

RéflexionsSport

Scientifique & technique

21
Novembre
2018

EXTRAIT

Fendre
l'air de la
performance



Fendre l'air de la performance



Par Emmanuel Brunet
Responsable Recherche et Performance à la
Fédération française de cyclisme (FFC)

L'aérodynamisme relève un enjeu majeur dans le cyclisme au plus haut niveau. Consciente de cette donnée, la Fédération française de cyclisme a étudié les impacts de chaque élément du corps selon leur placement afin d'optimiser au mieux la position des coureurs tricolores.



“... certains records cyclistes sont davantage battus en altitude qu’au niveau de la mer.”

L'image tient de l'anachronisme. Alors qu'il vient d'en finir avec l'ascension du col de Peyresourde, Christopher Froome se jette dans la descente vers Bagnères-de-Luchon et surprend ses adversaires. Plus que l'audace, qui lui a permis de remporter cette 8^e étape de la Grande Boucle 2016, c'est la technique en descente du Britannique qui étonne. Dans un souci d'aérodynamisme, il s'est assis à l'avant de son cadre, le buste penché sur le guidon, tout en continuant à mouliner avec ses jambes. Peu conventionnelle mais visiblement efficace. Le grand théâtre de juillet en a l'habitude et nous fournit régulièrement de nouveaux cas insolites dont le champ de la dynamique des fluides pourra expliquer et mettre en avant l'ingéniosité (ex : utilisation du guidon de triathlon par LeMond en 1989). Après la stratégie de Froome en descente, quelle sera la prochaine nouveauté ? Avant de pouvoir maîtriser ces techniques de rupture, il est souhaitable de bien expliquer les bases de certains principes physiques pour ensuite comprendre certaines finesses de l'aérodynamisme.

Aérodynamisme, une histoire de résistances ■

Pour se déplacer, le cycliste produit de la force, non proportionnelle à la vitesse de déplacement (di Prampero *et al.* 1979). Appliquée sur les pédales, elle lui permet d'avancer malgré différentes résistances. On en distingue 5 (Martin *et al.* 1998) :

1. La résistance aérodynamique (R_a) due au déplacement du coureur dans l'air ainsi qu'à la rotation des roues ;
2. La résistance au roulement due au contact des pneumatiques sur le sol ;
3. La résistance de friction de l'ensemble des pièces mécaniques en mouvement (roulements) ;
4. La résistance de gravité nécessaire pour vaincre la gravité lorsque le cycliste grimpe ou descend ;
5. La résistance due aux accélérations ou décélérations.

Sur terrain plat, la résistance la plus importante contre laquelle le cycliste doit lutter pour avancer est la résistance aérodynamique (Candau *et al.* 1999). À plus de 40 km/h, 80 à 90 % de la puissance totale est utilisée pour vaincre cette contrainte (Kyle, 1979). Compte tenu des vitesses de déplacement des cyclistes au haut-niveau, l'étude et la réduction de cette résistance s'avèrent ainsi être un enjeu ►



©Icon sport

crucial de la performance. Lorsque nous la décomposons, nous pouvons estimer qu'environ 2/3 de cette résistance est imputable au cycliste et 1/3 au vélo (Oggiano *et al.* 2008 ; Blocken *et al.* 2013). La résistance aérodynamique dépend de plusieurs facteurs qui sont repris dans l'équation suivante (Grappe *et al.* 1997) :

$$R_a = \frac{1}{2} \rho S C_x V^2$$

ρ correspond à la masse volumique de l'air. Elle dépend de la pression barométrique, de la température et de l'hygrométrie¹. Lorsque la pression et l'hygrométrie augmentent, ρ augmente. De même quand la température d'immersion, ρ augmente. Par conséquent, la résistance aérodynamique augmente. En altitude, la pression diminue. Cela explique pourquoi certains records cyclistes sont davantage battus en altitude qu'au niveau de la mer.

SC_x correspond au produit entre la surface frontale (S) et le coefficient de traînée (C_x). SC_x désigne la traînée

aérodynamique et constitue l'objet des convoitises de toutes les études relatives à l'aérodynamisme. S se mesure en mètres et C_x est un coefficient sans unité.

V correspond à la vitesse d'écoulement du fluide, soit la vitesse de déplacement en absence de vent. Lorsqu'il y a du vent, on admet que V est égal à la vitesse de déplacement moins la composante s'opposant au sens opposé du déplacement provoqué par la force éolienne.

D'après le modèle de Martin *et al.* (1998), si nous considérons des vitesses constantes, nous pouvons estimer quel impact la variation de traînée aérodynamique (SC_x) peut avoir sur les performances des cyclistes de haut niveau. Nous pouvons distinguer 4 cas où les épreuves chronométrées, sur piste, se déroulent dans des conditions standardisées :

- **Les sprint hommes** (vitesse par équipes ou le 200 m lancé – épreuve qualificative du tournoi de vitesse). Aux Jeux olympiques de Rio 2016, le Britannique Jason Kenny a battu le record du 200 m lancé en

¹ Partie de la météorologie qui étudie la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air.

9,551 s, soit une vitesse moyenne de 75,38 km/h. Ici, une variation de SC_x^2 de 2 % engendrerait une variation de 0,06 s sur la performance en 200 m ou 0,15 s en vitesse par équipes (si l'on considère uniquement les 2 derniers relayeurs). Ces écarts correspondent en moyenne à 2 places sur 200 m aux Jeux olympiques et l'écart entre 1^{er}-2^e ou 3^e-4^e lors des finales de vitesse par équipe.

