

Les résistances aérodynamiques

Les résistances aérodynamiques

Résistances qui s'appliquent sur le cycliste

La technique de pédalage

La fréquence de pédalage

La position

$$R_a = S C_x \times \rho / 2 \times V_a^2$$

R_a = traînée aérodynamique,

S = surface frontale en m^2 du coureur et de sa bicyclette (surface qui « attaque » l'air),

C_x = coefficient de pénétration dans l'air qui dépend de la forme du coureur et de son vélo ainsi que de la texture de la surface de ses vêtements,

→ $S C_x$ représente donc la surface frontale effective

ρ = densité de l'air = à 1.23 kg/m^3 au niveau de la mer contre 0,93 kg/m^3 à Mexico à 2200m (l'augmentation de l'humidité de l'air et surtout de la température ambiante induisent une diminution de la densité de l'air),

V_a = somme de la vitesse de déplacement (V_d) et de la vitesse du vent (V_v).

Les résistances aérodynamiques

Les résistances aérodynamiques

Résistances qui s'appliquent sur le cycliste

La technique de pédalage

La fréquence de pédalage

La position

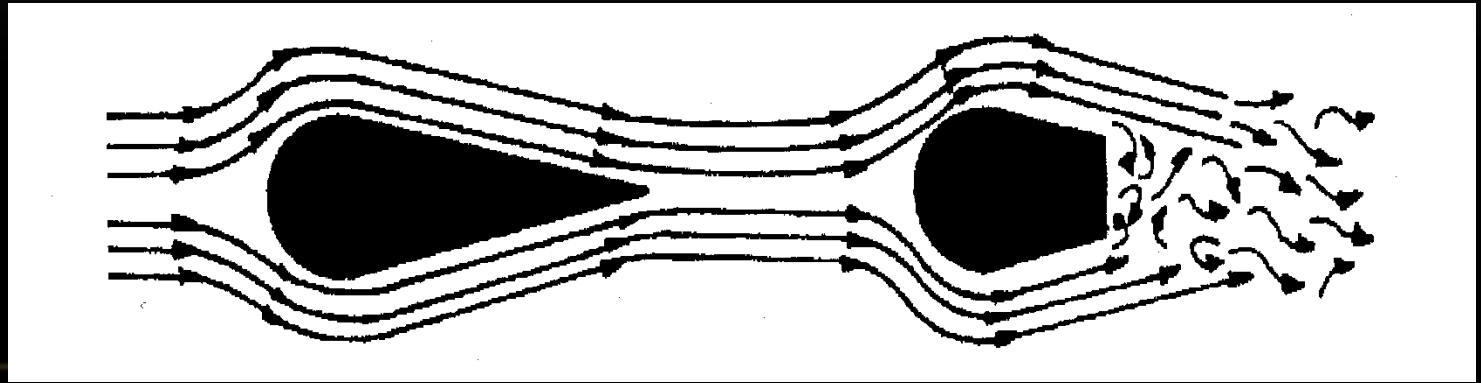


Illustration de l'écoulement de l'air :

- de type **laminaire** à gauche = les filets d'air sont parallèles les uns / aux autres;
- de type **turbulent** à droite = les filets d'air sont désordonnés.

