 2	Position 3
Expert (n=7)	179,3 ± 6,8	77,11 ± 5,72	0,433 ± 0,040	0,415 ± 0,038	0,385 ± 0,041
Amateur (n=7)	175,1 ± 6,4	72,54 ± 11,36	0,440 ± 0,062	0,411 ± 0,054	0,388 ± 0,060

Analyse statistique

Répétabilité

Les résultats des tests de répétabilité intra et inter-opérateur sont présentés dans le [tableau 6]. Le résultat intra-opérateur présente un ICC moyen 0,998 (intervalle de confiance 0,984 à 1 000 à 95 %) et ICC unique de 0,995. De plus, chacune des trois positions présentes une bonne fiabilité ($p < 0,05$) avec les trois positions (moyenne ± écart-type) : Position 1 = 0,475 ± 0,003 m², Position 2 = 0,434 ± 0,003 m², Position 3 = 0,387 ± 0,003 m². Pour le test inter-opérateur, l'ICC calculé est 0,523 (intervalle de confiance de -1,893 à 0,998 à 95 %) et un ICC unique de 0,180. Malgré l'ICC plus faible, les cinq opérateurs offrent une bonne fiabilité entre

eux ($p < 0,05$) avec le résultat suivant (moyenne \pm écart-type) de $0,386 \pm 0,008 \text{ m}^2$ et avec leurs mesures individuelles présentées dans le tableau ci-dessous [tableau 5].

Tableau 5 : Mesures d'ICC intra-opérateur et inter-opérateur

Méthodes d'évaluations A_P	ICC	Surface frontale projetée (m^2)		
		Position P ₁	Position P ₂	Position P ₃
Photographie digitale				
Chercheur	0,998	$0,475 \pm 0,003$	$0,434 \pm 0,003$	$0,387 \pm 0,003$
Opérateur #1	0,523			$0,379 \pm 0,004$
Opérateur #2				$0,381 \pm 0,004$
Opérateur #3				$0,389 \pm 0,005$
Opérateur #4				$0,387 \pm 0,009$
Opérateur #5				$0,393 \pm 0,008$

Détermination du C_{DA_P}

En commençant, une filtration des fichiers est nécessaire pour s'assurer que les données enregistrées avant et après les distances mesurées ne parasitent pas les calculs. Sur un total de 378 essais, 27 ont été rejetés, 20 dans le groupe expert et 7 dans le groupe amateur, car ceux-ci ne suivaient pas les critères de filtration soit : une accélération minimum de 2 km/h^2 , la vitesse prédéterminée pour l'essai $\pm 5 \text{ km/h}$, ainsi qu'un temps de vitesse constante maintenue ≥ 5 secondes.

Suite à la filtration, la surface de traînée aérodynamique (C_{DA_P}) de chacune des positions pour les deux groupes de sujets a été calculée [tableau 6]. La position $P_{3, \text{amateur}} = 0,382 \pm 0,133 \text{ m}^2$ est celle qui présente la meilleure performance aérodynamique à l'intérieur du groupe, suivie dans l'ordre par la position $P_{2, \text{amateur}} = 0,419 \pm 0,124 \text{ m}^2$ et la position $P_{1, \text{amateur}} = 0,440 \pm$

0,062 m². Pour le groupe expert, les résultats sont différents avec la position P_{1, expert} = 0,389 ± 0,072 m² comme ayant la meilleure performance aérodynamique suivie par la position P_{3, expert} = 0,417 ± 0,133 m² et finalement la position P_{2, expert} = 0,451 ± 0,148 m².

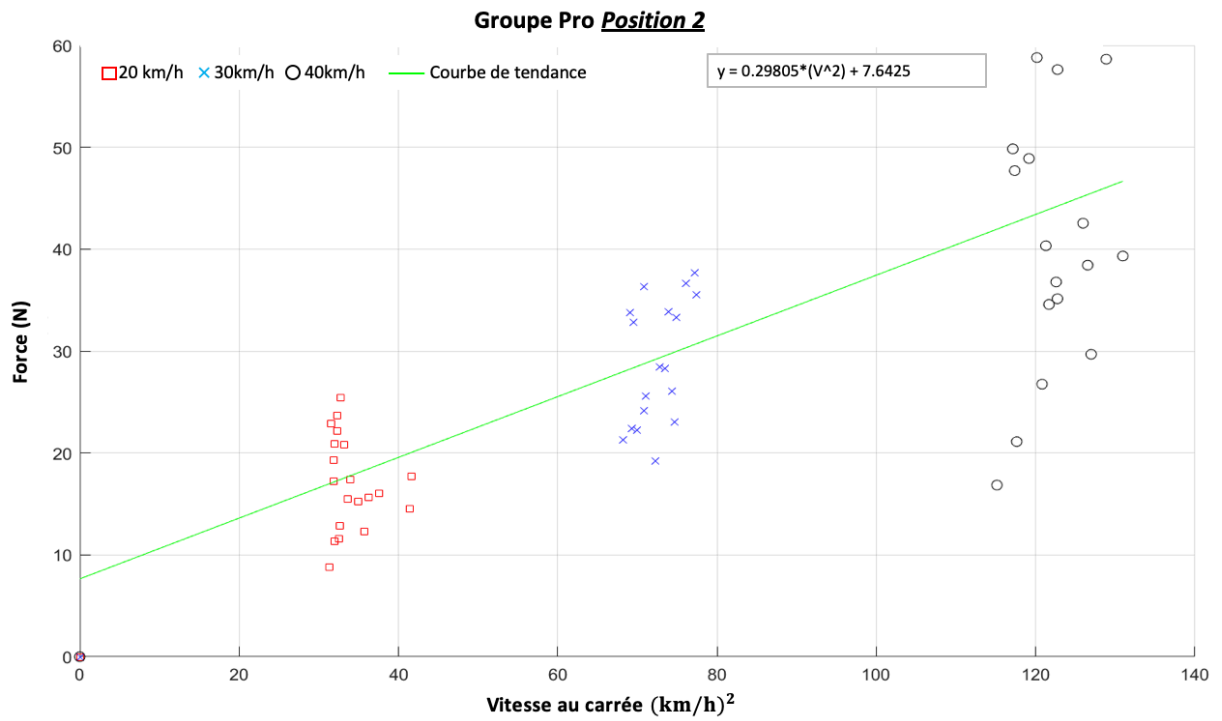
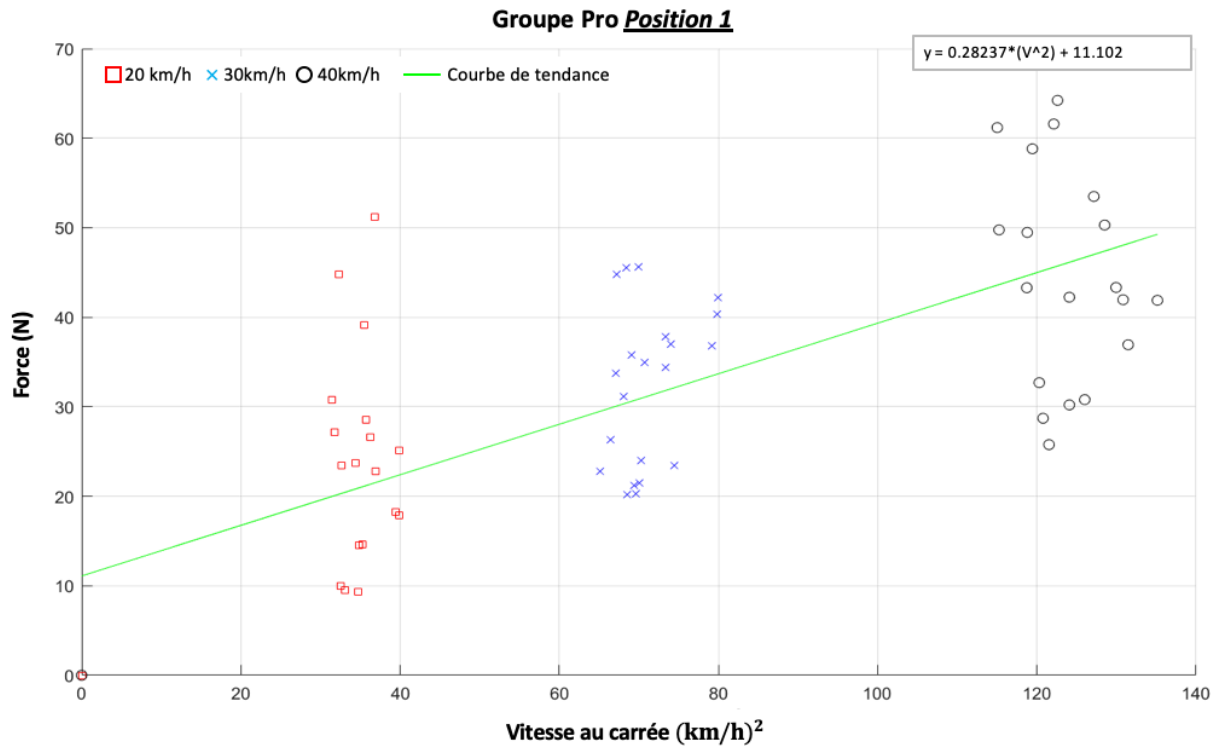
Tableau 5 : Surfaces de traînées aérodynamiques C_DA_p des participants