- **Le sprint femmes** avec les mêmes épreuves. À Rio, le meilleur temps était de 10,721 s (les filles ne sont pas moins aérodynamiques, mais produisent des puissances plus faibles). La même variation de SC_x engendrerait une variation de 0,08 s sur 200 m et 0,010 s en vitesse par équipe (en ne considérant que la dernière relayeuse).

- **La poursuite hommes** (individuelle ou par équipes). La position en poursuite étant légèrement différente, la traînée aérodynamique est un peu plus faible. Lors des phases qualificatives de la poursuite olympique aux JO de Rio 2016, le temps moyen au tour (250 m) de la meilleure équipe correspondait à 14,082 s, soit une vitesse moyenne de 63,91 km/h. Une variation de SC_x de 2,5 % engendrerait une variation de la performance de l'ordre de 0,11 s au tour, soit 1,64 s sur l'ensemble d'une poursuite (en occultant le 1^{er} tour dans le modèle). Comme pour la vitesse par équipes, lors des finales, cet écart permet de changer la couleur d'une médaille.

- **La poursuite femmes** avec les mêmes épreuves. Lors des qualifications à Rio en 2016, le temps moyen au tour de la meilleure équipe était de l'ordre de 15,416 s, soit 58,38 km/h en moyenne. Une variation de SC_x de 2,5 % engendrerait une variation d'environ 0,13 s au tour, soit 1,89 s sur l'ensemble d'une poursuite.

Différentes méthodes existent pour étudier la résistance aérodynamique (Bouillod *et al.* 2016b). À commencer par la soufflerie. Prisée du monde cycliste (piste et route confondues), elle fut à l'origine investie par l'aviation afin d'étudier la possibilité de voler et ensuite par l'automobile. Ces deux mondes ont ainsi permis au cyclisme de s'appuyer sur de nombreux travaux (Grappe, 2009). Encore aujourd'hui, la soufflerie est présentée comme la méthode la plus précise (Gilbertini *et al.* 2010). Elle n'est toutefois pas la seule à interroger la résistance aérodynamique. On citera ainsi la simulation numérique (Bouillod *et al.* 2016b), la technique de décélération (Candau *et al.* 1999), le test de résistance à la traction (di Prampero *et al.* 1979) ou encore la mesure incrémentale sur le terrain (Grappe *et al.* 1997, Garcia Lopez *et al.* 2013, Bouillod *et al.* 2016b) s'inspirant du modèle d'une épreuve d'effort pour mesurer la puissance maximale aérobie et la consommation maximale d'oxygène. ►

2— Les variations de SC_x proposées ici correspondent à une valeur absolue de 0,005 m²

Deux positions en question ■

Depuis 2015, nous avons mené un projet ambitieux d'étude de la traînée aérodynamique (SC_x) en soufflerie et sur le terrain avec plus de 80 cyclistes de haut-niveau, soutenu par l'INSEP, dans l'objectif de performer aux Jeux olympiques. De nos observations, nous avons fait émerger deux positions typiques :

1 La position « chrono »



©P. Pichon pour FFC

Grâce à l'utilisation de prolongateurs sur lesquels ils placent leurs mains et leurs coudes, les coureurs des différentes disciplines chronométrées (contre-la-montre sur route, poursuite sur piste, kilomètre...), adoptent une position profilée avec le dos abaissé. Celle-ci permet généralement d'enregistrer la traînée aérodynamique la plus basse (Defraeye *et al.* 2010) ;

2 La position « sprint »



©P. Pichon pour FFC

Surtout utilisée par les spécialistes de la vitesse sur piste, avec un guidon appelé « traditionnel », elle est différente de ce que l'on retrouve généralement dans la littérature (Defraeye *et al.* 2010) car elle implique déjà des stratégies aérodynamiques. Defraeye *et al.* (2010) évoquent les positions « upright » ou « dropped ». Dans la position « sprint », le buste y est plus incliné et les bras fléchis.

