

---

# Étude numérique de l'aérodynamisme des casques de contre-la-montre en cyclisme

**Fabien Beaumont<sup>1</sup>, Redha Tair<sup>1</sup>, Guillaume Polidori<sup>1</sup>,  
Hanane Zaidi<sup>2</sup>, Frédéric Grappe<sup>3</sup>**

1. Laboratoire de Thermomécanique GRESPI-EA4694, Université de Reims,  
campus moulin de la housse, Reims, France

{fabien.beaumont, redha.tair, guillaume.polidori} @univ-reims.fr

2. Laboratoire de recherche en Turbulence, Département Mécanique et Ingénierie  
Industrielle, université de Toronto, Toronto, Canada

hanane.zaidi@utoronto.ca

3. EA 4660, laboratoire C3S, unité des sports (U-Sports),  
Université de Franche-Comté, 25000 Besançon, France

[frederic.grappe@univ-fcomte.fr](mailto:frederic.grappe@univ-fcomte.fr)

---

*RÉSUMÉ. La traînée aérodynamique de trois casques de contre-la-montre de formes différentes a été analysée numériquement pour deux positions de tête données. Une méthode numérique par code CFD a été utilisée pour étudier la structure de l'écoulement autour du cycliste pour une vitesse constante de 15 m/s sans vent. Les simulations numériques ont permis d'étudier la traînée aérodynamique de l'ensemble cycliste/casque qui est étroitement liée à la distribution des contraintes de cisaillement et des coefficients de pression. Il est montré que pour une position de tête fixée, la forme du casque en elle-même, a un faible impact sur la performance aérodynamique du cycliste (< 1,5 %). En revanche, en modifiant la position de sa tête, le cycliste modifie significativement sa performance aérodynamique, la différence maximale obtenue entre les deux positions étant de l'ordre de 6,4 %. En effet, les résultats numériques ont montré que la combinaison entre la forme du casque et la position de la tête influence d'une manière significative la force de traînée, la pression et la distribution des contraintes de cisaillement sur le corps du cycliste, en raison de l'évolution du comportement de l'écoulement d'air dans le sillage proche du corps ainsi que dans la localisation des zones de détachement et de rattachement autour de celui-ci.*

*ABSTRACT. The aerodynamic drag of three different time-trial cycling helmets is analyzed numerically from two different cyclist head positions. Computational Fluid Dynamics (CFD) methods were used to investigate the detailed airflow patterns around the cyclist for a constant velocity of 15m/s without wind. CFD simulations were used to study the aerodynamic drag of the cyclist/helmet system which is closely related to the distribution of shear and pressure coefficients. We show that for a given head position, the helmet shape, by itself, has a weak effect on a cyclist's aerodynamic performance (<1.5%). However, by varying head position, a cyclist significantly influences aerodynamic performance, the maximum difference between both positions being about 6.4%. CFD results have also shown that both helmet shape and head position significantly influence drag forces, pressure and*

*wall shear stress distributions on the whole cyclist's body due to the change in the near-wake behavior and in location of corresponding separation and attachment areas around the cyclist.*

*MOTS-CLÉS : computational fluid dynamics (CFD), casque de contre-la-montre, traînée aérodynamique.*

*KEYWORDS: Computational Fluid Dynamics (CFD), time trial helmets, aerodynamic drag.*

---

DOI:10.3166/I2M.16.1-4.33-50 © 2017 Lavoisier

## 1. Introduction

Ces dernières années, l'apport de la science a permis au monde du cyclisme de subir une évolution technologique sans précédent. De nombreuses études ont été menées sur la performance du vélo, le positionnement du cycliste, les combinaisons de course et même la forme du casque, permettant de faire progresser notre compréhension de l'aérodynamique de ce sport.

Des études réalisées par Chabroux *et al.* (2010) et Alam *et al.* (2014) ont montré qu'à une vitesse d'environ 30 km/h, la traînée aérodynamique contribue à hauteur de 70 à 80 % de la résistance totale, le reste étant attribué à la résistance de roulement. En épreuve de contre-la-montre, la position du cycliste sur le vélo a été largement étudiée et une position optimisée permet de réduire la résistance au vent et d'améliorer les performances sportives (Grappe, 2009 ; Blocken *et al.*, 2013 ; Defraeye *et al.*, 2010 ; Defraeye *et al.*, 2011). Le corps du cycliste représente à lui seul environ 65 à 80 % de la traînée aérodynamique totale ; le reste dépend de la forme du casque et du choix de son équipement vestimentaire. La traînée résiduelle est attribuée aux roues (principalement les roues avant), au cadre du vélo ainsi qu'aux autres composants (Chowdhury *et al.*, 2011).

L'un des moyens d'optimiser les performances consiste à modifier la forme des casques utilisés dans les épreuves de contre-la-montre (appelés « casques aéro »). La forme de ces casques varie selon les modèles et les marques, certains d'entre eux ayant une forme allongée avec une jonction entre la tête et le dos du cycliste alors que d'autres présentent une forme plus compacte. L'utilisation de casques aérodynamiques efficaces peut apporter un avantage significatif durant une épreuve de contre-la-montre (Mustary *et al.*, 2014 ; Abdullah *et al.*, 2017).

Le comportement aérodynamique et la performance d'une forme de casque donnée dépendent en grande partie des conditions environnementales de course. Un cycliste doit également considérer le fait que le vélo et lui-même sont indissociables. Dans ce cas, le choix du matériel doit être fait en tenant compte des conditions réelles telles que l'orientation du vent pendant la course. C'est la raison pour laquelle il est important d'étudier le comportement aérodynamique des casques dans des conditions réelles de compétition, là où la position du corps du cycliste change continuellement au cours de la course.

Diverses études expérimentales ont porté sur la performance aérodynamique des casques, qu'ils soient utilisés dans une activité de loisir ou en compétition. Alam *et al.* (2014) ont évalué la performance aérodynamique des casques de course nervurés et Chabroux *et al.* (2008 ; 2012) se sont focalisés sur la performance des casques de contre-la-montre. Alam *et al.* (2010) et Chowdhury et Alam (2012) ont montré que pour des vitesses comprises entre 30 et 40 km/h et selon la forme du casque, celui-ci contribue à hauteur de 2 à 8 % de la traînée aérodynamique totale de l'ensemble coureur/vélo. Certains auteurs ont étudié expérimentalement l'effet du vent sur l'aérodynamisme du coureur (Fintelman *et al.*, 2014) ou encore sur les casques de cyclisme (Brownlie *et al.*, 2010). D'autres travaux ont étudié le confort lié au port de casque en analysant les transferts de chaleur (Brühwiler *et al.*, 2006 ; Brühwiler, 2008) ou en étudiant le processus de ventilation intégré au casque (Ellis *et al.*, 2000).