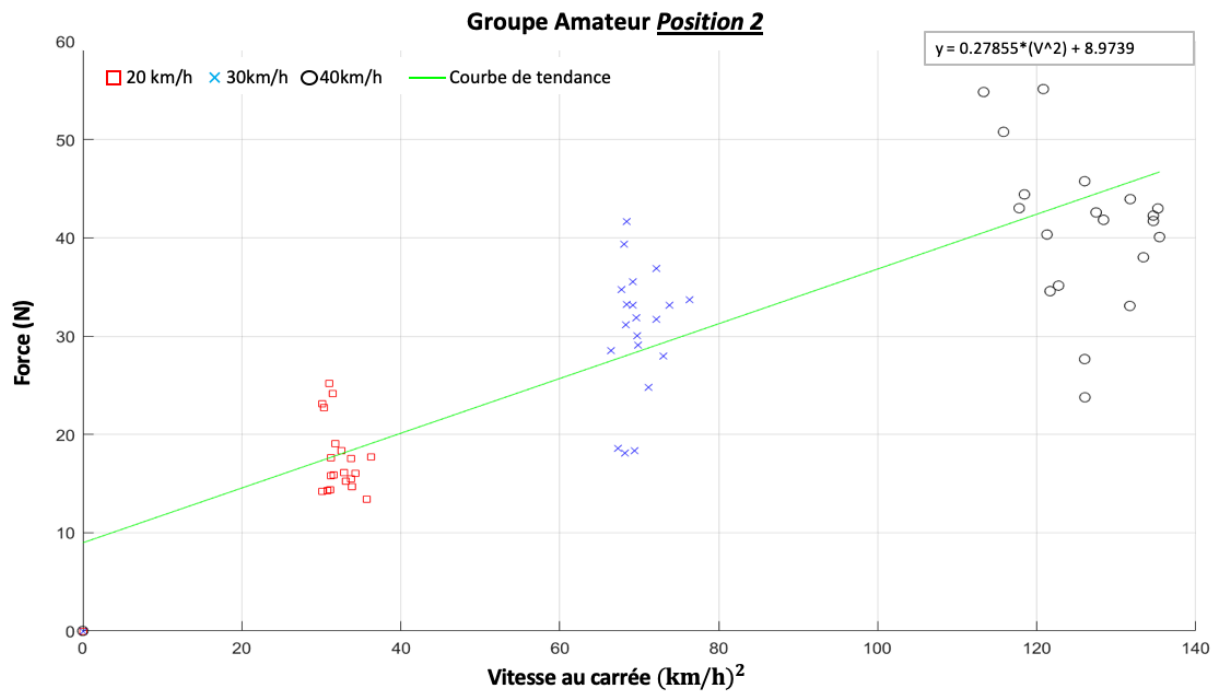
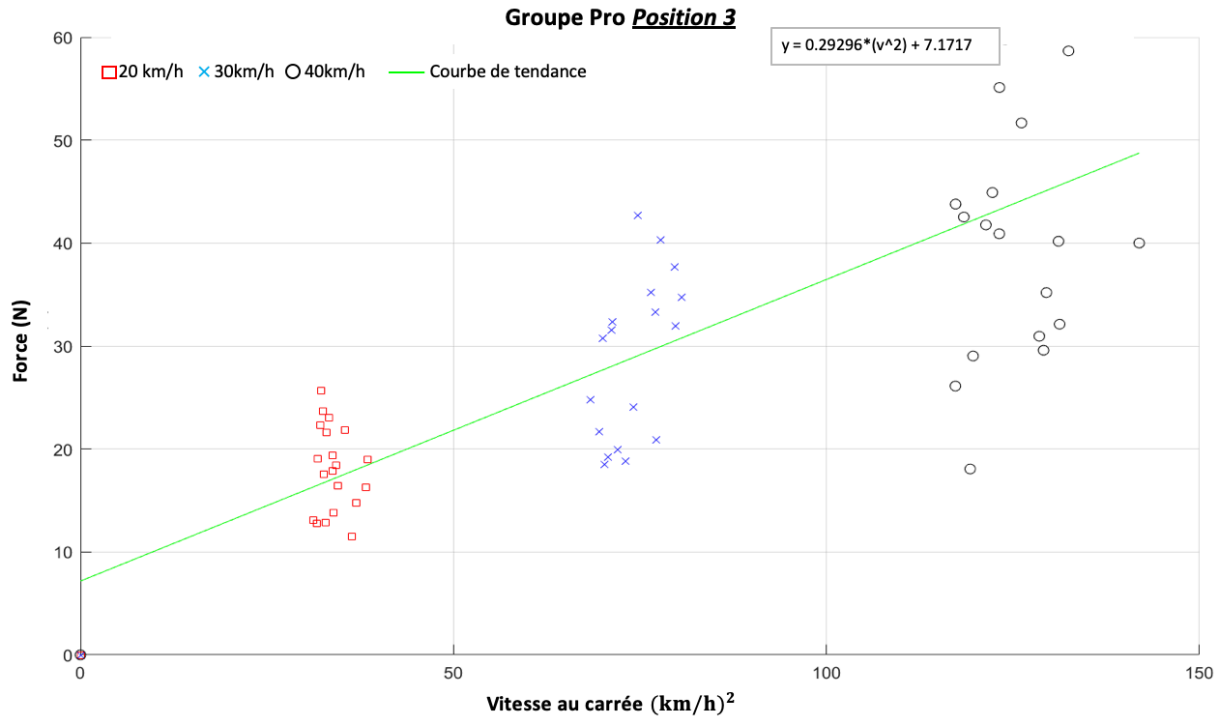
Régression linéaire	Taille (cm)	Masse (kg)	Traînée aérodynamique C _d A _p (m ²)		
			Position P ₁	Position P ₂	Position P ₃
Expert (n=7)	179,3 ± 6,8	77,11 ± 5,72	0,389 ± 0,077	0,451 ± 0,159	0,417 ± 0,144
Amateur (n=7)	175,1 ± 6,4	72,54 ± 11,36	0,440 ± 0,067	0,419 ± 0,134	0,382 ± 0,095

En ce qui a trait à la fiabilité, toutes les positions présentent toute une forte corrélation. Dans le groupe amateur, la corrélation est de R = 0,88 (position P₁), R = 0,84 (position P₂) et R = 0,8 (position P₃). Pour le groupe expert, la position P₁ présente une corrélation modérément forte avec R = 0,72 et les positions P₂ et P₃ présentent chacune des corrélations fortes avec R = 0,85 (position P₂) et R = 0,84 (position P₃) [Tableau 7].

Tableau 6 : Corrélations de Pearson de la surface de traînée aérodynamique

Groupes de sujets	Coefficient de corrélation de Pearson R		
	Position P ₁	Position P ₂	Position P ₃
Groupe expert (n = 7)	0,72	0,85	0,84
Groupe amateur (n = 7)	0,88	0,84	0,80