Les résistances aérodynamiques

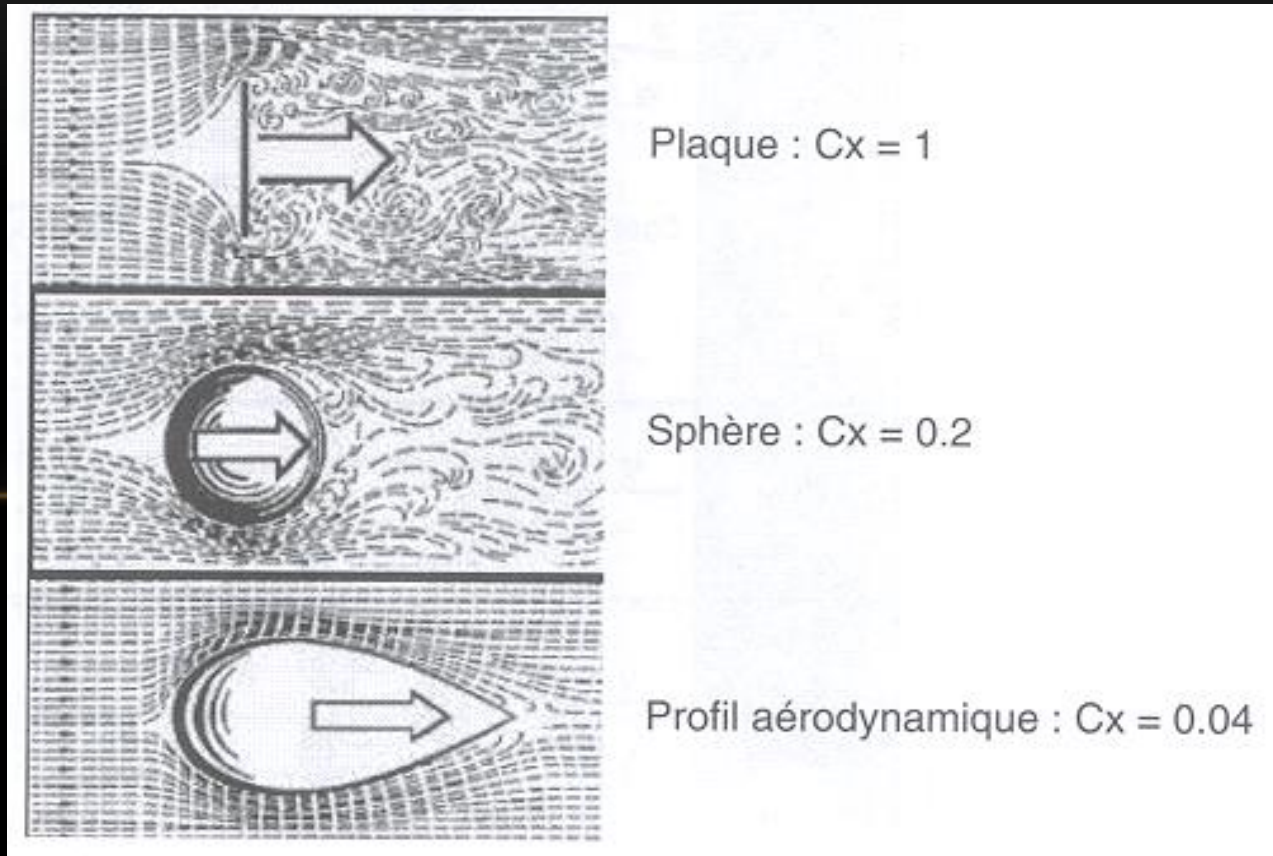
Les résistances aérodynamiques

Analyse psychosociale

Analyse neurophysiologique

Analyse cognitive

Analyse didactique



Différentes formes (C_x) pour une même surface frontale (S)

Les résistances aérodynamiques


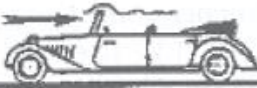



Les résistances aérodynamiques


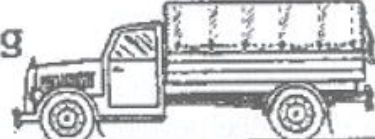

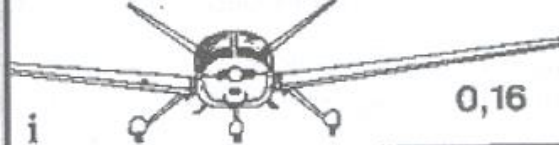

Résistances qui s'appliquent sur le cycliste

La technique de pédalage

La fréquence de pédalage

La position

	Plaque plane près du sol	C_x
a		1,27
b		0,9
c		0,52
d		0,34
e		0,2

f		0,43
g		0,75 à 0,9
h		Premier régime 0,51 Sphère Second régime 0,1
i		0,16
j		0,054