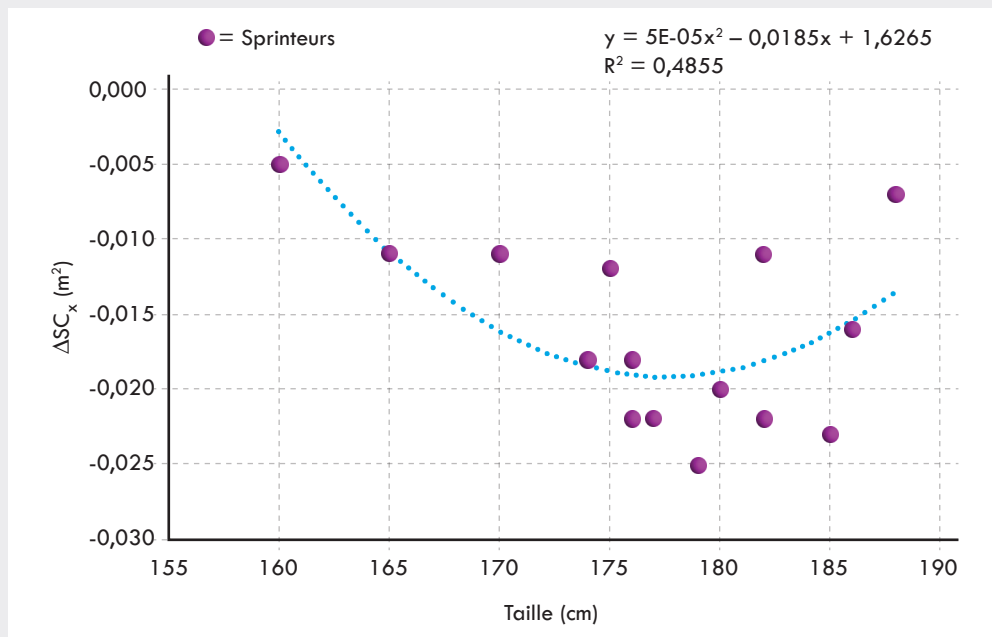


Figure 1 – Relation entre la taille du cycliste pour 15 sprinteurs et les perspectives de diminution de la traînée aérodynamique après étude de la position en soufflerie.

“... il pourrait s'avérer intéressant d'utiliser des positions légèrement redressées si celles-ci n'affectent pas la traînée aérodynamique.”

À l'issue d'une séance en soufflerie, les perspectives pour optimiser la position sur le plan aérodynamique sont apparues plus importantes pour les sprinteurs que pour les poursuivants. En effet, les propositions d'optimisation de la position d'un sprinteur s'appuient sur une diminution de la traînée aérodynamique de $0,016 m^2$, soit -7 %. Les perspectives les plus faibles sont de $0,005 m^2$ et les plus importantes de $0,025 m^2$ pour cette population. Pour les « chronos », la moyenne atteint $0,009 m^2$, soit -4,5 %. Les perspectives les plus faibles sont nulles et les plus importantes de $0,030 m^2$. Il ►

y a plus de variabilité dans la position chrono. Comment s'expliquent ces tendances ?

Tout d'abord, la position « sprint » initiale, c'est-à-dire celle que l'athlète utilise pour sprinter. Dans cette position, nous remarquons que la traînée aérodynamique est fortement corrélée au poids de l'athlète ($r^2 = 0,775$) puis à l'aire frontale projetée, d'après la méthode de Faria *et al.* (2005). En d'autres termes, plus l'athlète est lourd, plus sa position risque de « traîner » (on évoque ce terme pour dire que son SC_x augmente). Les perspectives d'optimisation de la position ne dépendent cependant pas de ce facteur. Au cours de nos études, nous avons pu établir une relation hyperbolique entre la perspective de diminution de la traînée aérodynamique et la taille pour cette position spécifique « sprint ». Ainsi, plus on serait grand, plus on trouverait des solutions pour diminuer la résistance aérodynamique due à sa position. En théorie ; car si les coureurs mesurant 175 à 180 cm semblent être les plus avantageés, au-delà de 180 cm, les bénéfices diminuent.

Concernant la position « chrono », les relations apparaissent moins évidentes. Comme pour les sprinteurs, nous remarquons que la traînée aérodynamique de la position initiale est corrélée au poids de l'athlète et à l'aire frontale projetée. Toutefois, nous ne trouvons pas d'explication dans les

critères morphologiques pour avoir des perspectives d'optimisation. En effet, si une optimisation semble possible pour des sportifs en cours de développement et n'ayant pas encore travaillé leur installation sur leur vélo, pour les athlètes élites expérimentés, la marge est plus réduite car le travail sur la position dite « aéro » est ancré et évolue avec le matériel.

De la tête aux mains, de multiples variables à ajuster

La façon de se tenir sur le vélo impacte grandement l'aérodynamisme du coureur. Dans la position « chrono », nous avons observé que l'inclinaison du buste était un facteur important mais très délicat. La règle selon laquelle plus il est bas, plus la traînée aérodynamique est réduite (Cappelli *et al.* 1993) ne s'est pas toujours vérifiée. En effet, si globalement, abaisser le buste permet une réduction de la traînée de 3 %, le relever ne modifie généralement pas la traînée aérodynamique d'après nos études. Dorel *et al.* (2009) ont mis en évidence qu'une position trop inclinée pouvait même affecter le pédalage, notamment dans la phase de remontée de la pédale. De ce fait, il pourrait s'avérer intéressant d'utiliser des positions légèrement redressées si celles-ci n'affectent pas la traînée aérodynamique. Cette tendance est d'autant ►

plus importante qu'elle peut influencer la souplesse globale du cycliste sur sa machine.

Par ailleurs, nous avons pu remarquer que les stratégies de position de la tête, avec un casque dit «aéro», pouvaient augmenter la traînée aérodynamique de 5 % lorsque la tête est relevée et donc placée sans aucune attention (si ce n'est celle de regarder au loin !). À l'inverse, la stratégie «tortue», qui consiste à rapprocher les oreilles des épaules, permet de réduire la traînée aérodynamique de 3 %. Cette variable a autant d'impact qu'abaissent son buste. Or, il convient de comprendre que la position qu'adopte le cycliste est une résultante de l'ensemble des facteurs. S'il s'abaisse trop, il éprouvera des difficultés à cumuler d'autres stratégies. En conclusion, il serait préférable de se redresser un peu et d'adopter une stratégie performante au niveau de la tête.