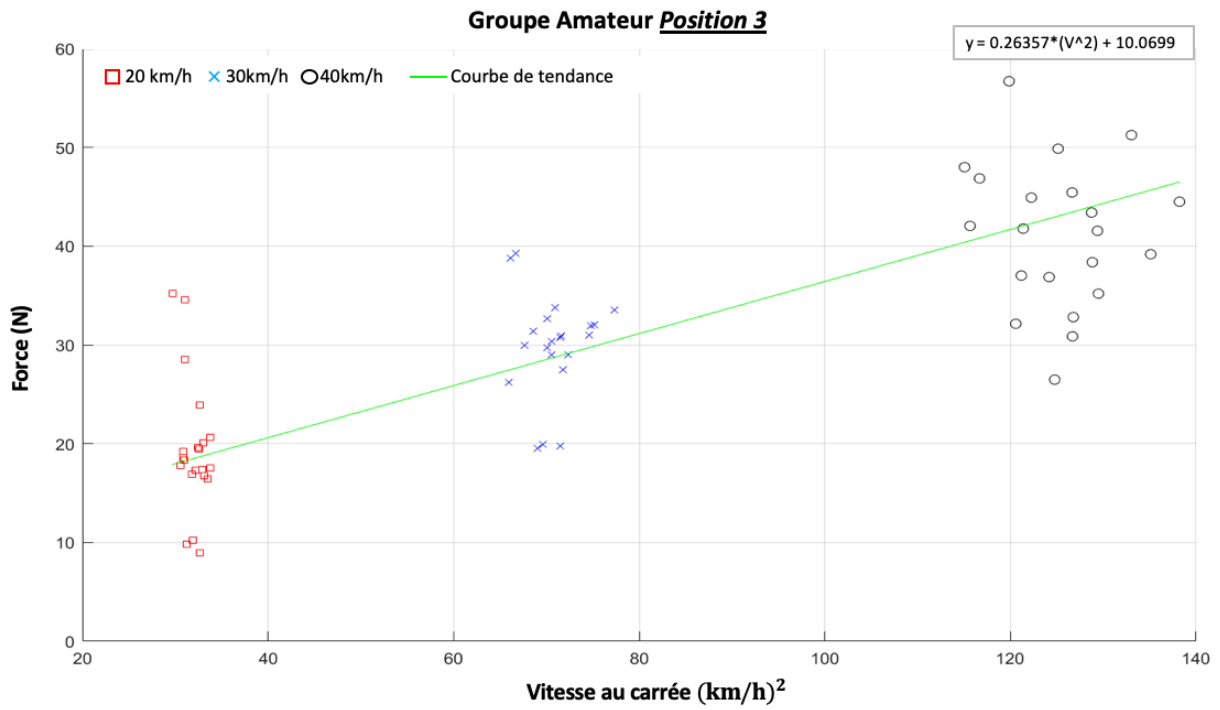
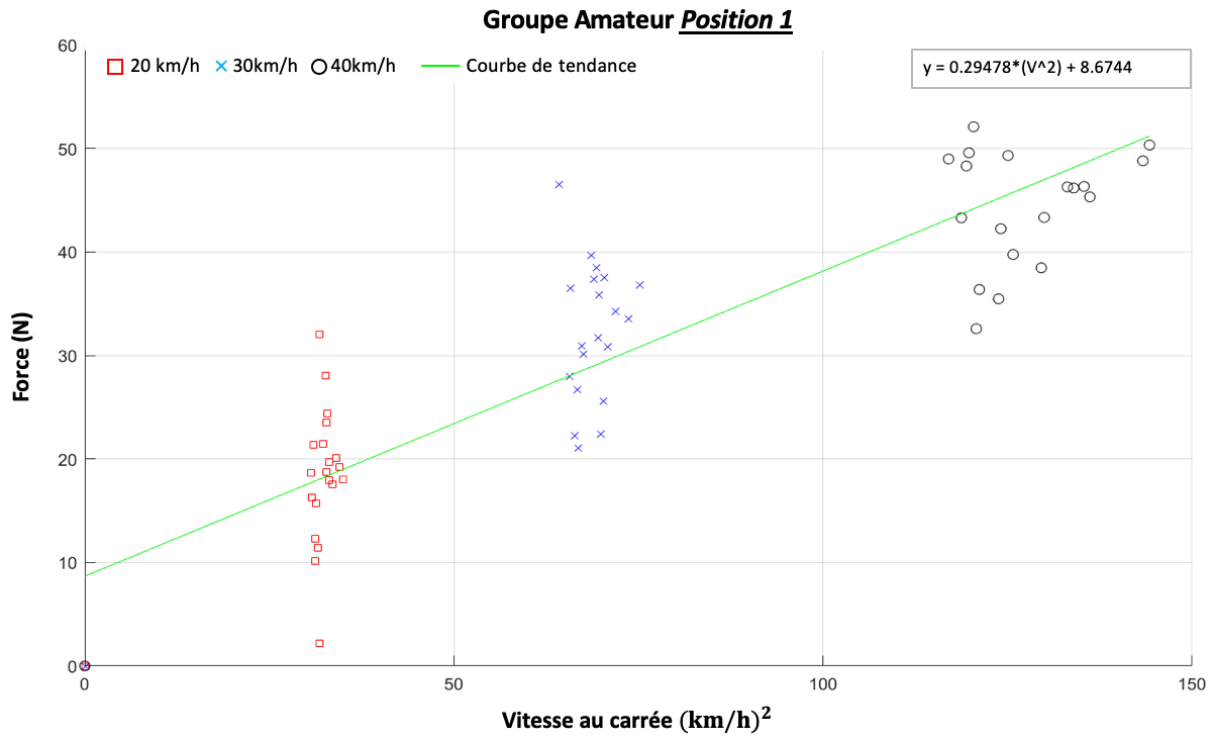


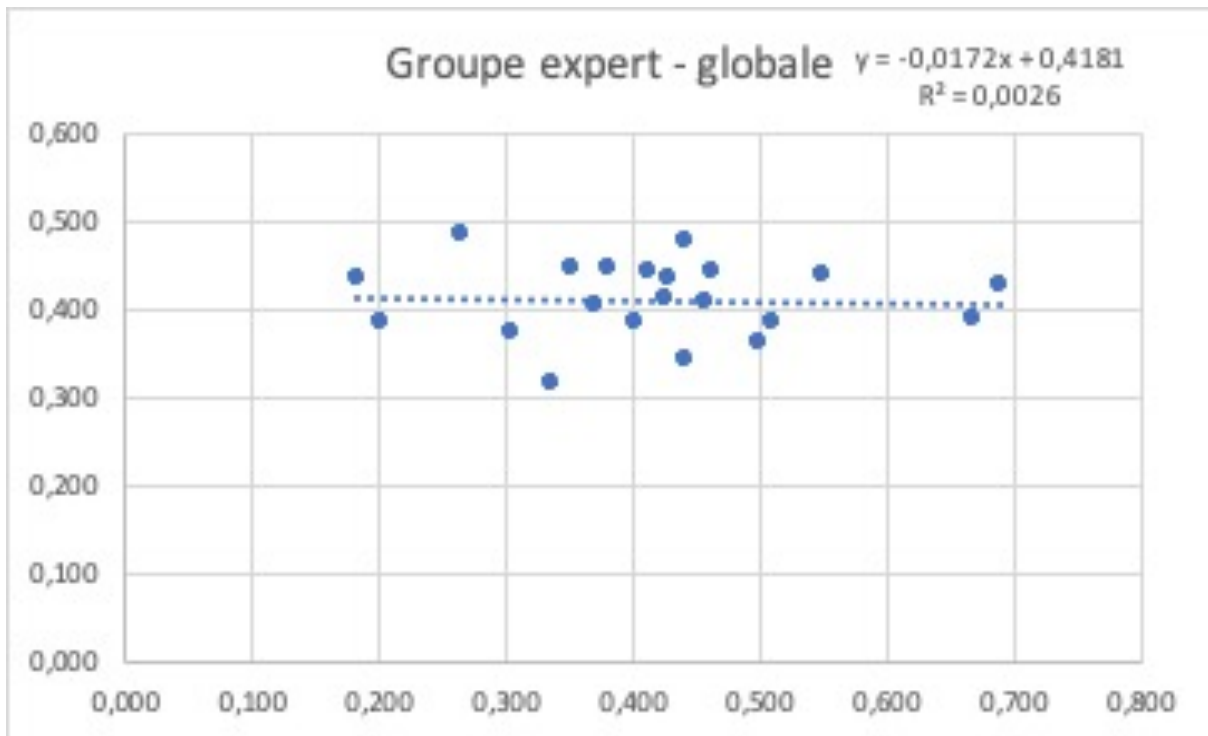
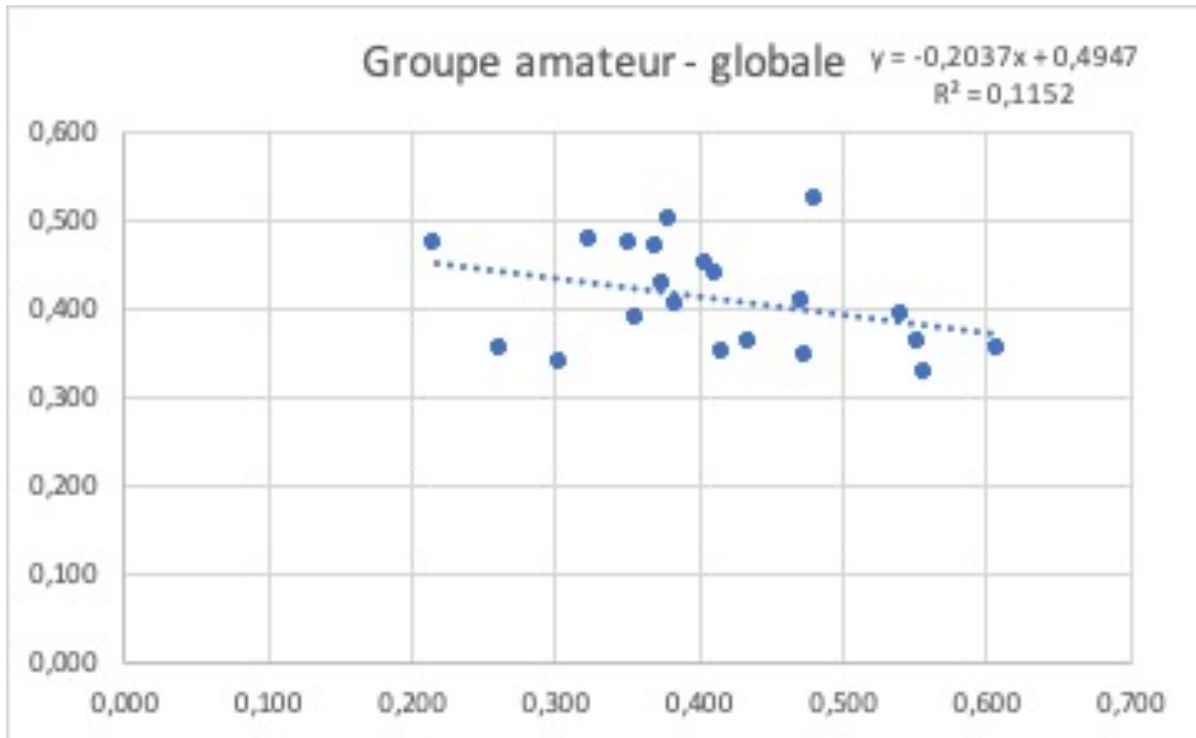
Figure 1 : Régressions linéaires de chaque groupe et position.