Une approche alternative utilisée pour les études aérodynamiques en sciences du sport concerne l'approche CFD (*Computational Fluid Dynamics* ou mécanique des fluides numérique). En effet, cette approche s'est beaucoup développée ces dernières années et s'est révélée être un outil puissant et efficace pour simuler des écoulements complexes. La CFD fournit des données de très haute résolution sur le champ d'écoulement autour de l'objet étudié, améliorant ainsi la connaissance de la performance aérodynamique à la fois localement au niveau des parties spécifiques de l'objet étudié ou globalement dans le sillage et autour de celui-ci.

Blocken *et al.* (2013) ont utilisé la méthode CFD pour étudier les effets du drafting en cyclisme (phénomène d'aspiration). Les résultats de leurs calculs CFD se sont montrés en bon accord avec les mesures obtenues en soufflerie, démontrant le grand potentiel des méthodes numériques. Defraeye *et al.* (2010 ; 2011) ont évalué les performances aérodynamiques du cycliste pour différentes positions en utilisant la CFD et des mesures en soufflerie. Abdullah *et al.* (2017) ont utilisé la méthode des éléments finis (FEA) et la CFD afin d'obtenir le meilleur design du casque, les meilleures performances aérodynamiques, tout en garantissant la sécurité de l'utilisateur. Sims et Jenkins (2011) ont également utilisé la méthode CFD pour améliorer la conception aérodynamique des casques de vélo. Cependant, à notre connaissance, peu d'études numériques ont porté sur les performances aérodynamiques des casques de contre-la-montre en cyclisme.

Par conséquent, l'objectif de cette étude numérique est de mieux comprendre le comportement aérodynamique des casques de contre-la-montre dans les conditions réelles de course. Dans cette étude, nous avons étudié trois casques de formes et de marques différentes qui reflètent les tendances actuelles observées lors des épreuves de contre-la-montre. Afin de simuler au mieux les conditions réelles de course, les positions suivantes ont été étudiées :

- une position classique de contre-la-montre pour laquelle le casque est aligné dans le prolongement du dos, appelée position tête relevée (regard horizontal) ;
- une position où la tête est orientée vers le sol pour tester la manière dont le casque s'intègre avec le cycliste, appelée position tête baissée (regard vertical).

De plus, la position propre du cycliste la plus aérodynamique est maintenue constante tout au long de la simulation (Grappe *et al.*, 1997 ; Barry *et al.*, 2014). Cette position est obtenue lorsque le dos du cycliste est parallèle au sol, les deux mains sur les prolongateurs de cintre et les avant bras rapprochés l'un de l'autre, minimisant la surface frontale. Ainsi, les changements interviennent uniquement au niveau du casque et de la position de la tête afin de déterminer leurs effets respectifs sur le comportement aérodynamique global. Les simulations ont été effectuées pour une vitesse de 15 m/s correspondant à une vitesse représentative relevée de 54 km/h lors d'épreuves de contre-la-montre sur un parcours plat pour un cycliste de classe internationale. Dans cette étude, les effets du vent ont été négligés ; ils feront l'objet de futures études.

## 2. Méthode

### 2.1. Géométrie et domaine de calcul

Comme nous l'avons mentionné, trois casques de contre-la-montre différents ont été sélectionnés pour cette étude. Afin d'évaluer les effets de la forme du casque sur les performances aérodynamiques, nous avons choisi des casques de conceptions différentes. Les casques étudiés ont été prêtés par des fabricants sous couvert d'anonymat. Par conséquent, les marques et l'identité des casques sont masquées.

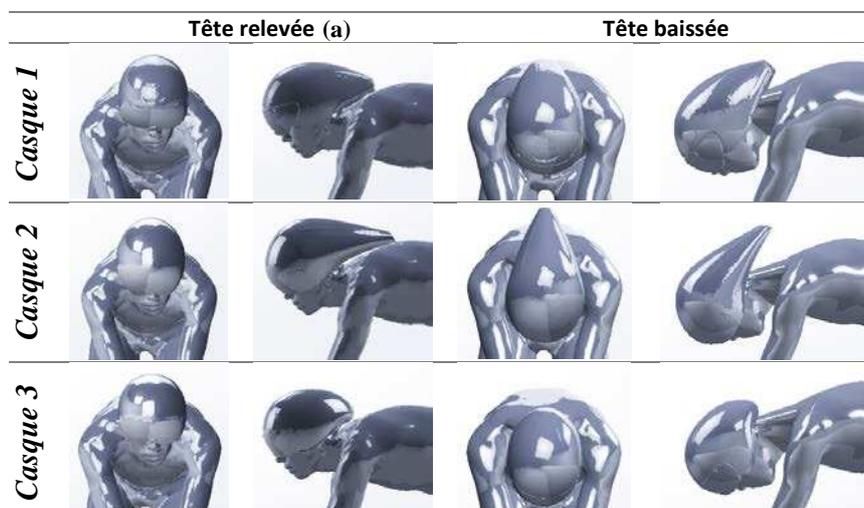


Figure 1. Géométrie du sujet étudié. Pour chaque casque de contre-la-montre : position de tête relevée (a), position de tête baissée (b)

Le casque 1 est un casque de contre la montre et triathlon, il est lisse et pèse 250 grammes. La large partie arrière du casque 1 s'aligne avec le dos du coureur et les

deux arêtes saillantes sont conçues pour fendre le flux d'air. L'entrée de la ventilation est située au milieu de la face avant du casque. Le casque 2 est un casque de contre la montre et triathlon allongé et lisse avec une queue longue qui s'aligne avec le dos du coureur. Il possède 4 ouvertures d'aération et pèse 320 grammes. Le casque 3 est également un casque spécifique à la pratique du triathlon ou du contre-la-montre. C'est un casque de chrono lisse, sans pointe derrière, mais avec une forme profilée en « goutte d'eau ». La ventilation est assurée par six micro-entrées d'air sur l'avant et quatre aérations d'échappement sur l'arrière. Il pèse 370 grammes. Tous les casques étudiés contiennent une visière intégrée.