La position des bras, elle, peine à faire consensus chez les scientifiques. D'une manière générale, écarter davantage les bras par rapport à la position initiale augmente de 2 % la traînée aérodynamique. Les resserrer la diminue de 1,5 %. On pourrait ainsi formuler la consigne de resserrer les bras, en réglant les accoudoirs et prolongateurs le plus près du centre. Cependant, cela n'a d'intérêt que si la stratégie de tête n'est pas affectée négativement. On remarque souvent que l'écartement des bras est une



condition pour adopter une bonne stratégie de tête. La règle la plus commune pour qui veut se «poser» correctement serait de dire que les bras doivent être placés au maximum dans l'axe des genoux (jamais à l'extérieur). Il convient également de prendre le temps de vérifier en situation réelle la stabilité que cette position permet. Lors d'une étude, nous avons pu récolter des données contradictoires entre la soufflerie et le terrain (Bouillod *et al.* 2015). Par ailleurs, nous avons pu contrôler plusieurs fois l'effet de l'orientation des avant-bras et le placement des mains sur les prolongateurs. Le fait de relever légèrement les bras permet de diminuer la traînée d'environ 1,5 %. Redresser davantage tend à l'augmenter comme le fait de placer les avant-bras vers le bas (+0,5 %). Cette tendance va dans le sens des conclusions de Fintelman *et al.* (2015) qui mentionnaient la réduction de la distance tête/mains comme facteur ►



© Jean Sport

sensible de réduction de la traînée aérodynamique.

Les positions des mains sur les prolongateurs peuvent également avoir des impacts sensibles. Globalement, il convient d'aller chercher le plus loin possible les prolongateurs pour un gain estimé à 3 %. À l'inverse, raccourcir sa position a des effets négatifs (+ 0,5 %). Le placement des mains sur les prolongateurs n'est pas neutre. Si une prise en main totalement verticale a un effet positif, nous avons surtout pu remarquer qu'une position légèrement différente avec un rapprochement des mains, et des prolongateurs se courbant vers l'intérieur à l'horizontale, diminuait la traînée aérodynamique de 2 % par rapport à une prise en mains traditionnelle. Ces tendances sont toutefois très singulières et nécessitent une approche individualisée. Elles remettent néanmoins en question l'utilisation de matériels génériques fournis par les équipementiers sans

réglage possible pour une approche du haut-niveau. Le réglage de la position a plus d'incidence sur la traînée aérodynamique que la qualité du matériel. L'enjeu des équipementiers pour la performance est donc de proposer des guidons « chrono » permettant de bien adapter sa position en fonction de ces diverses observations : écartement des bras, orientation des avant-bras, position des mains.

“ ... écarter davantage les bras par rapport à la position initiale augmente de 2 % la traînée aérodynamique. ”

Le cas particulier du « sprint »

Ces tendances observées en chrono peuvent inspirer les positions de sprint qui sont peu relatées dans la littérature. En effet, si beaucoup ont étudié la position « chrono », la comparant parfois à des positions relevées (Grappe *et al.* 1997 ; Martin *et al.* 1998 ; Candau *et al.* 1999 ; Garcia-López *et al.* 2013 ; Defraeye *et al.* 2010...), la position de ►

sprint est, elle, très spécifique et peut être « aéro », en appliquant certaines règles. À la lumière du travail effectué avec des sprinteurs de niveau international, nous avons constaté que l'inclinaison du buste était un facteur très sensible à la résistance aérodynamique. Par rapport à la position librement choisie par le cycliste, nous avons constaté qu'un léger redressement augmentait la traînée de 2,7 % et qu'un léger abaissement la diminuait de 1,9 %. Si ce facteur n'était pas contrôlé, la traînée pouvait augmenter jusqu'à 10 %. L'écartement des coudes avait également un impact certain. Un léger écartement et la traînée aérodynamique augmentait de 3,1 %. Cela montait à 8 % si on les écartait plus franchement (soit presque autant que relever son buste !) tandis que les resserrer légèrement la diminuait de 3,1 %. Il ne suffit donc pas de se baisser pour être aéro en sprint !

Grappe *et al.* (1997) avaient montré l'impact de la position employée par Graeme Obree lors du record de l'heure (battu en 1993 et 1994) et notamment les conséquences de l'orientation des bras dans la réduction de la traînée aérodynamique. Dans cette optique, nous avons prolongé ce travail en nous concentrant sur les effets de l'allongement de la position en sprint, à travers l'analyse de coureurs d'omnium, épreuve combinant sprints et poursuite, mais aussi quelques spécialistes du kilomètre

avec une position « chrono ». Chaque sprinteur s'est livré à une étude permettant de faire varier l'allongement de sa potence et de mesurer la traînée aérodynamique en conséquence. Ces études ont été réalisées soit en figeant l'inclinaison du buste, soit en laissant totalement libre la position du cycliste. Dans les deux cas, nous avons pu en conclure qu'allonger la position tendait à diminuer la traînée aérodynamique. De manière globale, 1 cm plus long équivaut à réduire la traînée de 0,5 %. Cette tendance a eu un effet collatéral positif concernant la position de la tête. Comme pour la position chrono, en sprint, relever la tête est pénalisant et augmente généralement la traînée de 2 %. Or avec une position allongée, la stratégie « tortue » s'en trouve facilitée et permet une diminution de la traînée de 3,7 %.