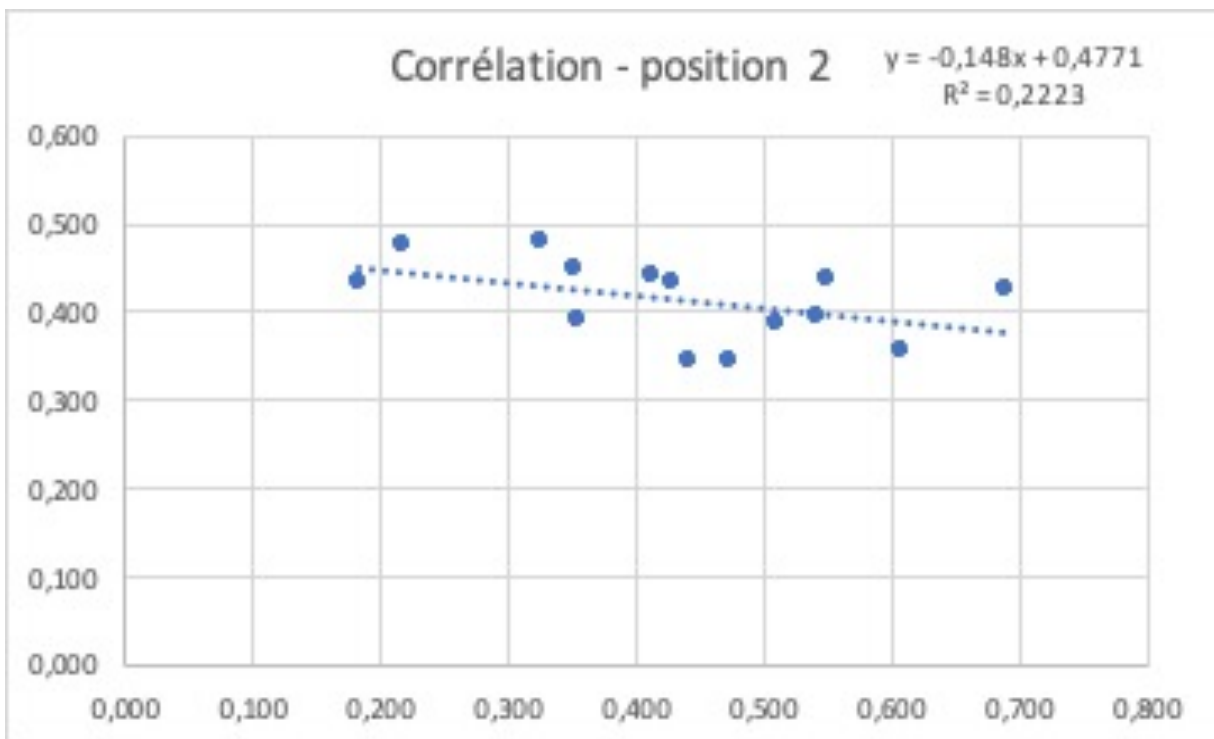
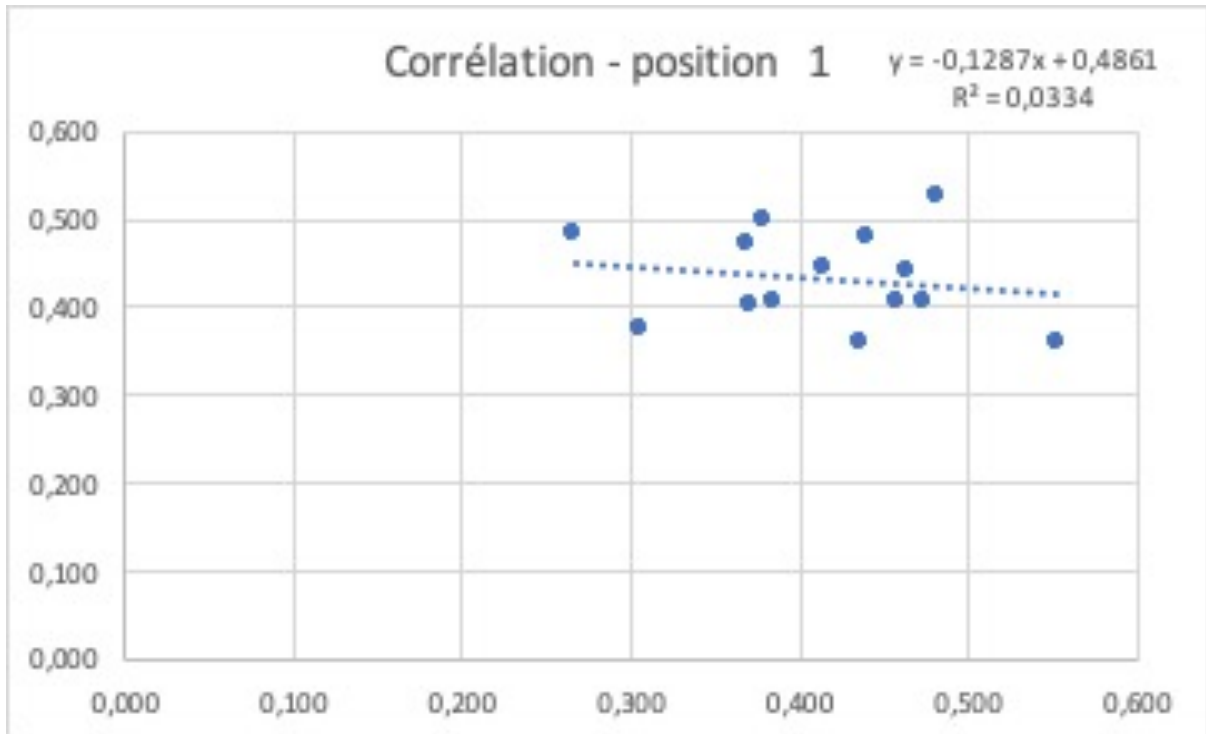
Analyse statistique entre A_P et C_{DA_P}

Afin d'évaluer le lien entre la surface frontale projetée (A_P) et la surface de traînée (C_{DA_P}), des corrélations de Pearson ont été faites entre les deux variables [tableau 8] et présentés dans les graphiques en nuage de points dans la [figure 2]. Tout d'abord un calcul des trois positions pour le groupe expert présente une corrélation négligeable de $R = 0,1$. Pour le groupe amateur, une corrélation faible $R = 0,34$ a été calculée. Lorsque l'on sépare les données par position, mais qu'on inclut les groupes amateurs et experts ensemble, on obtient des corrélations un peu plus hautes. La position P_1 a une corrélation faible de $R = 0,29$, la position P_2 a une corrélation modérée de $R = 0,5$ et la position P_3 a une corrélation négligeable de $R = 0,02$.

**Tableau 7 : Corrélation de Pearson entre
 A_P et C_{DA_P}**

Corrélation de Pearson	R =
Global Expert	0,1
Global Amateur	0,34
Position P_1	0,29
Position P_2	0,5
Position P_3	0,02





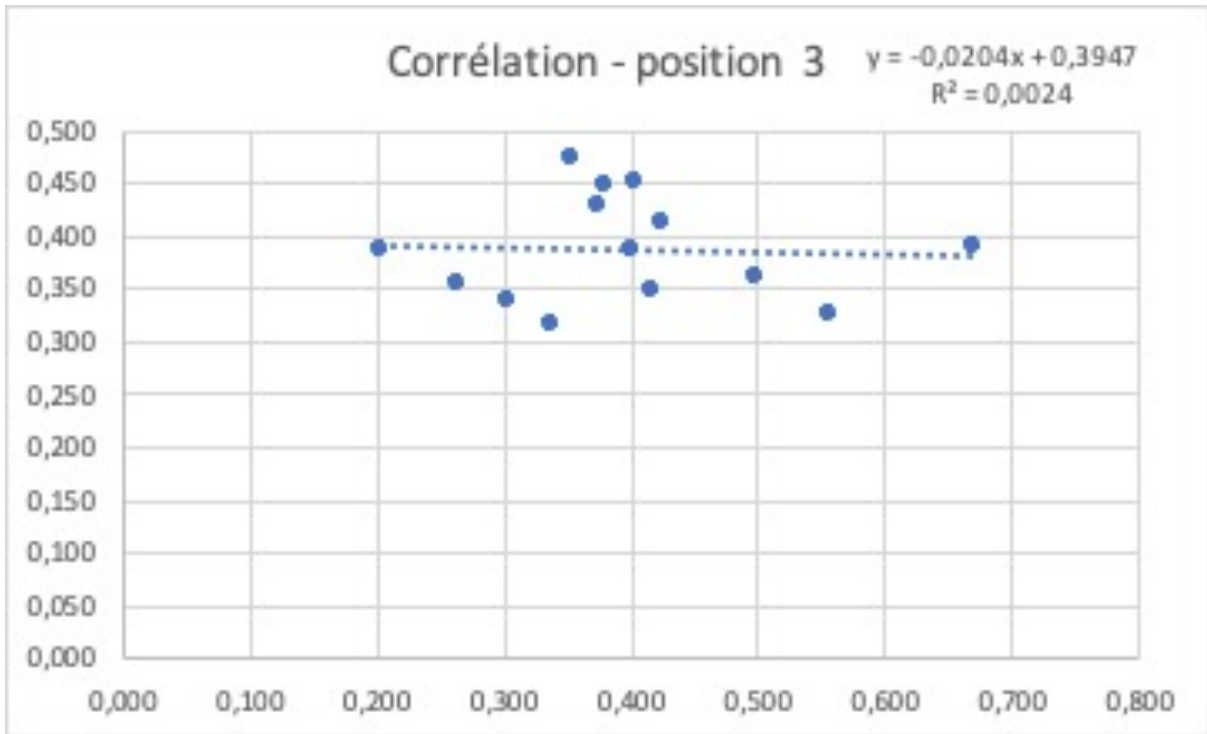


Figure 2 : Corrélations entre la surface frontale projeté A_p et la surface de trainée aérodynamique C_{DAp} .