La résolution d'un problème numérique nécessite plusieurs étapes, la première étant de définir la géométrie et la taille du domaine de calcul (figure 2). Pour cela, le modèle numérique du cycliste a été obtenu en numérisant (Scanner laser de haute résolution ROMER<sup>®</sup>) un cycliste de classe mondiale (taille 1,80 m) en position classique de contre-la-montre (sans casque). Le but de cette étape est d'obtenir toutes les caractéristiques dimensionnelles requises pour la modélisation. Dans un deuxième temps, les trois casques de contre-la-montre ont été numérisés à l'aide d'un scanner 3D à lumière pulsée (ARTEC<sup>®</sup>).

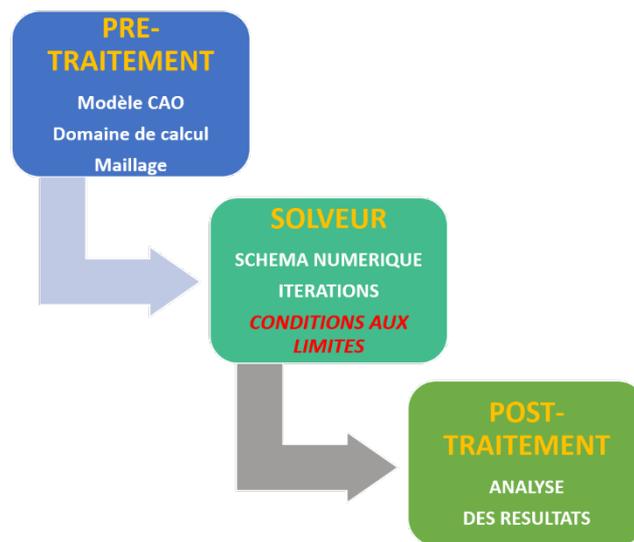


Figure 2. Processus de résolution d'un problème de CFD

Pour finir, les casques ont été ajustés sur la tête du cycliste à l'aide d'un logiciel de CAO (figure 1a). La position « tête baissée » a été obtenue en modifiant la CAO de manière à faire pivoter la tête de 55° vers le sol (figure 1b). Une fois la géométrie de l'ensemble cycliste/casque réalisée, celle-ci est placée dans le domaine de calcul dont les dimensions sont les suivantes : 2,5 m en amont et 10 m en aval. Ces

dimensions ont été choisies en se référant aux pratiques usuelles de la CFD (Zaidi *et al.*, 2010). Afin de limiter le temps de calcul, nous n'avons étudié que le corps du cycliste et non pas l'ensemble coureur/vélo (Blocken *et al.*, 2013).

## 2.2. Maillage

Le maillage tridimensionnel du domaine fluide a été réalisé à l'aide du logiciel ANSYS Workbench Meshing<sup>®</sup>. Il se compose d'un maillage non structuré qui comporte environ  $1,6 \times 10^6$  éléments tétraédriques et hexaédriques. Afin de réduire le temps de calcul, un maillage progressif a été généré avec de très petites cellules de forme prismatique dans la région de la couche limite et une taille de maille plus importante aux frontières du domaine (figure 3). Pour résoudre pleinement la couche limite près du corps du cycliste, une haute résolution du maillage est nécessaire afin d'assurer une valeur du nombre sans dimension  $y^+ < 5$  dans la région de la sous couche limite visqueuse.

La valeur de  $y^+$  est définie par :

$$y^+ = \frac{u_{\tau air} y}{\gamma_{air}} \quad (1)$$

Où  $y$  représente la distance verticale normale à la paroi (m) ;  $\gamma_{air}$  est la viscosité cinématique de l'air ( $m^2/s$ ). La vitesse de frottement de l'air est utilisée pour décrire les champs de vitesse liés au cisaillement dans un fluide en mouvement  $u_{\tau air}$  (m/s). Celle-ci est donnée par la formule suivante :

$$u_{\tau air} = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (2)$$

avec  $\tau_w$  qui représente la contrainte de cisaillement et  $\rho$  la masse volumique de l'air ( $kg/m^3$ ). La figure 2b représente un détail du maillage réalisé autour du casque et illustre la résolution élevée du maillage à proximité du corps du cycliste.

## 2.3. Conditions aux limites

Une vitesse horizontale, uniforme et constante de 15 m/s a été imposée à l'entrée du domaine fluide (figure 4), celle-ci correspond à la vitesse relevée lors d'épreuves de contre-la-montre pour un cycliste de niveau international sur parcours plat. En outre, une intensité turbulente de 0,02 % a été utilisée, correspondant au mouvement relatif de l'air dû à la rotation des jambes du cycliste et du mouvement du corps sur le vélo (Blocken *et al.*, 2013).

À la sortie, une condition de pression (pression atmosphérique) est fixée. Sur les frontières supérieure, inférieure, gauche et droite du domaine, des conditions de symétrie ont été imposées. A la surface du cycliste, une condition de non glissement (no-slip) a été considérée.

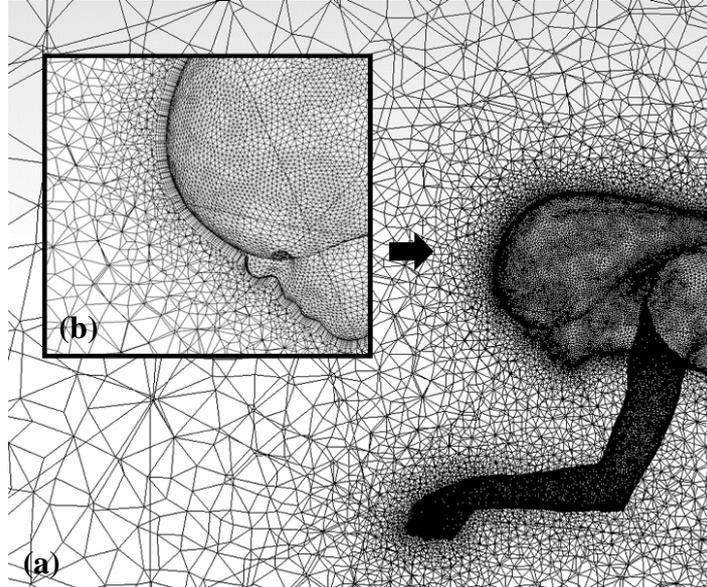


Figure 3. Maillage surfacique (cycliste) et volumique (domaine fluide) dans un plan vertical (a), détail du maillage (b)