“ Dans les années qui ont suivi, nous avons vu évoluer de nombreux matériels (vélos, guidons, roues, combinaisons, casques...). ”

Au-delà des gains ou non offerts par chaque option, cette étude a permis de définir avec notre équipementier les évolutions nécessaires des dimensions des cadres utilisés par les sprinteurs de l'équipe de France. Des évolutions qui devraient permettre aux athlètes de plus d'un 1,80m d'améliorer leurs performances grâce de meilleures perspectives d'optimisation aérodynamique.

Un matériel loin d'être anodin

Si la position est le facteur primordial pour diminuer la traînée aérodynamique, il existe de nombreux déterminants matériels à bien appréhender en second lieu. Dans leur étude publiée en 1984, Kyle et Burke avaient souligné cet aspect en évoquant l'éventualité de diminuer la

surface frontale, profiler les formes et jouer sur la texture des vêtements. Dans les années qui ont suivi, nous avons vu évoluer de nombreux matériels (vélos, guidons, roues, combinaisons, casques...). Plusieurs auteurs et équipementiers ont ainsi mis en avant les caractéristiques de certains casques pour réduire la traînée aérodynamique. Chabroux (2010) a montré qu'il existait une forte interaction entre la posture du cycliste et le choix du casque utilisé (ex : présence d'une visière), pour réduire cette traînée. Si la particularité des géométries de chaque casque ainsi que la singularité de chaque position de cycliste limitent les conclusions définitives (Crouch *et al.* 2017), certaines caractéristiques comme la géométrie, la visière, le placement des aérations sont intéressantes. L'étude menée a notamment permis de mettre en évidence qu'en sprint, il convenait d'utiliser des casques dits « aérodynamiques »,



c'est-à-dire avec peu ou pas d'aération et avec une pointe vers l'arrière, pour une réduction de la traînée (-3,7%). Avec nos observations, nous avons pu distinguer trois formes globales de casques (Cf. Figure 2) :

Pour ces 3 catégories, nous avons comparé 4 positions de tête pour les 2 groupes (chrono et sprint) :

1. **Position relevée**. La tête est placée au-dessus de la ligne prolongeant

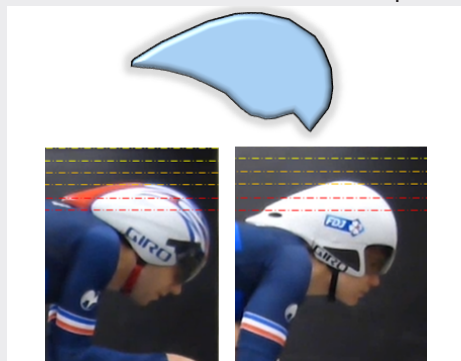
l'inclinaison du buste. Le regard est orienté loin vers l'avant ;

2. **Position baissée**. Le cou est fléchi et le regard orienté vers l'axe de la roue avant ;

3. **Position de référence**. La tête est placée dans l'axe de la ligne prolongeant l'inclinaison du buste et le regard légèrement vers l'avant ;

4. **Position « tortue »**. À partir de la position précédente, le cycliste cherche ►

1 Casques aérodynamiques avec pointe

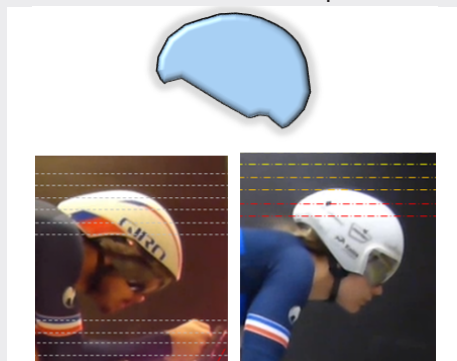


Sprint $SC_x = 0,216 \text{ m}^2 \pm 0,021$
N = 12 $\searrow 0,006 \text{ m}^2 \pm 0,004$ (- 2,5 %)

Chrono $SC_x = 0,189 \text{ m}^2 \pm 0,014$
N = 10

Le casque aérodynamique, comportant peu d'aérations et une longue pointe vers l'arrière. Ce casque couvre généralement les oreilles, en étant le plus fin possible. Les modèles récents comportent une visière.

2 Casques aérodynamiques à pointe courte



Sprint $SC_x = 0,215 \text{ m}^2 \pm 0,021$
N = 12 $\searrow 0,008 \text{ m}^2 \pm 0,005$ (- 3,7 %)

Chrono $SC_x = 0,186 \text{ m}^2 \pm 0,014$
N = 10 $\searrow 0,002 \text{ m}^2 \pm 0,001$ (- 1,3 %)

Le casque aérodynamique à pointe courte, comportant également peu d'aérations, avec une pointe très courte, couvrant les oreilles et une visière intégrée.

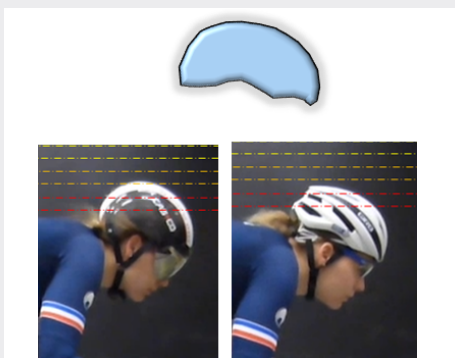
Figure 2 – Comparaison des différentes catégories de casque et variation de SC_x en fonction des stratégies de position de la tête.