Discussion

L'intérêt de ce projet est de permettre aux cyclistes d'utiliser une méthode d'auto-évaluation de la performance aérodynamique avec un outil accessible et peu coûteux et ce, peu importe leur niveau d'expertise. Également, ce projet de recherche a pour objectif de documenter si l'utilisation de techniques permettant de donner une approximation du C_{DA_P} présenterait un intérêt pour le cycliste. Également, le but est d'évaluer si le niveau d'expertise des cyclistes impacte les résultats.

Les résultats démontrent qu'il n'existe qu'une faible corrélation entre la surface frontale qui était choisie comme méthode d'auto-évaluation de base et le C_{DA_P} calculé à partir de la méthode aérodynamique de régression utilisée dans ce projet. La littérature actuelle démontre que plus la position d'un cycliste est basse, plus la surface frontale projetée est petite. De plus, en réduisant la surface frontale d'un cycliste, sa surface de traînée aérodynamique C_{DA_P} s'avère diminuée, ce qui a pour effet d'augmenter sa vitesse pour un même effort donné. Les trois positions utilisées dans ce projet se voulaient référées aux plus populaires en cyclisme de route sans l'utilisation des barres aérodynamiques (Barry et al., 2014; Pierre Debraux et al., 2011; D. P. Heil, 2002; C. R. Kyle & Burke, 1984; T. Olds & Olive, 1999).

Lorsque l'on regarde le niveau d'expertise des sujets, la majorité des recherches en performance aérodynamique sont évaluées sur des cyclistes de haut niveau (experts et professionnels) ce qui rend difficile de prétendre que ces résultats sont transférables chez les cyclistes amateurs. Comme ceux-ci forment une grande population de pratiquants de ce sport, il y a un intérêt clair à évaluer les principes de performance aérodynamique chez cette population. Bien que les résultats de cette recherche démontrent que les méthodes sont applicables aux deux populations, on en conclut que la surface frontale projetée A_P est un mauvais proxy pour extrapoler la traînée aérodynamique C_{DA_P} .

Surface frontale projetée

Dans le cadre de la méthode d'évaluation de surface frontale projetée, les données obtenues avec l'outil utilisé suivent la littérature actuelle [Tableaux 2 et 4]. Un ordre décroissant suit les trois positions de la première à la dernière ce qui démontre clairement que le sujet présente une surface frontale plus petite au fur et à mesure qu'il adopte une position plus basse sur son vélo. Également, les résultats des mesures obtenues de surface frontale des sujets semblent sous-estimés pour les positions P₁ et P₃ et surestimés pour la position P₂ : Position P₁ = $0,433 \pm 0,053 \text{ m}^2$, Position P₂ = $0,413 \pm 0,045 \text{ m}^2$, Position P₃ = $0,387 \pm 0,050 \text{ m}^2$ comparativement à Position P₁ = $0,487 \pm 0,075 \text{ m}^2$, Position P₂ = $0,465 \pm 0,096 \text{ m}^2$, Position P₃ = $0,480 \pm 0,071 \text{ m}^2$. Cependant, ces valeurs restent dans les limites de ce qui existe actuellement dans la littérature scientifique (Barry et al., 2014; Pierre Debraux et al., 2011; Jensen et al., 2010; T. Olds, 1998; T. S. Olds et al., 1995). Cette surestimation ne pourrait pas être attribuée à la morphologie des sujets, car les données anthropométriques sont semblables (taille et masse, moyenne \pm écart-type) : $74,8 \pm 8,97 \text{ kg}$ et $1,77 \pm 0,07 \text{ m}$ (n = 14) pour les sujets du projet comparativement aux données de la littérature : $74,7 \pm 7,1 \text{ kg}$ et $1,8 \pm 0,04 \text{ m}$ (Barry et al., 2014; Pierre Debraux et al., 2011; Jensen et al., 2010; T. Olds, 1998; T. S. Olds et al., 1995). Cependant, comme il existe peu de littérature sur l'utilisation de cette méthode, il est difficile d'établir si les résultats sont valides.

Lorsqu'on compare uniquement avec les données obtenues par la même méthode d'évaluation que dans le projet, seulement le résultat de la position 3 est presque similaire : $0,387 \text{ m}^2$ pour les résultats du chercheur et $0,386 \text{ m}^2$ avec (Jensen et al., 2010). Cependant peu de littérature utilisant cette méthode en cyclisme existe, alors il est difficile d'établir une comparaison claire. Cette variabilité de résultats qu'on retrouve dans la littérature semble être causée par les différences de positions entre les sujets. L'angle de flexion du tronc, de flexion des coudes où l'extension du cou peut jouer grandement sur A_P, car lorsque ces angles ne sont pas mesurés, les seuls critères de positionnement donnés aux cyclistes sont les points d'appui des mains au guidon.

Lorsqu'on compare la surface frontale des trois positions entre elles, on remarque une diminution progressive de la surface frontale de 4,6 % entre la position P₁ et la position P₂, une différence de 6,3 % entre la position P₂ et la position P₃ et on trouve une diminution de 10,7 % de la surface frontale lorsqu'un sujet passe de la position P₁ à la position P₃. De plus, si on compare les différences entre les deux groupes, on y retrouve une différence de moins de 1 % entre ceux-ci, ce qui démontre que le niveau d'expertise n'influence pas significativement la différence entre la surface frontale de chaque position.

Lors du calcul de l'ICC intra-opérateur et inter-opérateur (intervalle de confiance de 95 %) pour la méthode d'évaluation de surface frontale projetée de (Swanton et al., 2006). Le coefficient obtenu par le chercheur est classé comme très fort (ICC = 0,998) et celui obtenu par les opérateurs est fort (ICC = 0,523). Malgré l'ICC des opérateurs présentant une forte corrélation, celui-ci est significativement plus bas que le coefficient du chercheur. Cette différence de corrélation peut s'expliquer par le type de manœuvre que le chercheur et les opérateurs avaient à effectuer. Le chercheur devait faire les manipulations sur les trois positions différentes du même sujet, et ce trois fois par position. Dans le cas des opérateurs, ceux-ci devaient également effectuer trois fois la même manipulation, mais uniquement sur une seule position du même sujet.

Même si les ICC calculés sont différents, la méthode de mesure en elle-même démontre une bonne fiabilité lorsqu'on compare les moyennes et écarts-types des résultats obtenus : $0,387 \pm 0,003$ m² pour le chercheur et une moyenne de $0,386 \pm 0,008$ m² pour les opérateurs. Cette déviation standard représente moins de 1 % pour les résultats du chercheur et moins de 2 % pour les résultats des opérateurs. Cette différence de 1 % peut s'expliquer par le niveau d'expertise de la personne qui fait les manipulations à l'ordinateur. En effet, même si les opérateurs ont trouvé que le cahier de procédure était clair, aucun d'entre eux n'avait de l'expérience avec le logiciel Photoshop CC. De son côté, le chercheur utilise ce logiciel depuis une dizaine d'années et est suffisamment à l'aise avec celui-ci pour créer une différence de précision. D'un autre côté,

cette différence négligeable entre les manipulations démontre un potentiel de bonne fiabilité dans l'exécution de cette méthode, peu importe le type de population qui l'utilise.

Points forts

Comme la performance en cyclisme est affectée significativement par le positionnement, les gains peuvent être mesurés avec la surface frontale, mais ils peuvent être marginaux en fonction de la forme globale du cycliste. L'entraînement et la pratique du sport restent un facteur important de la performance en plus d'améliorer la santé des pratiquants. Cependant, même si ces gains peuvent être marginaux, ce type d'évaluation de la surface frontale reste facile et peu coûteux pour tous les types de pratiquants, amateurs ou experts. En effet, le vaste choix d'outils informatiques et appareils photo digitaux disponibles aujourd'hui amène une facilité et une précision de mesure intéressante autant pour les cyclistes que pour la recherche.

De plus, malgré la différence d'expertise, les résultats dans l'évaluation de la surface frontale projetée par méthode digitale en utilisant le cahier de procédure du chercheur s'avèrent proches les uns des autres. Par ailleurs, ce genre de méthode peut être vue comme une mise à jour des différentes méthodes existantes dans la littérature. Beaucoup de recherches sur l'évaluation de la surface frontale sont faites avec la pesée photographique et l'air de la photographie argentique est remplacé par la photographie numérique. Il faut donc améliorer la méthode et l'adapter.