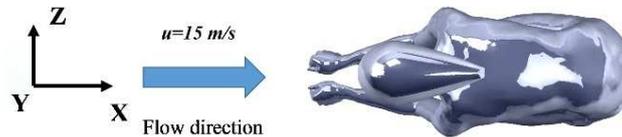


Figure 4. Géométrie du cycliste représentée dans le plan horizontal  $xz$  ; les simulations ont été effectuées à une vitesse uniforme de 15 m/s

#### 2.4. Simulations par code CFD

Les simulations numériques ont été effectuées avec le code de calcul ANSYS Fluent 17.2<sup>®</sup>. Le modèle de turbulence  $k - \epsilon$  standard a été choisi pour la fermeture des équations moyennées de Reynolds Navier-Stokes (RANS). Le modèle  $k - \epsilon$  est un des modèles de turbulence les plus communs. C'est un modèle à deux équations, ce qui signifie qu'il inclut deux équations supplémentaires de transport pour représenter les propriétés turbulentes du flux. Le modèle  $k - \epsilon$  est efficace dans les écoulements avec des gradients de pression relativement petits (Defraeye *et al.*,

2010). Ces avantages démontrent qu'il est parfaitement adapté pour simuler l'écoulement autour du corps du cycliste.

La convergence de la solution numérique a été suivie tout au long du calcul et a été obtenue lorsque les résidus (mesure des erreurs locales) ont affiché des valeurs inférieures à  $10^{-5}$ . La notion de convergence d'un schéma exprime sa propriété à tendre vers la solution exacte du problème traité, cette convergence est censée mener l'utilisateur à la solution physique.

### 3. Résultats

#### 3.1. Traînée aérodynamique

Pendant les compétitions de cyclisme, le vélo représente à lui seul environ 20 à 25 % de la traînée aérodynamique totale ; la traînée restante étant due à la forme du corps ainsi qu'à sa surface frontale, c'est-à-dire la partie qui s'oppose à l'écoulement.

La traînée est l'une des forces aérodynamiques principales. C'est la force qui s'oppose au mouvement d'un corps (avion, voiture, train, etc.). Le comportement du flux d'air autour d'un objet dépend de la surface qu'il va opposer à l'écoulement. Un objet avec une grande surface frontale (aussi appelée maître-couple : surface projetée suivant la trajectoire du fluide sur un plan perpendiculaire à cette trajectoire) rencontrera une force de traînée élevée. En revanche, un objet avec une forme aérodynamique, telle qu'une aile, va pénétrer l'air plus efficacement et engendrera une force de traînée réduite. La force de traînée aérodynamique,  $F_D$  (N), est définie par le coefficient de traînée sans dimension ( $C_D$ ) et varie en fonction de la surface frontale ( $A$  ;  $m^2$ ), la densité de l'air  $\rho$  ( $kg/m^3$ ) et la vitesse de l'écoulement  $u$  (m/s).

$$F_D = \frac{1}{2} \rho u^2 A C_D \quad (3)$$

L'aire frontale effective  $A C_D$  ( $m^2$ ) et le coefficient de traînée  $C_D$  sont obtenus à partir des calculs CFD et la surface frontale  $A$  ( $m^2$ ) du corps du cycliste est déduite du logiciel de CAO. Ces valeurs sont présentées dans le tableau 1 pour les trois casques et pour les deux positions du cycliste. Comme mentionné précédemment, les simulations CFD ont été réalisées en ne considérant que le corps du cycliste et non l'ensemble coureur/vélo.

Les résultats présentés dans le tableau 1 indiquent que les différences entre l'aire frontale effective des trois casques sont relativement faibles en position tête relevée (regard horizontal) mais qu'elles sont plus importantes en position tête baissée (regard vertical). En effet, en position tête relevée, le casque 1 présente le meilleur rendement aérodynamique avec un gain inférieur à 1,5 % par rapport à la position tête baissée. *A contrario*, en position tête baissée, les casques 1 et 3 offrent des performances similaires avec un gain maximum de 6 % par rapport au casque 2.

Tableau 1. Aire frontale effective  $AC_D$  ( $m^2$ ) et coefficient de traînée  $C_D$  déduits des calculs CFD ; surface frontale  $A$  ( $m^2$ ) du corps du cycliste déduite du logiciel CAO pour chaque casque et chaque position de tête

Casque	Tête relevée (regard horizontal)			Tête baissée (regard vertical)		
	$AC_D$ ( $m^2$ )	$C_D$	Surface frontale A ( $m^2$ )	$AC_D$ ( $m^2$ )	$C_D$	Surface frontale A ( $m^2$ )
# 1	0,138	0,481	0,286	0,140	0,499	0,281
# 2	0,139	0,484	0,288	0,149	0,529	0,282
# 3	0,140	0,496	0,283	0,140	0,499	0,280

En position tête relevée, les trois casques ont des performances relativement proches. Cependant, la surface frontale et le coefficient de traînée sont différents pour chaque casque. Dans cette position, nous pouvons constater que le coefficient de traînée du casque 3 est supérieur à celui des autres casques (+ 3,1 % par rapport au casque 1 ; + 2,5 % par rapport au casque 2). Cependant, en raison de sa petite surface frontale (0,283  $m^2$  vs 0,286 pour le casque 1 et 0,288  $m^2$  pour le casque 2), le casque 3 présente des performances aérodynamiques proches des autres casques.

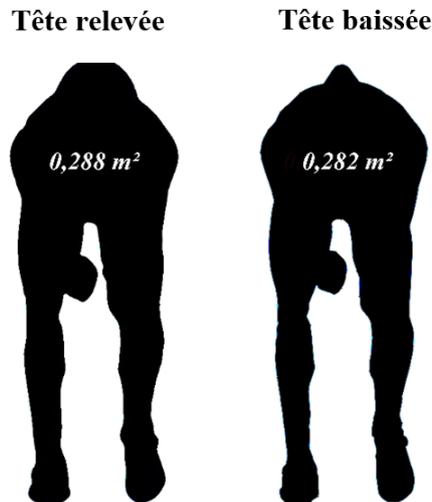


Figure 5. Surface frontale du casque 2 pour les positions tête relevée et baissée

En position tête baissée, le casque 2 offre les plus mauvaises performances aérodynamiques. Les casques 1 et 3 présentent quant à eux le meilleur rendement aérodynamique avec une aire frontale effective similaire. Le casque 3 offre les mêmes performances quelle que soit la position de la tête. Cela est peut-être dû à sa forme globale arrondie. Adopter une posture qui diminue la surface frontale contribue à minimiser la résistance au vent, mais une réduction de la surface frontale n'entraîne pas nécessairement une diminution de la traînée aérodynamique. En effet, malgré une surface frontale faible en position tête baissée (figure 5), le casque 2 offre de meilleures performances en position tête relevée. Comme une recommandation générale, adopter une position aérodynamique efficace va induire une diminution de la force de traînée.