à rapprocher ses épaules et ses oreilles, en « rentrant la tête ».

Nous avons donc comparé les valeurs pour l'ensemble et avons pu mettre en évidence l'avantage significatif des deux types de casques « aéros ». Celui à pointe courte est souvent plus intéressant dans la position baissée alors que son pendant avec pointe est souvent plus performant dans les positions de référence ou de « tortue ».

3

Casques traditionnels



Sprint

N = 12

 $SC_x = 0,225 \text{ m}^2 \pm 0,028$

Le casque traditionnel, comportant de très nombreuses aérations, ne recouvrant pas les oreilles. Certains modèles peuvent avoir une visière. On retrouve également dans cette catégorie de casques, des modèles ronds, sans aération, avec visière et recouvrant les oreilles, mais sans pointe arrière.

“ Si la position reste stable, utiliser des casques avec une pointe aérodynamique semble judicieux. ”

Bouillod *et al.* (2016a) ont mis en évidence que lors d'une épreuve chronométrée, la traînée aérodynamique augmentait de 2 % et que cela pouvait, entre autre, s'expliquer par des mouvements plus prononcés de la tête. Si la position reste stable, utiliser des casques avec une pointe aérodynamique semble judicieux. À l'inverse, si le cycliste a tendance à beaucoup bouger sa tête, il est certainement préférable de privilégier l'utilisation de pointes courtes. Globalement, le choix du bon casque dans la position chrono permet de diminuer la traînée aérodynamique de 1,3 %. Ce choix est très individuel et nécessite d'être testé en soufflerie ou sur vélodrome afin d'adapter le bon casque à l'athlète et ses positions durant l'effort.

Des combinaisons testées sur des cylindres

Kyle (1985) avait également évoqué l'utilisation de combinaisons pour influencer sur la traînée aérodynamique. En 2009, Brownlie *et al.* ont mis en ▶

évidence la qualité de la surface des combinaisons pour faire évoluer la traînée aérodynamique. Ils ont notamment mis en avant les zones de séparation du flux d'air au contact des bras et l'influence du textile sur ce facteur. De leur côté, Underwood et Jermy (2011) ont étudié la rugosité textile sur des cylindres (utilisés pour simuler bras et jambes, NDLR) pour réduire la traînée aérodynamique à des allures proches de 71 km/h (vitesse atteinte en compétition, NDLR) et analysé les effets variables. Selon eux, à vitesse élevée, une simple modification de la rugosité du textile de la combinaison peut sensiblement amoindrir la traînée du cycliste. Six ans plus tard, Crouch *et al.* (2017) parlent d'une réduction de 4 % de cette dernière à partir de tests sur 5 combinaisons, prenant en compte les aires de séparation du flux sur le cycliste en comparaison des combinaisons traditionnelles non optimisées.

Ces données scientifiques sont toutefois peu accessibles aux équipementiers. Aussi, nous avons entrepris une caractérisation des textiles à leur disposition. Les tissus ont été placés sur des cylindres et cela a permis de mettre en avant l'impact de chacun. Selon la

“... individualiser le matériel de sorte qu'il réponde aux réglages de chaque cycliste.”

matière du tissu, la traînée aérodynamique peut être réduite jusqu'à 50 %, par rapport à un cylindre lisse. À l'issue de cette expérience, plusieurs patrons ont été réalisés par l'équipementier puis mis à l'épreuve sur des cyclistes de différents profils, en soufflerie et sur piste. D'autres, provenant d'autres équipementiers ont également été comparés. Malgré des combinaisons de taille identique et ajustées, nous avons pu remarquer des écarts de 6 % entre les extrêmes. D'une manière générale, vous pouvez faire varier de 2,9 % la résistance aérodynamique en changeant de combinaison.

Une approche individualisée et humaine

Au-delà de l'habillement, nos travaux ont aussi porté sur l'outil principal du cycliste : son vélo. Nous avons rapidement pu mettre en évidence que les matériels utilisés (roues, cadres...) au haut-niveau étaient très proches d'un point de vue purement aérodynamique. Cependant, les réglages de certaines pièces obligent ►



parfois à dégrader l'aérodynamisme. Comment réduire cela ? Une des solutions serait de pouvoir individualiser le matériel de sorte qu'il réponde aux réglages de chaque cycliste. Car là réside la clé. À matériel équivalent, c'est la position du sportif et sa morphologie qui importent. À ce titre, il a été étudié l'utilisation de guidons s'adaptant aux cyclistes. Souvent, les équipementiers n'ont pas la possibilité de concevoir leur matériel en considérant l'incidence du cycliste. L'intérêt des études en soufflerie avec les coureurs permet d'étudier l'ensemble humain + vélo comme un tout et d'observer des pistes d'optimisation. C'est ainsi que ces concepts de guidon ont été réalisés ici. Partant de la position optimale de chacun, les guidons imaginés devaient permettre de reproduire la même position sans créer de réglage augmentant la traînée (ex : relever une potence). Les techniques additives ont permis cette innovation, selon le processus suivant :

- La forme centrale du guidon devait reprendre des profils très aérodynamiques obligeant ainsi à imaginer des formes et courbes innovantes ;
- L'approche globale avec le cycliste devait permettre d'optimiser le flux au niveau des bras en sachant qu'un guidon cylindrique risque fortement de dégrader le flux d'air ;
- Les dessins proposés devaient s'inspirer de l'aéronautique avec des profils spécifiques ;
- L'impression 3D en frittage de poudre devait permettre de réaliser des prototypes puis des maquettages et essais en soufflerie permettaient d'optimiser les formes sur le plan aérodynamique ;
- L'utilisation d'un scanner 3D permettait ensuite de reproduire la forme optimale, de la redessiner puis de la produire dans une version définitive en aluminium, utilisable par les cyclistes.