Points faibles

Dans l'utilisation de cette méthode, il a été remarqué que le cycliste doit avoir une différence significative au niveau de sa position. Une différence de surface frontale d'à peine 4 à 6 % d'une position à l'autre offre uniquement des gains marginaux en termes de performance. Également, une position sur des barres aérodynamique aurait pu être évaluée pour déterminer si

une différence significative est présente afin de voir si en course de triathlon ou en course de contre-la-montre, ce type de méthode d'évaluation est intéressante à utiliser.

De plus, le niveau de confort entre chacune des positions n'a pas été évalué. Il est important de prendre ce facteur en considération, car en situation réelle, un cycliste doit tenir une position plus aérodynamique pendant une portion significative d'un parcours pour avoir un effet significatif sur la performance totale.

Du côté du calcul de répétabilité inter-opérateur, les manœuvres exécutées sur une seule photo par les différents candidats pourraient expliquer la diminution de l'ICC comparativement à la littérature actuelle. Comme rapporté dans (Jensen et al., 2010), les manipulations photographiques sont les mêmes, soit de calculer la surface frontale projetée à trois répliques sur chacune des positions, ce qui pourrait expliquer des ICC Intra-opérateur (ICC = 0,996) et Inter-opérateurs (ICC = 0,979) semblables.

Détermination du C_{DA_P}

En se fiant uniquement à l'ordre de décroissance des résultats, il semblerait que la surface de traînée aérodynamique à laquelle nous pourrions nous fier est seulement celle des sujets amateurs. En effet, seul ce groupe présente un C_{DA_P} décroissant de la position 1 à 3, ce qui suit le consensus scientifique et la logique que plus un cycliste s'accroupit dans une position basse sur son vélo, plus il sera aérodynamique. De l'autre côté, le groupe expert présente des données opposées à ce que la littérature scientifique propose (Crouch et al., 2017; Pierre Debraux et al., 2011; C. R. Kyle & Burke, 1984). Si on observe les données du groupe expert, la position P_1 serait la plus aérodynamique $0,389 \pm 0,077 \text{ m}^2$ la position P_2 la moins aérodynamique $0,451 \pm 0,159 \text{ m}^2$ et la position P_3 serait entre les deux $0,417 \pm 0,144 \text{ m}^2$. Cet ordre peut être attribué au manque de précision des données collectées par le capteur lors des tests, l'équipement et l'environnement dans lequel les tests ont été faits. Le capteur de puissance utilisé calcule la

puissance aérodynamique et non la puissance mécanique directement appliquée aux pédales. Comme l'environnement extérieur n'était pas complètement à l'abri du vent, la qualité des données a pu en être affectée (Crouch et al., 2017). De plus, parmi les 27 fichiers rejetés, 20 d'entre-deux se situaient dans le groupe expert, ce qui pourrait affecter le résultat des C_{DAp} , étant donné que ces fichiers représentent 10,5 % des fichiers totaux attribués au groupe expert.

Lorsque l'on compare la moyenne globale des résultats des positions du projet avec ceux qui sont présentés dans la littérature scientifique, peu importe la méthode de mesure, il est intéressant de remarquer que l'ordre suit le même que celui du projet. La position P_3 présente la surface de traînée la plus performante $0,399 \pm 0,12 \text{ m}^2$ comparativement à $0,288 \pm 0,03 \text{ m}^2$ et la position P_1 serait la deuxième plus performante avec $0,414 \pm 0,07 \text{ m}^2$ comparé à $0,308 \pm 0,04 \text{ m}^2$. La position P_2 serait la moins aérodynamique $0,414 \pm 0,07 \text{ m}^2$ comparativement à $0,421 \pm 0,08 \text{ m}^2$ (Barry et al., 2014; Pierre Debraux et al., 2011; Jeukendrup & Martin, 2001; C. Kyle & Weaver, 2004). Cet ordre est probablement une coïncidence étant donné que les résultats sont variables et que ce ne sont pas tous les chercheurs qui évaluaient la totalité des positions dans leur projet et que les méthodes d'évaluations variaient [tableaux 1 et 7].

En regardant plus en détail les résultats obtenus par la même méthode (régression linéaire), les différentes surfaces de traînées aérodynamiques obtenues dans le projet sont plus élevées que celles qui sont disponibles actuellement dans la littérature. On observe pour la position P_1 un C_{DAD} de $0,433 \pm 0,05 \text{ m}^2$ comparativement à $0,299 \text{ m}^2$ (Barry et al., 2014), un C_{DAp} de $0,413 \pm 0,04 \text{ m}^2$ comparativement à $0,361 \pm 0,02 \text{ m}^2$ (P Debraux et al., 2009) pour la position P_2 et un C_{DAp} de $0,387 \pm 0,05 \text{ m}^2$ en comparaison avec $0,276 \text{ m}^2$ (Barry et al., 2014). Cette surestimation des résultats du chercheur peut être causée par plusieurs facteurs. Comme pour les résultats du groupe expert, le capteur de puissance utilisé par le chercheur calcule la puissance aérodynamique et non la puissance mécanique, l'environnement ouvert pouvait affecter la précision de celui-ci avec des vents parasites. Également, considérant le fait que peu de littérature utilisant la méthode de régression linéaire est disponible, il est difficile d'affirmer que la différence entre les résultats est significative.

Lorsqu'on observe la magnitude des résultats des groupes, la différence de C_{DA_P} entre les positions P_1 et P_2 est de 4,8 %, la différence entre la position P_2 et P_3 est de 8,8 % et la différence entre la position la moins aérodynamique P_1 et la position la plus aérodynamique P_3 est de 13,2 %. Cette différence se rapproche de la littérature sur le sujet $12,3 \pm 4,1$ % (P Debraux et al., 2009; Jeukendrup & Martin, 2001; C. R. Kyle & Burke, 1984; Barry et al. 2014). Cette similarité avec la littérature est intéressante, car malgré la surestimation des données, la différence entre les positions reste proportionnelle.

Corrélation entre A_P et C_{DA_P}

L'interaction entre la surface frontale projetée A_P et la surface de traînée aérodynamique C_{DA_P} est intéressante. En dynamique des fluides, on sait qu'il y existe une relation de dépendance du C_{DA_P} envers A_P . Cependant, la corrélation entre les différentes positions et les différents groupes semble peu significative soit entre $R = 0,1$ à $0,34$; Pearson) [tableau 11]. Comme rapporté par (J. D. Bassett et al., 1999), cette faible corrélation serait normale et il a même estimé que la surface frontale projetée affecterait environ 50 % de la variation totale de C_{DA_D} . Bien que ce soit un déterminant important de la surface de traînée, réduire la surface frontale projetée n'assure pas la diminution de celle-ci (Crouch et al., 2017). Le coefficient de traînée C_D contient beaucoup d'autres variables qui ont un rôle significatif à jouer. Ceci fait en sorte qu'on ne peut pas se fier uniquement sur A_P pour améliorer la performance aérodynamique d'un cycliste.

Points forts

En suivant les résultats obtenus, les cyclistes devraient se rabattre sur la mesure du C_{DA_P} par régression linéaire qui est relativement facile à réaliser. Les outils nécessaires dans l'évaluation par régression linéaire sont peu coûteux et disponibles facilement sur le marché du consommateur. Un autre point fort est l'application dans une situation réelle. En effet, malgré

les variables parasites qui ont affecté les données recueillies, cette méthode permettait d'évaluer la performance aérodynamique dans une situation beaucoup plus proche de la réalité qu'en soufflerie qui est un environnement excessivement contrôlé. Cela permettrait un meilleur transfert dans une situation de course ou de contre-la-montre.

L'emplacement utilisé pour les tests, le Circuit Gilles-Villeneuve, constitue un point fort de l'étude. En plus d'être accessible au public, celui-ci est situé dans la ville de Montréal ce qui lui donne une facilité d'accès. En plus, cette piste de course accueille la série mondiale de Formule 1 et un grand budget est investi pour la maintenir en bon état. Ceci fait en sorte que la surface est parfaite pour diminuer le plus possible la résistance au roulement.

Points faibles

Le nombre de sujets et la grande disparité de leur niveau d'expertise constituent les premiers points faibles de l'étude. Malgré la grande popularité du cyclisme, peu de personnes ont répondu à l'annonce du projet. Un plus grand nombre de sujets aurait permis d'avoir une plus grande collecte de données, ainsi, l'analyse aurait été plus fiable.

Également, comme pour l'évaluation de la surface frontale projetée, les positions doivent être significativement différentes et doivent être tenues pendant une plus longue durée. La distance sur laquelle les essais ont été mesurés ne reflète pas la distance ou le temps d'une course ou d'un contre-la-montre. Une position aérodynamique peut être difficile à maintenir à long terme et risque d'affecter la performance physiologique du cycliste.

Malgré ses avantages, le Circuit Gilles-Villeneuve présente toutefois un inconvénient. La piste d'essai est située à l'extérieur ce qui exposait les sujets à des conditions météorologiques variables. De plus, malgré la protection des infrastructures, les sujets pouvaient parfois être

exposés au vent. Le vent, parfois présent, pouvait parasiter la capture de données et l'effort que le sujet devait fournir pour garder les vitesses désirées.