REMARQUE. – Si l'on considère uniquement le casque sans le cycliste, il devient évident que le coefficient de traînée sera plus élevé en position tête baissée (par rapport à la position tête relevée) car la surface frontale sera plus importante. À l'inverse, si l'on considère l'ensemble casque/cycliste, le comportement aérodynamique sera tout à fait différent.

Pour conforter ces hypothèses, nous présentons dans le tableau 2, l'aire frontale effective déduite de la littérature et de notre étude pour des casques de formes équivalentes et pour deux positions de tête. Nous observons que les résultats varient largement et dépendent d'un certain nombre de paramètres tels que la forme du casque, l'inclinaison de la tête et la vitesse. C'est la raison pour laquelle il est important de considérer les résultats dans le contexte de l'étude.

Tableau 2. Aire frontale effective  $AC_D(m^2)$ , tête relevée et baissée. Données issues de la littérature et de la présente étude. Selon l'étude, les auteurs ont étudié l'ensemble coureur/vélo, le cycliste seul ou la tête du cycliste seule

Auteurs	Casque	$AC_D (m^2)$	
		Tête relevée	Tête baissée
<b>Grappe (2009)</b>	Casque CLM, longue queue (coureur + vélo)	0,373	0,392
<b>Wilkins (2014)</b>	Casque CLM Laser Wasp (coureur + vélo)	0,277	0,243
<b>Présente étude</b>	Casque CLM, longue queue (coureur seul)	0,139	0,149

### 3.2. Validation du modèle

Les résultats numériques ont été validés par comparaison avec les données expérimentales et numériques de l'étude de Blocken *et al.* (2013).

Les valeurs des coefficients utilisés pour la comparaison sont récapitulées dans le tableau 3. Elles sont issues des mesures effectuées en soufflerie et par simulation CFD pour un cycliste sans vélo et pour une vitesse de 15 m/s. Nos résultats se trouvent en bon accord avec les résultats de Blocken *et al.* (2013) obtenus pour un coureur en position de contre-la-montre sans vélo. Blocken *et al.* (2013) ont obtenu des valeurs  $AC_D$  de 0,134 (soufflerie) et 0,135 m<sup>2</sup> (CFD) proches des résultats obtenus dans notre étude pour la même posture, même vitesse d'écoulement et pour une forme de casque équivalente.

*Tableau 3. Comparaison des résultats issus de mesures en soufflerie (Exp.) et de la simulation numérique par code CFD pour un coureur sans vélo et pour une vitesse de 15 m/s*

	$AC_D$ corps du cycliste (m <sup>2</sup> )
<b>Blocken <i>et al.</i> (2013) _Exp.</b>	0,134
<b>Blocken <i>et al.</i> (2013) _CFD.</b>	0,135
<b>La présente étude</b>	0,138

### **3.3. Analyse des lignes de courant, des contraintes de cisaillement et des champs de pression**

Dans les épreuves de contre-la-montre, l'écoulement de l'air autour de la tête et du corps du cycliste a un impact énorme sur le comportement aérodynamique global. La position proéminente de la tête du cycliste implique que le casque influe grandement sur les performances aérodynamiques de l'ensemble coureur/vélo. Lorsque le casque est exposé à l'écoulement d'air, une couche limite se forme autour de celui-ci. En changeant la forme du casque et/ou la position de la tête, la couche limite, tout comme le comportement de l'écoulement d'air, sont modifiés. La couche limite est la zone de l'écoulement où la vitesse passe de la vitesse de l'air à une vitesse nulle (sur la paroi des objets/corps).

Souvent, les cyclistes ajustent la position de leur tête (et son inclinaison) au cours de la course, l'écoulement de l'air autour de celle-ci variant en conséquence. C'est pourquoi les équipes de cyclisme recherchent une forme de casque qui soit à garante des performances aérodynamiques, qui prenne en compte la fréquence de changement de position de la tête mais également les conditions environnementales comme le vent. La figure 6 présente les lignes du courant (colorées par la vitesse) pour chacun des casques et chacune des positions étudiées. La figure 6 montre clairement que la variation de la vitesse de l'air dépend de la trajectoire de l'écoulement autour du corps. Nous observons que l'air est fortement décéléré (lignes de courant colorées en bleu) au niveau du cou et des épaules du cycliste, et

tend à s'accélérer (lignes de courant colorées en rouge) au niveau du casque et des cuisses du coureur.

La figure 6 nous indique que le comportement de l'écoulement de l'air est différent pour chaque casque et dépend non seulement de la forme de celui-ci mais également de la position de la tête. En analysant les lignes de courant du casque 2 en position tête relevée, nous pouvons remarquer que l'écoulement reste attaché. En effet, un casque possédant une forme Aero (comme le casque 2) maintient l'air attaché le long de sa surface pendant plus longtemps, diminuant ainsi les perturbations pouvant se produire lorsque l'air se détache du casque. A contrario, l'orientation du casque 2 en position tête baissée perturbe l'écoulement qui va se détacher de la surface, comme nous pouvons le voir dans une zone située derrière la tête et au-dessus du cou du cycliste.

De plus, les lignes de courant de la figure 6 indiquent que tout changement de géométrie en amont de l'ensemble casque/cycliste modifie considérablement l'écoulement en aval. En raison de la non-uniformité et de la complexité du corps humain, des gradients de pression et des zones de turbulences sont générées autour du corps du cycliste pendant la course. Cela peut causer un décollement de la couche limite qui peut se produire au niveau de certaines géométries concaves du corps (nuque, menton et fesses) comme illustré sur la figure 6. Le décollement de couche limite apparaît dans les régions où nous rencontrons des changements significatifs de géométrie. Dans la couche limite, les vitesses tangentielles à la paroi sont supposées grandes devant les vitesses normales. Cette zone peut se décoller de la paroi. Le point de décollement de couche limite est défini comme le point où le frottement s'annule. En effet, en amont du point de décollement, le frottement est positif et en aval, il est négatif. Le décollement de couche limite induit souvent une grande traînée de pression et l'apparition d'un sillage.

