Optimisation du matériel roulant d'un ensemble coureur/vélo

Thèse CIFRE menée en collaboration avec la société LOOK Cycle, la Fédération Française de Cyclisme et Sciences 2024

Contexte

Dans l'optique des Jeux Olympiques (JO) 2024, plusieurs Grandes Écoles regroupées au sein de « Sciences 2024 », la société française LOOK Cycle et la Fédération Française de Cyclisme (FFC) souhaitent unir leurs efforts au sein d'un projet visant à réduire les résistances s'opposant à l'avancement du cycliste et améliorer la dynamique de l'ensemble roulant dans chaque phase de la compétition.

Ce sujet de thèse CIFRE, centré sur le vélo, s'intègre dans un projet plus global visant à étudier l'ensemble des résistances du couple cycliste/vélo et d'en optimiser le résultat final pour améliorer les temps en compétition.

Introduction

L'aérodynamique a un impact si important dans le cyclisme élite, que cela influence tous les aspects du sport, depuis la forme du vélo, la position du cycliste, la texture de ses vêtements jusqu'à la forme des vélodromes [1].

Une façon d'illustrer cet impact consiste à comparer le record de l'heure établi sur un « vélo UCI » (homologué par l'Union Cycliste Internationale) en avril 2019 par le coureur belge Victor Campenaerts de 55,089 km à celui de Francesco Russo établi sur un HPV (Human Powered Vehicle) en juin 2016 sur 92.432 km (figure 1) [5,9,10].



Figure 1 : Progression du record de l'heure depuis 1887 [1] et comparaison entre le record actuel en vélo (point rouge) et celui en Human Powered Vehicle (HPV, en bleu).

Dans les deux cas, la puissance disponible est celle associée à un athlète élite qui peut être évaluée pour une épreuve d'une heure à $P \cong 380$ W [3,4,9]. Pour les épreuves sur sol plat, cette puissance mécanique est essentiellement dissipée en résistance aérodynamique [1,6] et l'on déduit de cet équilibre la relation entre la puissance et la vitesse, U:

$$U = \left(\frac{2P}{\rho S C_D}\right)^{1/3} \tag{1}$$

où ρ est la densité de l'air, S la surface projetée frontale de l'ensemble vélo/athlète et C_D le coefficient de traînée. En utilisant les valeurs ci-dessus nous déduisons $SC_D \cong 0.19 \text{ m}^2$ pour le vélo UCI et $SC_D \cong 0.037 \text{ m}^2$ pour l'HPV.

Cette analyse classique ne tient pas compte des virages qui jouent pourtant un rôle majeur dans les vélodromes. Dans le cas du vélodrome national de Saint-Quentin-en-Yvelines, où se tiendront les JO de Paris 2024 et dont la géométrie est présentée sur la figure 2, la longueur de la piste au niveau de la côte azure est de 250 m qui se répartissent pour moitié en ligne droite et pour moitié en virage relevé à 45°. Ces caractéristiques géométriques ont un impact sur la mécanique et l'aérodynamique, puisque dans les virages la vitesse de l'athlète est différente de la vitesse du vélo. Elles impliquent aussi que la configuration du vélo n'est plus entièrement symétrique, le guidon étant légèrement tourné.

Le but de cette thèse CIFRE menée en collaboration entre deux laboratoires du CNRS, la société LOOK Cycle et la FFC est d'optimiser la vitesse d'un ensemble coureur/vélo en prenant en compte la géométrie spécifique des vélodromes. Ce but sera poursuivi suivant trois axes différents que nous détaillons ci-dessous et pour lesquels nous fixons un échéancier.



Figure 2 : Géométrie du Vélodrome National de Saint-Quentin-en-Yvelines.

Axe 1 – Analyse des effets de la géométrie de l'ensemble coureur/vélo sur la traînée

L'équation (1) reliant la vitesse à la puissance du coureur montre que l'optimisation de la vitesse à puissance fixée peut se faire via la densité de l'air (ρ), la surface frontale (S) ou encore l'aérodynamique (C_D). La densité est en général utilisée en allant dans des vélodromes situés en altitude. Le record de Victor Campenaerts a été établi au vélodrome d'Aguascalientes (Mexique) qui est à 1890 m. L'utilisation de dépressions météorologiques est aussi possible.

Ces conditions extérieures étant fixées, le cycliste peut encore utiliser les deux paramètres S et C_D pour maximiser sa vitesse. Plusieurs études, dont celle de Lukes et al. [7], montrent que la réduction de la surface frontale S est un moyen efficace de réduire la traînée. Les règles imposées par l'Union Cycliste Internationale réduisent cependant les marges de manœuvre (par exemple, la position couchée est interdite). Cela signifie que les gains futurs doivent résulter de réductions à la fois de la surface frontale, dans la limite des règles UCI [13], et du coefficient de traînée.