Un dernier point faible est causé par le capteur de puissance utilisé. Celui-ci estime la puissance aérodynamique théorique et non la puissance mécanique mesurée par la force appliquée au pédalage. C'est une technologie récente dans l'industrie du cyclisme, car peu d'entreprises investissent en recherche et développement sur ce type de capteur. Ainsi, les mesures peuvent être moins précises et fiables que les autres appareils disponibles sur le marché.

Limites

Les limites présentes dans ce projet sont principalement reliées au manque d'accès à de l'équipement pour optimiser la précision des calculs, comme l'utilisation d'outils permettant au cycliste et à l'appareil photo d'être fixes. Comme le sujet n'est pas fixe, la distance entre le photographe et le sujet peut varier d'une photo à l'autre. À cause de ce facteur, la surface de couverture du sujet varie. Également, un manque d'outil de référence pour la conversion de couverture de pixels en mètres carrés, comme un carton avec une surface réelle connue, fait en sorte que le référent se doit d'être différent. Dans le projet, le pneu avant a servi de référent puisque la dimension est connue, mais son utilisation rendait les manipulations digitales compliquées et moins précises qu'un référent fixe. L'environnement dans lequel les photos ont été prises peut également être considéré comme une limite. Avec un fond de couleur unie dans un environnement contrôlé, les manœuvres de découpes dans le logiciel d'infographie Photoshop auraient été plus précises.

L'équipement utilisé par les sujets n'était pas contrôlé. La seule directive était d'être habillé avec des vêtements de cycliste. Le manque de directive plus précise sur les différents tissus et accessoires que les sujets devaient utiliser pouvait également diminuer la précision des mesures de la surface de traînée aérodynamique.

Une dernière limite statistique de l'étude est l'utilisation de la corrélation de Pearson entre la surface frontale projetée A_P et la surface de traînée aérodynamique C_{DA_P} . Comme une variable est dépendante de l'autre et que A_P peut affecter jusqu'à 50 % du C_{DA_P} (Crouch et al., 2017), il y aurait intérêt à établir une relation linéaire entre les deux. Cependant, il faut réaliser ce genre de tests statistiques en s'assurant de minimiser les variables qui peuvent affecter le coefficient de traînée C_D afin d'éviter la trop grande variation de celui-ci.

Perspectives de recherche

Une première perspective pour d'autres recherches consisterait à utiliser la méthode de surface frontale projetée par photographie digitale avec plus de précision. L'ajout d'équipement comme un trépied, une base de fixation pour le cycliste, un référent avec une mesure connue et un fond de couleur unie pourrait potentiellement optimiser la fiabilité et la validité du calcul de A_P .

En second, l'utilisation d'un capteur de puissance mécanique fiable permettrait une meilleure mesure de la puissance déployée par les cyclistes. Après, il y aurait intérêt à mesurer sur une distance plus longue afin d'évaluer si l'inconfort ou le niveau de fatigue peut affecter la performance aérodynamique d'un cycliste.

Dans la situation où l'idée pourrait être de réutiliser un capteur de puissance aérodynamique, l'emplacement idéal serait dans un vélodrome intérieur. Cela permettrait d'utiliser la puissance théorique calculée dans un environnement contrôlé hors de variables parasites.

Finalement, il y aurait intérêt à mesurer sur une distance plus longue afin d'évaluer si l'inconfort ou le niveau de fatigue peut affecter la performance aérodynamique d'un cycliste.

Conclusion

L'objectif principal de cette recherche était d'évaluer une méthode fiable, précise et accessible de l'évaluation de la surface frontale projetée en cyclisme. La littérature est claire sur le fait que la surface frontale projetée est un déterminant important de la performance aérodynamique et que la position du cycliste y joue un rôle significatif. Également, plusieurs méthodes d'évaluation de la surface frontale projetée existent actuellement, mais la plupart sont inaccessibles en raison des coûts qui y sont reliés ou simplement parce que le matériel n'est plus disponible.

Les résultats de ce projet ont démontré que le changement de position pouvait affecter environ 10,5 % de la surface frontale projetée et que cette diminution est relativement proportionnelle à la surface de traînée soit 13,2 %. De plus, la méthode utilisée pour le calcul de surface frontale projeté s'est montrée facile d'utilisation et fiable avec une forte corrélation. Cependant, un protocole de manipulation bien détaillé est nécessaire, car les résultats peuvent varier en fonction de l'expertise des utilisateurs. De plus, il est difficile d'affirmer la validité de cette méthode compte tenu de la faible disponibilité de littérature scientifique sur cette méthode.

Quant à la méthode d'évaluation de la surface de traînée par régression linéaire, il existe peu de littérature en cyclisme ce qui rend la validité et comparaison des résultats difficiles. Cependant, cette technique est relativement facile à utiliser et moins coûteuse que les comparatifs actuels. De plus, elle a pour avantage de simuler une situation plus proche de la réalité. Malgré la corrélation statistiquement négligeable entre la surface frontale projetée et la surface de traînée aérodynamique, le lien entre ces deux variables est clair. Cette faible corrélation concorde avec la littérature actuelle et nous démontre que beaucoup de variables sont à considérer dans l'augmentation de la performance aérodynamique en cyclisme.

Finalement, la performance en cyclisme est présentement surtout axée sur les pratiquants experts et professionnels, ce qui représente une portion infime de la population cycliste. Cette

augmentation de la performance ne devrait pas être réservée qu'à ce groupe. Ce sport est un des plus populaire au monde et une meilleure performance amène une continuité dans la pratique de l'activité physique. Il existe donc un intérêt clair à permettre aux cyclistes amateurs, kinésiologues ou équipes sportives d'avoir accès à ce type de méthode. Toutefois, il serait judicieux de recréer cette méthode avec des outils plus adéquats pour augmenter la précision et évaluer les gains aérodynamiques sur la performance totale d'un cycliste. Ceci permettrait une meilleure validité et fiabilité de cette méthode.

Références

- Abbiss, C. R., & Laursen, P. B. (2005). Models to explain fatigue during prolonged endurance cycling. *Sports Medicine*, 35(10), 865–898.
- Barelle, C., Chabroux, V., & Favier, D. (2010). Modeling of the time trial cyclist projected frontal area incorporating anthropometric, postural and helmet characteristics. *Sports Engineering*, 12(4), 199–206.
- Barry, N., Burton, D., Sheridan, J., Thompson, M., & Brown, N. A. T. (2014). Aerodynamic performance and riding posture in road cycling and triathlon. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, 229(1), 28–38. doi:10.1177/1754337114549876
- Bassett, D. R., & Howley, E. T. (2000). Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 32(1), 70–84.
- Bassett, J. D., Kyle, C. R., Passfield, L., Broker, J. P., & Burke, E. R. (1999). Comparing cycling world hour records, 1967–1996: modeling with empirical data. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 31(11), 1665–1676.
- Beaumont, F., Lestriez, P., Estocq, P., Taiar, R., Grappe, F., & Polidori, G. (2019). Aerodynamic investigation of the thermo-dependent flow structure in the wake of a cyclist. *Journal of Biomechanics*, 82, 387–391.
- Belluye, N., & Cid, M. (2001). Biomechanics approach to modern cycling, literature data's. *Science and Sports*, 16(2), 71–87.
- Berlin, J. A., & Colditz, G. A. (1990). A meta-analysis of physical activity in the prevention of coronary heart disease. *American Journal of Epidemiology*, 132(4), 612–628.
- Blocken, B., Defraeye, T., Koninckx, E., Carmeliet, J., & Hespel, P. (2013). CFD simulations of the aerodynamic drag of two drafting cyclists. *Computers & Fluids*, 71, 435–445.
- Blocken, B., & Toparlar, Y. (2015). A following car influences cyclist drag: CFD simulations and wind tunnel measurements. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 145, 178–186.
- Blocken, B., van Druenen, T., Toparlar, Y., Malizia, F., Mannion, P., Andrienne, T., . . . Diepens, J. (2018). Aerodynamic drag in cycling pelotons: new insights by CFD simulation and wind tunnel testing. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 179, 319–337.
- Bompa, T. O., & Buzzichelli, C. (2018). *Periodization-: theory and methodology of training: Human kinetics*.
- Candau, R. B., Grappe, F., Menard, M., Barbier, B., Millet, G. Y., Hoffman, M. D., . . . Rouillon, J. D. (1999). Simplified deceleration method for assessment of resistive forces in cycling. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 31, 1441–1447.