Les résultats du tableau 1 et de la figure 6 montrent clairement une relation entre le décollement de couche limite et la force de traînée. En effet, si on compare les casques en position tête baissée et en observant minutieusement les lignes de courant du casque 2, nous pouvons observer un phénomène de décollement qui implique une augmentation des forces de traînée. Une fois que la couche limite est décollée, la pression devient constante et la différence de pression entre l'avant et l'arrière du casque crée une force de traînée qui ralentit l'ensemble coureur/vélo. Un casque Aero facilite non seulement la circulation de l'air autour de la tête, mais aussi, lorsqu'il est porté correctement, occupe la zone de basse pression localisée dans le berceau du cou (la zone vacante derrière la tête et au-dessus de l'arrière du cou / haut du dos). Il est bien connu que la contrainte de cisaillement et la pression statique sont des paramètres fondamentaux en compétition cycliste. La figure 7 présente une vue de face et de dessus de la répartition des contraintes de cisaillement sur le corps du cycliste pour les trois casques et les deux positions de la tête. Cette figure nous indique que les valeurs de contrainte de cisaillement et leur répartition sur le corps du cycliste sont différentes d'une position de tête à une autre.

Nous pouvons voir que la position tête relevée réduit considérablement les contraintes de cisaillement dans le dos du cycliste. Pour le casque 2 en position tête

relevée, les contraintes de cisaillement sont très faibles dans une zone allant du milieu du casque jusqu'au bas du dos du cycliste. Dans cette zone, nous constatons que l'écoulement reste attaché, comme observé sur la figure 6.

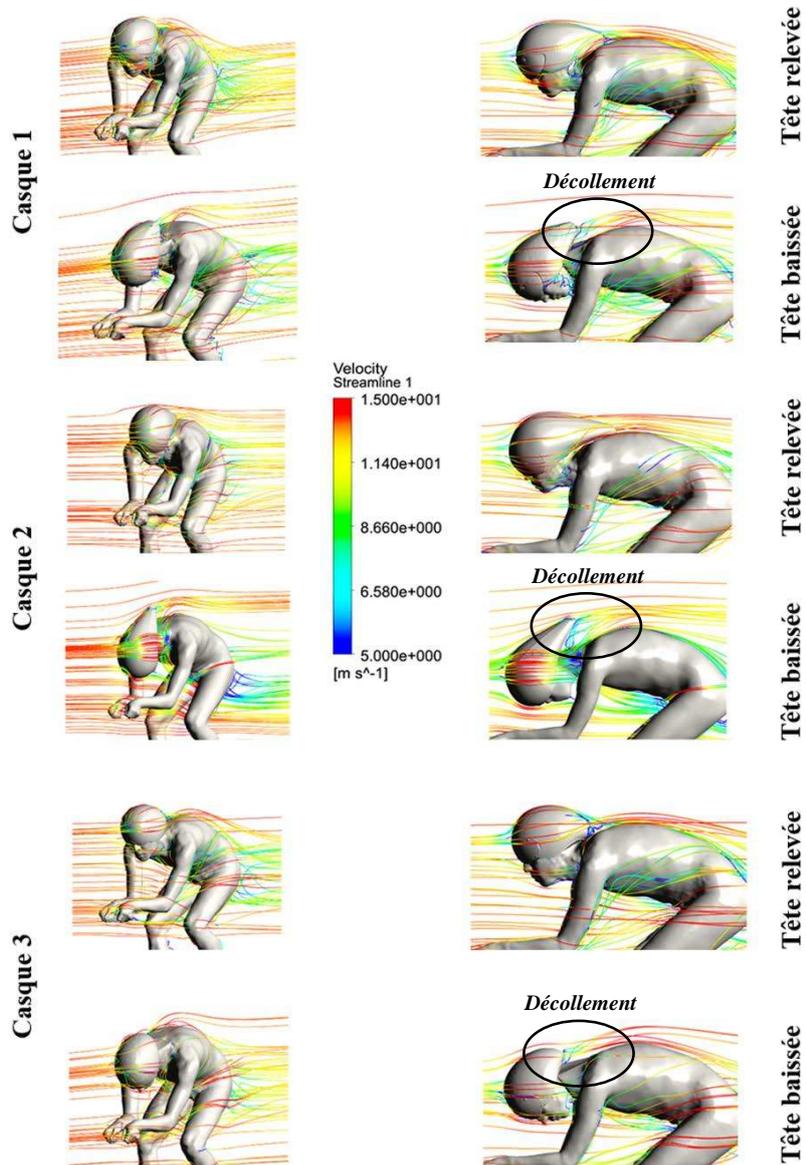


Figure 6. Lignes de courant colorées par la vitesse pour chacun des casques et pour chaque position de la tête. Les zones de décollement sont mises en évidence par des ovales

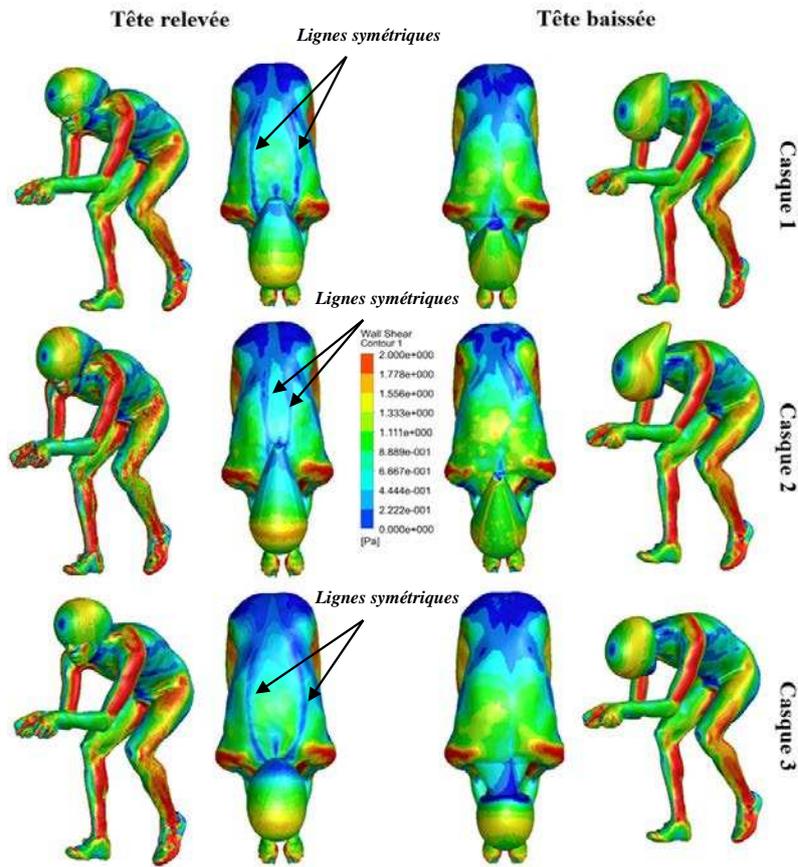


Figure 7. Vue de face et de dessus de la répartition des contraintes de cisaillement à la surface du corps du cycliste pour chacun des casques et chaque position de tête. Les flèches indiquent les deux lignes de contraintes symétriques relevées au niveau de la courbure du dos pour la position tête relevée