Figure 3 : Position du mannequin, équipement et géométrie d'un coureur dans une position « contre la montre », d'après [2].

Comme le montre la figure 3, il existe de nombreux paramètres associés à la géométrie de l'ensemble roulant coureur/vélo, qui affectent à différents niveaux le produit SC_D [8,11]. Le but de cette première partie sera d'identifier les paramètres les plus influents pour réduire ce produit. Cela se fera en analysant les différentes stratégies d'optimisation de la vitesse appliquée dans le passé et en vérifiant que les paramètres identifiés dans la littérature [1] sont effectivement retrouvés en soufflerie et validés sur le vélodrome en prenant en compte les effets de virage.

Axe 2 – Recherche d'un optimum mécanique

Lors des Jeux Olympiques de Rio en 2016, l'équipe américaine a couru avec des vélos Felt, dont le système de transmission (plateaux avant et arrière plus chaine) était à gauche, contrairement à la tradition qui veut que cela soit à droite (figure 4).



Figure 4 : Vélo Felt TA TRD développé pour l'équipe USA aux JO de Rio. Photo issue de [12].

Ce choix n'affecte pas l'aérodynamique, mais il peut s'expliquer de la façon suivante : dans un vélodrome, les coureurs roulent systématiquement dans le sens antihoraire. Positionner la transmission à gauche revient donc à déplacer le centre de masse vers l'intérieur du virage. A force fixée, la vitesse du centre de masse en régime permanent est constante. Dans le virage cela impliquera que le vélo devra aller plus vite, de façon à satisfaire la conservation du moment cinétique.

D'une façon plus générale, cet exemple montre que la répartition des masses dans le système coureur/vélo a un impact sur la dynamique.

Le but de cette seconde partie sera d'identifier un optimum dans la répartition des masses.

Pour cela, des expériences modèles seront développées en laboratoire puis testées sur le vélodrome.

Dans l'ensemble de cette étude, nous veillerons à ce que les contraintes de rigidité du cadre, qui sont indispensables à la transmission des efforts, ne soient pas mises en défauts par les changements proposés.

Axe 3 – Recherche d'un optimum aérodynamique

En utilisant un mannequin en position symétrique de contre la montre, Crouch et al. [2] ont étudié la relation entre la topologie de l'écoulement et la variation de la traînée au cours d'une rotation de pédale. Un résumé de leur recherche est présenté sur la figure 5. La traînée minimale (bleue) est associée à des structures tourbillonnaires réduites et corotatives (b) tandis que la friction maximale (rouge) est associée à des structures tourbillonnaires plus nombreuses et contra-rotatives.



Figure 5 : (a) Variation du produit SC_D (axe de gauche) et de l'aire frontale S (axe de droite) en fonction de l'angle de rotation θ du pédalier. (b) et (c) : Topologies de l'écoulement et du système tourbillonnaire pour les configurations à faible et forte trainée (points bleu et rouge dans (a)).

Il ressort de ces études que le nombre de structures tourbillonnaires et leur topologie influencent la traînée globale de l'ensemble coureur/vélo dans l'air.

Le but de cette dernière partie consistera à étudier comment la géométrie du vélo et la position du cycliste peuvent affecter les structures observées dans l'écoulement associé au déplacement de l'ensemble coureur/vélo dans la géométrie du vélodrome. Les résultats du bilan et de l'analyse effectués dans l'Axe 1 pourront donner des pistes pour identifier des modifications susceptibles de générer des configurations tourbillonnaires à faible traînée.

Là encore, des expériences modèles seront développées en laboratoire avant d'être testées sur le vélodrome.

Comme pour l'axe 2, nous veillerons à ce que les contraintes de rigidité du cadre indispensables à la transmission des efforts ne soient pas mises en défauts par les changements proposés.

Note Importante : Les enjeux d'image publique et industriels des produits de compétitions pour les Jeux Olympique requièrent un degré de confidentialité très élevé. Le doctorant sera garant des études qu'il gère et diffuse, et s'assurera que les entités qui collaborent ne soient pas lésées par un manque de confidentialité.

Échéancier

Le doctorant interagira avec l'ensemble des partenaires impliqués dans cette thèse, de façon à répondre efficacement à la question de l'optimisation du matériel roulant d'un ensemble coureur/vélo dans un vélodrome. Dans l'échéancier ci-dessous on note **FFC** quand les interactions se feront avec la Fédération Française de Cyclisme, **LOOK** quand elles se feront avec LOOK Cycle et **Labo** quand elles seront avec les laboratoires CNRS.