Différents C_x pour différents véhicules

Les résistances aérodynamiques

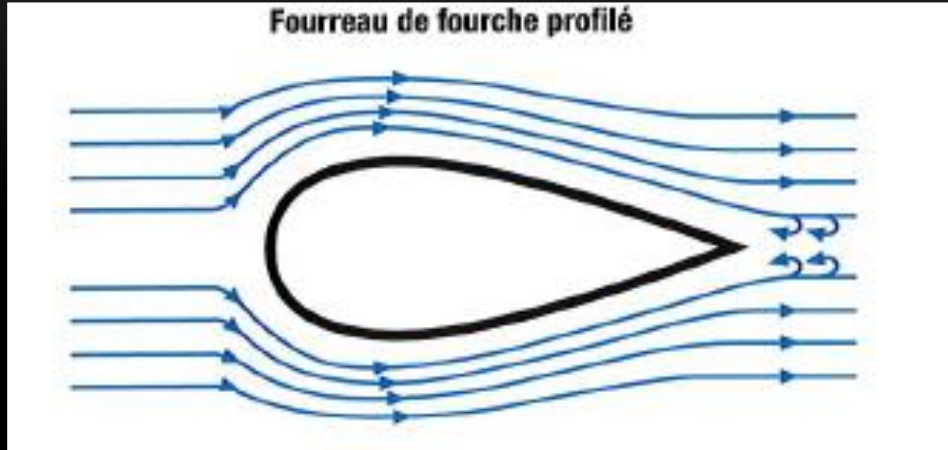
Les résistances aérodynamiques

Résistances qui s'appliquent sur le cycliste

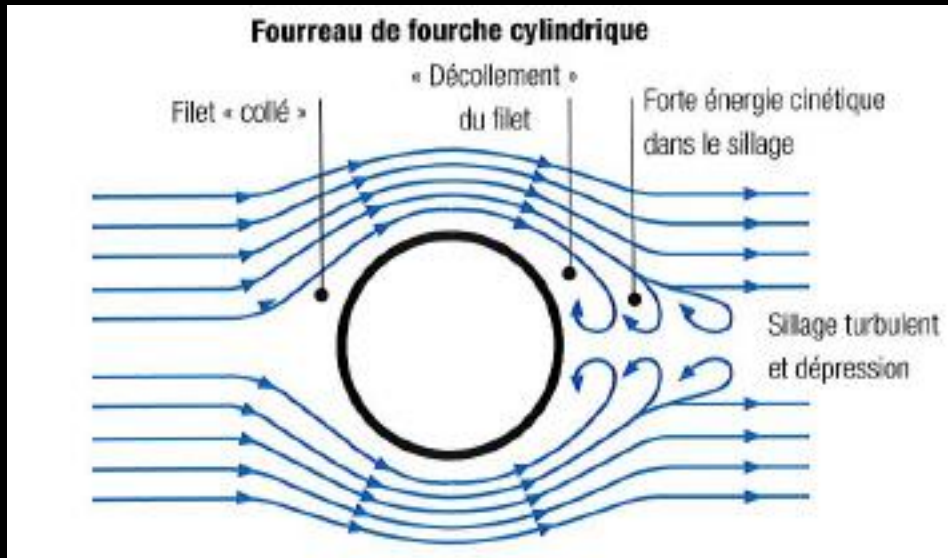
La technique de pédalage

La fréquence de pédalage

La position



Un fourreau de forme aérodynamique préserve l'aspect laminaire de la couche limite, qui reste mieux collée à la surface et ne concède que des turbulences restreintes.



Un fourreau de forme cylindrique finit par dissoudre les filets laminaires en turbulences. Celles-ci réent une dépression qui tire sur la fourche et freine le vélo.

Les résistances aérodynamiques

Les résistances aérodynamiques

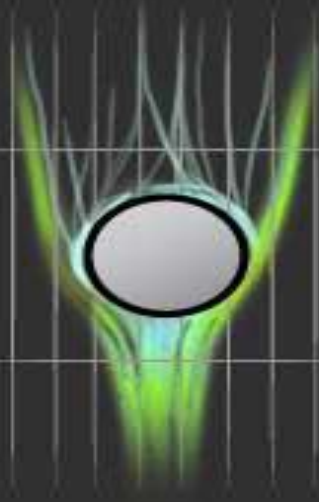
Résistances qui s'appliquent sur le cycliste

La technique de pédalage

La fréquence de pédalage

La position

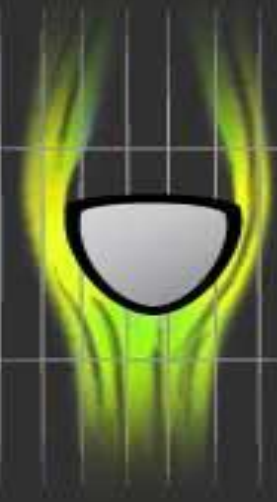
Comment l'aérodynamisme a remodelé les tubes de vélo



1. Tube circulaire



2. Tube goutte d'eau ou aile d'avion



3. Tube Kamm-Tail

Les résistances aérodynamiques

Au-delà de 15 km/h sur le plat (en moyenne) la majeure partie de l'énergie dépensée sert à vaincre la résistance de l'air.

A 50 km/h sur route plate, 90% de l'énergie dépensée sert à lutter contre la résistance de l'air.