Dans l'ensemble, les contraintes de cisaillement sont maximales pour les zones perpendiculaires au flux incident et, à l'inverse, elles sont minimales lorsque les zones sont tangentiels à l'écoulement principal. De plus, pour la position tête relevée et quel que soit le casque, nous pouvons observer deux lignes de contraintes symétriques au niveau de la courbure du dos dont les valeurs sont relativement basses. Ces lignes où nous relevons de faibles contraintes dépendent de la forme du casque et se développent à partir du bord de fuite de celui-ci.

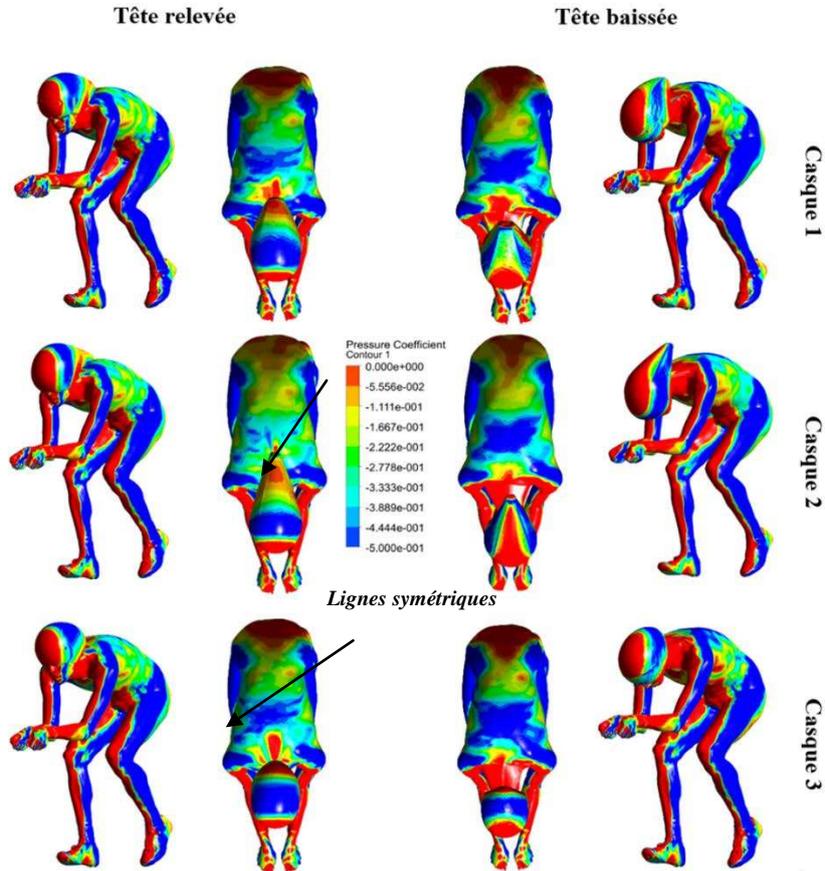


Figure 8. Vues de face et de dessus de coefficient de pression  $C_p$  sur la surface du corps du cycliste pour chaque casque et chaque position de la tête

La figure 8 représente les vues de face et de dessus de la répartition du coefficient de pression  $C_p$  sur le corps du cycliste pour chaque casque et chaque position de la tête. Afin de mieux relever tout changement dans le champ de pression, nous avons arbitrairement limité la plage de valeurs à l'intervalle  $[-0,5 ; 0]$  même si les valeurs absolues maximales et minimales de  $C_p$  sont beaucoup plus importantes. Pour les casques 1 et 3 en position tête relevée, nous observons une différence de pression significative dans une zone directement située entre le casque et le haut du dos qui serait due à un effet de rotation dans le sillage proche. Ce point est confirmé à la figure 6. L'apparition des zones de détachement tourbillonnaires conduit à des pertes importantes d'énergie et à des valeurs de pression correspondantes positives.

#### 4. Conclusion

L'objectif principal de cette étude était d'évaluer la traînée aérodynamique de trois casques différents en quantifiant à la fois l'influence de la géométrie externe de l'ensemble coureur/casque et de la position de la tête. En position tête relevée, les trois casques présentent des performances relativement proches. Cependant, des différences significatives ont été observées en fonction de la position de la tête. Changer la position de la tête modifie la surface frontale du corps du cycliste, ce qui influence de façon significative la performance aérodynamique. En position tête baissée, le casque 2 offre les plus mauvaises performances aérodynamiques, la valeur de son coefficient de traînée augmentant de 8,5 % par rapport à la position tête relevée. Les casques 1 et 3 offrent les meilleures performances aérodynamiques avec une aire frontale effective similaire. En raison de sa forme arrondie, le casque 3 offre des performances équivalentes quelle que soit la position de la tête.

L'analyse des lignes de courant a montré que la structure de l'écoulement de l'air autour du cycliste dépend à la fois de la forme du casque et de la position de la tête. Nous avons constaté qu'un changement dans la forme du casque et/ou dans la position de la tête entraîne une modification de la couche limite et du comportement global de la structure de l'écoulement d'air autour du cycliste. De plus, les résultats ont montré que les casques 1 et 2 en position tête relevée maintiennent l'air attaché le long de la surface pendant plus longtemps. Cette position contribue à de meilleures performances aérodynamiques. De plus, nous avons montré que certaines zones du corps du cycliste, en particulier derrière le casque, favorisent le décollement de la couche limite nuisible aux performances aérodynamiques.