- Capelli, C., Rosa, G., Butti, F., Ferretti, G., Veicsteinas, A., & di Prampero, P. E. (1993). Energy cost and efficiency of riding aerodynamic bicycles. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 67(2), 144–149.
- Capelli, C., Schena, F., Zamparo, P., Dal Monte, A., Faina, M., & Di Prampero, P. E. (1998). Energetics of best performances in track cycling. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 30, 614–624.
- Crouch, T. N., Burton, D., LaBry, Z. A., & Blair, K. B. (2017). Riding against the wind: a review of competition cycling aerodynamics. *Sports Engineering*, 20(2), 81–110.
- Debraux, P., Bertucci, W., Manolova, A., Rogier, S., & Lodini, A. (2009). New method to estimate the cycling frontal area. *International Journal of Sports Medicine*, 30(04), 266–272.
- Debraux, P., Grappe, F., Manolova, A. V., & Bertucci, W. (2011). Aerodynamic drag in cycling: methods of assessment. *Sports Biomechanics*, 10(3), 197–218.
- Defraeye, T., Blocken, B., Koninckx, E., Hespel, P., & Carmeliet, J. (2010a). Aerodynamic study of different cyclist positions: CFD analysis and full-scale wind-tunnel tests. *Journal of Biomechanics*, 43(7), 1262–1268.
- Defraeye, T., Blocken, B., Koninckx, E., Hespel, P., & Carmeliet, J. (2010b). Computational fluid dynamics analysis of cyclist aerodynamics: Performance of different turbulence-modelling and boundary-layer modelling approaches. *Journal of Biomechanics*, 43(12), 2281–2287.
- di Prampero, P. (1986). The energy cost of human locomotion on land and in water. *Int. J.*
- Di Prampero, P., Cortili, G., Mognoni, P., & Saibene, F. (1979). Equation of motion of a cyclist. *Journal of Applied Physiology*, 47(1), 201–206.
- Du Bois, D., & du Bois, E. F. (1916). Clinical calorimetry: tenth paper a formula to estimate the approximate surface area if height and weight be known. *Archives of Internal Medicine*, 17(6_2), 863–871.
- Faria, I., Dix, C., & Frazer, C. (1978). Effect of body position during cycling on heart rate, pulmonary ventilation, oxygen uptake and work output. *The Journal of sports medicine and physical fitness*, 18(1), 49.
- Faria, I. E. (1992). Energy expenditure, aerodynamics and medical problems in cycling. *Sports Medicine*, 14(1), 43–63.
- Fintelman, D. M., Sterling, M., Hemida, H., & Li, F. X. (2014). Optimal cycling time trial position models: aerodynamics versus power output and metabolic energy. *Journal of Biomechanics*, 47(8), 1894–1898. doi:10.1016/j.jbiomech.2014.02.029
- Fintelman, D. M., Sterling, M., Hemida, H., & Li, F. X. (2015). The effect of time trial cycling position on physiological and aerodynamic variables. *Journal of Sports Sciences*, 33(16), 1730–1737. doi:10.1080/02640414.2015.1009936

- García-López, J., Rodríguez-Marroyo, J. A., Juneau, C.-E., Peleteiro, J., Martínez, A. C., & Villa, J. G. (2008). Reference values and improvement of aerodynamic drag in professional cyclists. *Journal of Sports Sciences*, 26(3), 277–286.
- GRAPPE, F. (2005). Résistance totale qui s'oppose au déplacement en cyclisme. *Cyclisme et optimisation de la performance: sciences et méthodologie de l'entraînement*, 269.
- Grappe, F., Candau, R., Barbier, B., Hoffman, M., Belli, A., & Rouillon, J.-D. (1999). Influence of tyre pressure and vertical load on coefficient of rolling resistance and simulated cycling performance. *Ergonomics*, 42(10), 1361–1371.
- 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(12), 1299–1311.
- Grappe, F., Candau, R., Busso, T., & Rouillon, J. (1998). Effect of cycling position on ventilatory and metabolic variables. *International Journal of Sports Medicine*, 19(05), 336–341.
- Heil, D. (2001). Body mass scaling of projected frontal area in competitive cyclists. *European Journal of Applied Physiology*, 85(3–4), 358–366.
- Heil, D., Derrick, T., & Whittlesey, S. (1997). The relationship between preferred and optimal positioning during submaximal cycle ergometry. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 75(2), 160–165.
- Heil, D. P. (2001). Body mass scaling of projected frontal area in competitive cyclists. *European Journal of Applied Physiology*, 85(3–4), 358–366. doi:10.1007/s004210100424
- Heil, D. P. (2002). Body mass scaling of frontal area in competitive cyclists not using aero-handlebars. *European Journal of Applied Physiology*, 87(6), 520–528.
- Jensen, R. L., Balasubramani, S., Burley, K. C., Kaukola, D. R., & LaChapelle, J. A. (2010). Reliability of a digital method to determine frontal area of a cyclist. *Measurement in Physical Education and Exercise Science*, 14(2), 130–136.
- Jeukendrup, A. E., & Martin, J. (2001). Improving cycling performance. *Sports Medicine*, 31(7), 559–569.
- Kyle, C., & Weaver, M. (2004). Aerodynamics of human-powered vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 218(3), 141–154.
- Kyle, C. R., & Burke, E. (1984). Improving the racing bicycle. *Mechanical Engineering*, 106(9), 34–45.
- Malizia, F., & Blocken, B. (2020). Bicycle aerodynamics: History, state-of-the-art and future perspectives. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 200, 104134.
- Martin, J. C., Gardner, A. S., Barras, M., & Martin, D. T. (2006). Modeling sprint cycling using field-derived parameters and forward integration. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 38(3), 592–597.
- 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 of Applied Biomechanics*, 14(3), 276–291.

- McArdle, W. D., Katch, F. I., & Katch, V. L. (2010). *Exercise physiology: nutrition, energy, and human performance*: Lippincott Williams & Wilkins.
- Merkes, P. F., Menaspà, P., & Abbiss, C. R. (2019). Reducing aerodynamic drag by adopting a novel road-cycling sprint position. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, *14*(6), 733-738.
- Millet, G., & Candau, R. (2002). Facteurs mécaniques du coût énergétique dans trois locomotions humaines. *Science & Sports*, *17*(4), 166-176.
- Mitchell, D., Strydom, N., Van Graan, C., & Van Der Walt, W. (1971). Human surface area: comparison of the Du Bois formula with direct photometric measurement. *Pflügers Archiv*, *325*(2), 188–190.
- Oggiano, L., Troynikov, O., Konopov, I., Subic, A., & Alam, F. (2009). Aerodynamic behaviour of single sport jersey fabrics with different roughness and cover factors. *Sports Engineering*, *12*(1), 1–12.
- Olds, T. (1998). The mathematics of breaking away and chasing in cycling. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, *77*(6), 492–497.
- Olds, T., & Olive, S. (1999). Methodological considerations in the determination of projected frontal area in cyclists. *Journal of Sports Sciences*, *17*(4), 335–345.
- Olds, T. S., Norton, K., Lowe, E., Olive, S., Reay, F., & Ly, S. (1995). Modeling road-cycling performance. *Journal of Applied Physiology*, *78*(4), 1596–1611.
- Padilla, S., Mujika, I., Angulo, F., & Goiriena, J. J. (2000). Scientific approach to the 1-h cycling world record: a case study. *Journal of Applied Physiology*, *89*(4), 1522–1527.
- Peeters, T., Vleugels, J., Verwulgen, S., & De Bruyne, G. (2019). *The Influence of the Transformation Between Standing and Cycling Position on Upper Body Dimensions*. Paper presented at the International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics.
- Pugh, L. G. C. E. (1970). Oxygen intake in track and treadmill running with observations on the effect of air resistance. *The Journal of physiology*, *207*(3), 823–835.
- Rønnestad, B. R., & Mujika, I. (2014). Optimizing strength training for running and cycling endurance performance: A review. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, *24*(4), 603–612.
- Ryan, R. M., & Deci, E. L. (2000). Intrinsic and extrinsic motivations: Classic definitions and new directions. *Contemporary Educational Psychology*, *25*(1), 54–67.
- Shuter, B., & Aslani, A. (2000). Body surface area: Du bois and Du bois revisited. *European Journal of Applied Physiology*, *82*(3), 250–254.
- Steputo, N. K., Hawley, J. A., Dennis, S. C., & Hopkins, W. G. (1999). Effects of different interval-training programs on cycling time-trial performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *31*, 736–741.

- Swanton, A., Shafat, A., & Anderson, R. (2006). BIOMECHANICAL & PHYSIOLOGICAL CHARACTERISATION OF FOUR CYCLING POSITIONS. Paper presented at the ISBS-Conference Proceedings Archive.
- Underwood, L., & Jermy, M. (2013). Optimal handlebar position for track cyclists. *Sports Engineering*, 16(2), 81–90. doi:10.1007/s12283-013-0111-5
- Wenger, H. A., & Bell, G. J. (1986). The interactions of intensity, frequency and duration of exercise training in altering cardiorespiratory fitness. *Sports Medicine*, 3(5), 346–356.
- Westgarth-Taylor, C., Hawley, J. A., Rickard, S., Myburgh, K. H., Noakes, T. D., & Dennis, S. C. (1997). Metabolic and performance adaptations to interval training in endurance-trained cyclists. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 75(4), 298–304.
- Whitt, F. (1971). A note on the estimation of the energy expenditure of sporting cyclists. *Ergonomics*, 14(3), 419–424.
- Winter, D. A. (2009). *Biomechanics and motor control of human movement*: John Wiley & Sons.
- Valenzuela, P. L., Alcalde, Y., Gil-Cabrera, J., Talavera, E., Lucia, A., & Barranco-Gil, D. (2020). Validity of a novel device for real-time analysis of cyclists' drag area. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 23(4), 421–425.