A ce stade il est important de souligner qu'en prenant en compte les règles de l'UCI et les contraintes de fabrication industrielle la date limite pour un nouveau design est mai 2022.

Année 1

FFC + Labo : Étude bibliographique et comparaison aux essais en soufflerie pour l'identification de paramètres clefs influençant le produit SC_D – [Axe 1] (2 mois)

LOOK : Début de l'étude sur la répartition des masses – [Axe 2] (3 mois)

LOOK + Labo : Fin de l'étude sur la répartition des masses – [Axe 2] (5 mois)

FFC + LOOK + Labo : essais et validation au vélodrome des idées développées sur la répartition des masses – [Axe 2] (1 mois)

Labo : Rédaction d'articles et de documents de recommandation techniques à destination de LOOK des, entraineurs et des coureurs concernant la répartition des masses. [Axe 1 et 2] (1 mois)

Année 2

LOOK + Labo : Début de l'étude sur l'aérodynamique du virage - [Axe 3] (8 mois)

FFC + LOOK + Labo : essais et validation au vélodrome des idées développées sur l'aérodyna-mique du virage – [Axe 3] (3 mois)

Labo : Rédaction d'articles et de documents de recommandation techniques à destination de LOOK, des entraineurs et des coureurs concernant la répartition des masses. [Axe 3] (1 mois)

Année 3

LOOK + Labo : Fin de l'étude sur l'aérodynamique du virage. [Axe 3] (4 mois)

FFC + LOOK + Labo : Essais et validation au vélodrome des idées développées sur l'aérodyna-mique du virage – [Axe 3] (2 mois).

Labo : Rédaction d'articles et de documents de recommandation techniques à destination des entraineurs et des coureurs concernant l'aérodynamique du virage. [Axe 3] (2 mois)

Rédaction de la thèse (4 mois)

Bibliographie

- [1] Crouch, T. N., Burton, D., LaBry, Z. A., Blair, K. B. : Riding against the wind: a review of competition cycling aerodynamics. *Sports Eng.* **20**, 81-110 (2017)
- [2] Crouch, T. N., Burton, D., Brown, N. A. T., Thompson, M. C., Sheridan, J. : Flow topology in the wake of a cyclist and its effect on aerodynamic drag. *J. Fluid Mech.* **748**, 5-35 (2014)
- [3] Wilkie, D. R. : Man as a source of mechanical power. *Ergonomics* **3**, 1-8 (1960)
- [4] Pinot, J., Grappe, F. : The 'Power Profile' for determining the physical capacities of a cyclist, *Comput. Methods Biomech. Biomed. Eng.* **13** (S1), 103-104 (2010)
- [5] Gross, A. C., Kyle, C. R., Malewicki, D. J. : The aerodynamics of human-powered land vehicles. *Sci. Am.* **249**, 142-152 (1983)
- [6] Martin, J. C., Milliken, D. L., Cobb, J. E., McFadden, K. L., Coggan, A.,R. : Validation of a mathematical model for road cycling power. *J. Appl. Biomech.* **14**, 276-291 (1998)
- [7] Lukes, R. A., Chin, S. B., Haake, S. J.: The understanding and development of cycling aerodynamics. *Sports Eng.* **8**, 59-74 (2005)
- [8] Underwood, L., Schumacher, J., Burette-Pommay, J., Jermy, M. : Aerodynamic drag and biomechanical power of a track cyclist as a function of shoulder and torso angles. *Sports Eng.* 14, 147–154 (2011)
- [9] Kyle, C. R., Weaver, M. D.: Aerodynamics of human-powered vehicles. *Proc. Instn Mech. Engrs, Part A: J. Power and Energy* **218**, 141–154 (2004)
- [10] Laimon, A. L., Namasivayam, S. N., Hosseini Fouladi, M.: The development of an optimal aerodynamic design for a human powered vehicle. *Iran J. Sci. Technol. Trans. Mech. Eng.* https://doi.org/10.1007/s40997-018-0196-3, 2018.
- [11] Chowdhury, H., Alam, F. : An experimental study on aerodynamic performance of time trial bicycle helmets. *Sports Eng.* **17**, 165-170 (2014)
- [12] Arthur, D. : Felt's new Olympic track bike spot the deliberate mistake. <u>https://road.cc/</u> <u>content/tech-news/190619-felts-new-olympic-track-bike-spot-deliberate-mistake</u> (2016)
- [13] UCI Réglements https://www.uci.org/inside-uci/constitutions-regulations/regulations