En pratique, les cyclistes doivent évaluer la nature de la course et déterminer la durée pendant laquelle ils peuvent garder la tête en position baissée en toute sécurité. Dans les courses techniques avec beaucoup de virages et d'obstacles, il est indispensable de garder la tête en position relevée, par conséquent, le casque 1 sera le plus avantageux. Dans l'ensemble, en comparant les forces de traînée pour les trois casques et au regard des différences relevées entre les deux positions, le casque 1 offre le meilleur compromis. Cette étude portait essentiellement sur deux positions spécifiques de la tête et les conclusions ont été obtenues pour des calculs effectués sans vent, les résultats doivent être examinés dans ce contexte. D'autres études seront prochainement conduites sur les effets du vent de travers et sur l'influence de la position de la tête sur la traînée aérodynamique des casques de contre-la-montre.

#### Bibliographie

- Abdullah, M. N., Muda, M. K. H., Mustapha, F., Shamsudin, M. A. (2017). Aerodynamics Analysis for an Outdoor Road Cycling Helmet and Air Attack Helmet. *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, vol. 5, n° 1, p. 46-50.
- Abdullah M.N., Mustapha F., Muda, M. K. H., Arrifin, M. K. A., Rafie, A. S. M., Shamsudin, M. A. (2015). Simulating bio-composite cycling helmet performance through FEA and CFD approaches. *Movement, Health & Exercise*, vol. 4, n° 1, p. 77-91.

- Alam F., Chowdhury H., Wei H.Z., Mustary I., Zimmer G. (2014). Aerodynamics of Ribbed Bicycle Racing Helmets. *Procedia Engineering, The Engineering of Sport 10*, vol. 72, p. 691-696.
- Alam F., Chowdhury H., Elmir Z., Sayogo A., Love J., Subic A. (2010). An experimental study of thermal comfort and aerodynamic efficiency of recreational and racing bicycle helmets. *Procedia Engineering, The Engineering of Sport 8 - Engineering Emotion 2001*, vol. 2, n° 2, p. 2413-2418.
- Barry N., Burton D., Sheridan J., Thompson M., Brown N.A. (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*, 1754337114549876.
- Blocken B., Defraeye T., Koninckx E., Carmeliet J., Hespel P. (2013). CFD simulations of the aerodynamic drag of two drafting cyclists. *Computers & Fluids*, vol. 71, p. 435-445.
- Brownlie L., Ostafichuk P., Tews E., Muller H., Briggs E., Franks K. (2010). The wind-averaged aerodynamic drag of competitive time trial cycling helmets. *Procedia Engineering, The Engineering of Sport 8 - Engineering Emotion*, vol. 2, n° 2, p. 2419-2424.
- Brühwiler P.A. (2008). Radiant heat transfer of bicycle helmets and visors. *J Sports Sci*, vol. 26, n° 10, p. 1025-1031.
- Brühwiler P.A., Buyan M., Huber R., Bogerd C.P., Sznitman J., Graf S.F., Rösigen T. (2006). Heat transfer variations of bicycle helmets. *J Sports Sci*, vol. 24, n° 9, p. 999-1011.
- Chabroux V., Barelle C., Favier D. (2012). Aerodynamics of Cyclist Posture, Bicycle and Helmet Characteristics in Time Trial Stage. *Journal of Applied Biomechanics*, vol. 28, n° 3, p. 317-323.
- Chabroux V., Barelle C., Favier D. (2008). Aerodynamics of Time Trial Bicycle Helmets (P226). *The Engineering of Sport 7*, Springer Paris, p. 401-410.
- Chabroux V., Mba M.N., Sainton P., Favier D. (2010). Wake characteristics of time trial helmets using PIV-3C technique, *15th Int Symp on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics 2010*, Lisbon, Portugal.
- Chowdhury H., Alam F., Khan K. (2011) An experimental study of bicycle aerodynamics. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, vol 6, n° 2, p. 269-274.
- Chowdhury H., Alam F. (2012). Bicycle aerodynamics : an experimental evaluation methodology. *Sports Eng*, vol. 15, n° 2, p.73-80.
- Defraeye T., Blocken B., Koninckx E., Hespel P., Carmeliet J. (2010). Aerodynamic study of different cyclist positions: CFD analysis and full-scale wind-tunnel tests. *Journal of Biomechanics*, vol. 43, n° 7, p. 1262-1268.
- Defraeye T., Blocken B., Koninckx E., Hespel P., Carmeliet J. (2011). Computational fluid dynamics analysis of drag and convective heat transfer of individual body segments for different cyclist positions. *Journal of Biomechanics*, vol. 44, n° 9, p. 1695-1701.
- Defraeye T., Blocken B., Koninckx E., Hespel P., Carmeliet J. (2010). Computational fluid dynamics analysis of cyclist aerodynamics: Performance of different turbulence-modelling and boundary-layer modelling approaches. *Journal of Biomechanics*, vol. 43, n° 12, p. 2281-2287.

- Ellis A.J., Bertolini A.F., Thompson L.A. (2000). A review of research on bicycle helmet ventilation. *Sports Engineering*, vol. 3, n° 3, p. 185-194.
- Fintelman D.M., Sterling M., Hemida H., Li F.-X. (2014). The Effect of Crosswinds on Cyclists: An Experimental Study. *Procedia Engineering, The Engineering of Sport 10*, vol. 72, p. 720-725.
- Grappe F. (2009). *Cyclisme et optimisation de la performance : sciences et méthodologie de l'entraînement*, 2e édition. Ed. De Boeck.
- Grappe F., Candau R., Belli A., Rouillon J.D. (1997). Aerodynamic drag in field cycling with special reference to the Obree's position. *Ergonomics*, vol. 40, n° 12, p. 1299-1311.
- Mustary I., Chowdhury H., Loganathan B., Alharthi M., Alam F. (2014). Aerodynamic Efficiency and Thermal Comfort of Road Racing Bicycle Helmets. *19th Australasian Fluid Mechanics Conference 2014*. Melbourne, Australia.
- Sims B.W., Jenkins P.E. (2011). Aerodynamic Bicycle Helmet Design Using a Truncated Airfoil With Trailing Edge Modifications, *ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, vol. 6 : *Fluids and Thermal Systems; Advances for Process Industries, Parts A and B*, p 453-462. Denver, Colorado, USA.
- Wilkins J. (2014). Best aero time trial helmets, bikeradar.com, <http://www.bikeradar.com/gear/article/best-aero-time-trial-helmets-34859/>
- Zaïdi H., Fohanno S., Taiar R., Polidori G. (2010). Turbulence model choice for the calculation of drag forces when using the CFD method. *Journal of Biomechanics*, vol. 43, n° 3, p. 405-411.