Les athlètes olympiques ont bénéficié du projet dès 2016

Initié il y a quelques années, ce projet a déjà eu une application concrète sur le terrain et ses résultats ont pu bénéficier aux représentants tricolores dès les Jeux olympiques de Rio en 2016. Ainsi, chaque sportif envoyé au Brésil avait pu, avant d'être sélectionné, bénéficier d'une à plusieurs études en soufflerie (et parfois également sur vélodrome) de sa position. Chacun a également pu disposer de matériel ou d'équipements validés sur le plan aérodynamique à l'aide des travaux menés (combinaison, casque, guidon...).

Grâce à l'utilisation de ces nouveaux concepts en plus des autres réglages préalables, en moyenne, les sprinteurs pouvaient diminuer leur ►

traînée de 2,3 %, et de 2,1 % en version chrono. Des études ultérieures internes ont pu montrer que la forme des barres avait un impact très sensible, confirmant l'intérêt d'utiliser les techniques additives afin de pouvoir réaliser des formes inspirées de l'aéronautique.

“... les études ont ce défaut d'être parfois déconnectées et ne s'attardent que sur un détail...”

Conclusion

Finalement, ce projet a permis de redéfinir l'ordre dans lequel il convenait d'aborder la réduction de la traînée aérodynamique, à savoir la position, les équipements puis les détails matériels, tout en respectant les règlements de l'Union cycliste internationale (UCI). Différentes perspectives pour les années à venir s'ouvrent pour le cyclisme français :

- Poursuivre l'investigation sur les positions, le facteur le plus sensible ;

- Échanges réguliers avec les équipementiers pour que les tenues et matériels du cycliste permettent d'optimiser la position globale ;
- Améliorer de manière plus précise la qualité des tenues des cyclistes en identifiant très précisément les endroits stratégiques de décollement du flux d'air pour chaque athlète médaillable ;
- Former des entraîneurs de cyclisme aux notions de base en termes d'aérodynamisme pour rendre la mesure plus accessible et s'acculturer à ce champ.

Si ces résultats apportent des clés, il convient de les relativiser quelque peu. En effet, les études ont ce défaut d'être parfois déconnectées et ne s'attardent que sur un détail sans prendre en compte la complexité du mouvement et les interactions entre le corps et la machine mais aussi les membres entre eux (Brownlie *et al.* 2009). Dans son étude réalisée en 2003, Broker s'est attaché à mettre en garde contre les comparaisons faites par les équipementiers et ces travaux scientifiques effectués sans cyclistes dont les conclusions différaient une fois appliquées sur le terrain. Si nos observations bien que réalisées avec le concours d'athlètes n'en demeurent pas moins imparfaites et ne peuvent être prises comme vérité absolue, elles peuvent servir de base de réflexions. ■

Bibliographie

BLOCKEN B, DEFRAEYET, KONINCKXE, CARMELIET J et HESPEL P « CFD simulations of the aerodynamic drag of two drafting cyclists », *Computers & Fluids*, 2013, 71, p. 435-445, doi:10.1016/j.compfluid.2012.11.012.

BOUILLODA, GARBELLOTO L, ACCOP, BRUNETE, SOTO-ROMERO G et GRAPPE F, « The head movements degrade the aerodynamic drag according to the time-trial duration », *J Sci Cycling*, 2016a, 5(2), p. 69-70.

BOUILLODA, OGGIANO L, SOTO-ROMERO G, BRUNETE et GRAPPE F, « Preliminary study: a new method to assess the effective frontal area of cyclists », *4th International Congress on Sport Sciences Research and Technology Support*, 2016b, p. 67-71, doi:10.5220/00061044670071.

BOUILLODA et BRUNETE, « Etude aérodynamique en soufflerie et sur vélodrome d'un cycliste sur piste », Etude interne, Fédération française de cyclisme, 2015.

BROKERJP, « Cycling power: road and mountain », *High-tech cycling: the science of riding faster*, Human Kinetics, Colorado, p. 147-174, 2003.

BROWNLIE L, KYLE C, CARBOJ, DEMAREST N, HARBER E, MACDONALD R et NORDSTROM M, « Streamlining the time trial apparel of cyclists: The Nike Swift Spin project », *Sports Technol*, 2009, 2, p. 53-60, doi:10.1080/19346182.2009.9648499.

CANDAUR, GRAPPE F, MÉNARD M, BARBIER B, MILLET GP, HOFFMAN MD, BELLIER et ROUILLON JD, « Simplified deceleration method for assessment of resistive forces in cycling », *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 1999, 31(10), p. 1441-1447, doi:10.1097/00005768-199910000-00013.

CHABROUX V, « Approche aérodynamique et biomécanique de l'amélioration des performances de cyclistes en course contre la montre », Thèse de doctorat de l'Université Aix-Marseille soutenue le 4 juin 2010, p. 1-127.

CROUCH TL, BURTON D, LABRYZA et BLAIRKB, « Riding against the wind: a review of competition cycling aerodynamics », *Sports Engineering*, 2017, 20(2), p. 81-110.

DEFRAEYET, BLOCKEN B, KONINCKXE, HESPEL et CARMELIET J, « Aerodynamic study of different cyclist positions: CFD analysis and full-scale wind-tunnel tests », *Journal of Biomechanics*, 2010, 43(7), p. 1262-1268, doi:10.1016/j.biomech.2010.01.025.

DIPRAMPERO PE, CORTILLI G, MOGNONI P et SAIBENE F, « Equation of motion of a cyclist », *Journal of Applied Physiology: respiratory, environmental and exercise physiology*, 1979, 47(1), p. 201-206, doi:10.1152/jappl.1979.47.1.201.

DORELS, COUTURIER A et HUG F, « Influence of different racing positions on mechanical and electromyographic patterns during pedalling », *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, Wiley, 2009, 19 (1), p. 44-54, doi:10.1111/j.1600-0838.2007.00765.x.

FARIAEW, PARKER DL et FARIAIE, « The science of cycling: Factors affecting performance – Part 2 », *Sports Medicine*, 2005, 35(4), p. 313-337.

FINTELMAN DM, STERLING M, HEMIDA H, LiFX, « The effect of time trial cycling position on physiological and aerodynamic variables », *J Sports Sci*, 2015, 33(16), p. 1730-1737, doi:10.1080/02640414.2015.1009936.

GARCIA-LÓPEZ J, OGUETA-ALDAYA, LARRAZABAL J et RODRÍGUEZ-MARROYO JA, « The use of velodrome tests to evaluate aerodynamic drag in professional cyclists », *Int J Sports Med*, 2013; 35(5), p. 451-455, doi:10.1055/s-0033-1355352.

GRAPPE F, *Cyclisme et optimisation de la performance: Sciences et méthodologie de l'entraînement (2e édition)*, De Boeck Supérieur, Paris, 2009.

GRAPPE F, CANDAR, BUSO T et ROUILLON JD, « Effect of cycling posture on ventilatory and metabolic variables », *Journal of Sports Medicine*, 1998, 19(8), p. 336-341, doi:10.1055/s-2007-971927.

GRAPPE F, CANDAU R, BELLIA et ROUILLON JD « Aerodynamic drag in field cycling with special reference to the Obree's position », *Ergonomics*, 1997, 40(12), p. 1299-1311, doi:10.1080/001401397187388.

KYLE CR, « Fast fashion: the aerodynamics of bicycle clothing », *Bicycling*, 1985, 26(5), p. 118-124.

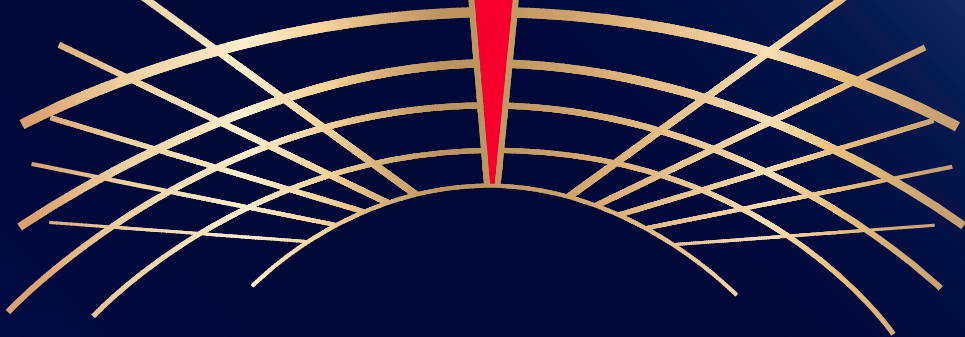
KYLE CR et BURKEER, « Improving the racing bicycle », *Mechanical Engineering*, 1984, 9, p. 34-45.

KYLE CR, « Reduction of Wind Resistance and Power Output of Racing Cyclists and Runners Travelling in Groups », *Ergonomics*, 1979, 22(4), p. 387-397, doi:10.1080/00140137908924623.

MARTIN JC, MILLIKEN DL, COBBJE, MCFADDEN KL et COGGAN AR, « Validation of a mathematical model for road cycling power », *Journal of Applied Biomechanics*, 1998, 14, p. 276-291, doi:10.1123/jab.14.3.276.

OGGIANO L, LEIRDALS, SAETRAN L et ETTEMA G, « Aerodynamic optimization and energy saving of cycling postures for international elite level cyclists », ISEA Conference, Biarritz, 2008, doi:10.1007/978-2-287-09411-8_70.

UNDERWOOD L et JERMY MC, « Fabric testing for cycling skinsuits », *Procedia Engineering*, 2011, 13, p. 350-356, doi:10.1016/j.proeng.2011.05.097.



**INSTITUT NATIONAL DU SPORT,
DE L'EXPERTISE ET DE LA PERFORMANCE**

11, avenue du Tremblay - 75012 Paris- France

Tél. 01 41 74 41 00

www.insep.fr