La résistance de l'air ou « traînée » revêt 3 formes :

- les frottements de l'air venant de face,
- des turbulences qui ballotent le cycliste,
- et une zone de basse pression dans son dos qui le retient en arrière.

Les résistances aérodynamiques

Résistances qui s'appliquent sur le cycliste

La technique de pédalage

La fréquence de pédalage

La position

Les résistances aérodynamiques

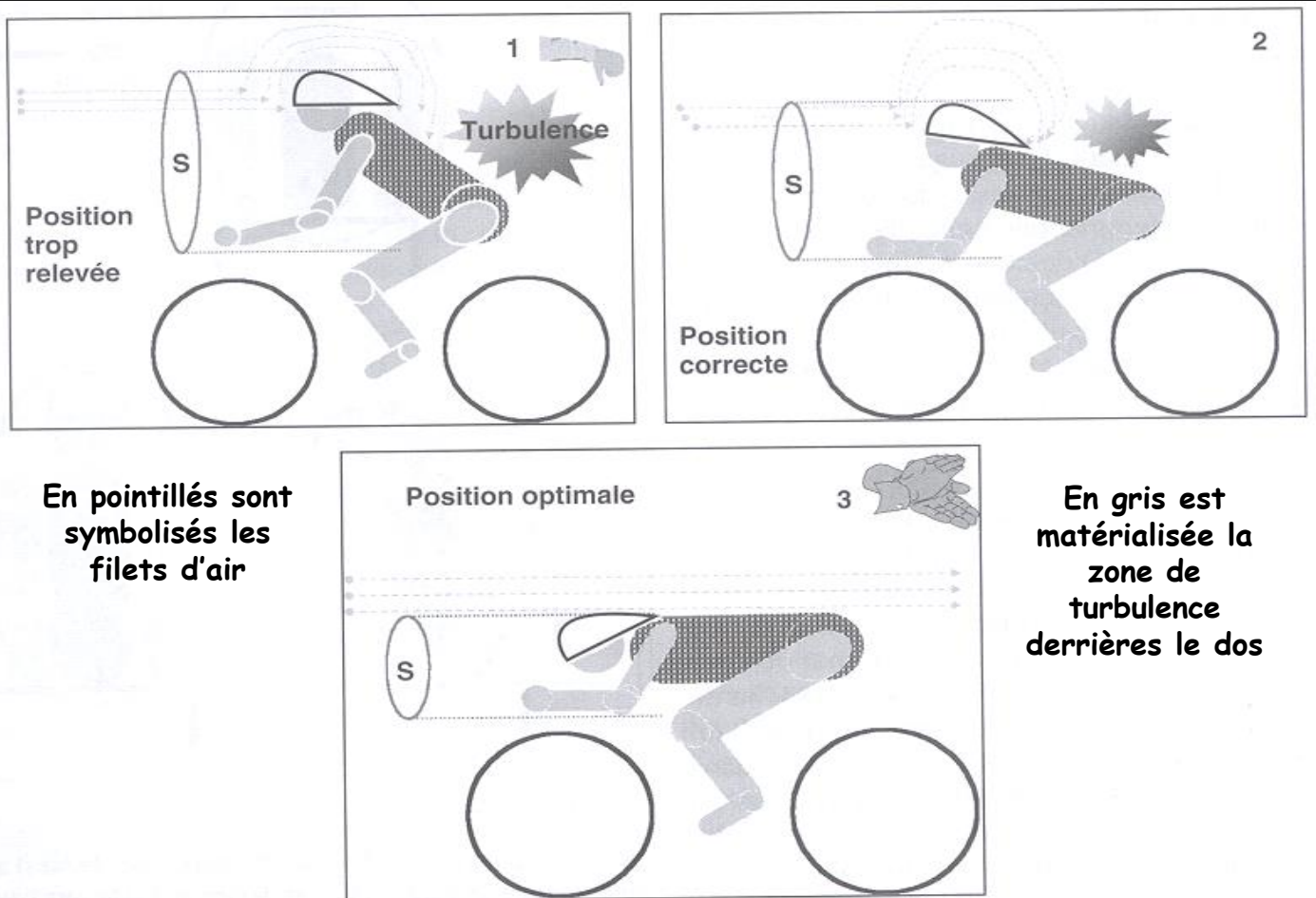
Les résistances aérodynamiques

Résistances qui s'appliquent sur le cycliste

La technique de pédalage

La fréquence de pédalage

La position



Variation de la surface frontale (S) et de la forme (Cx) du coureur (vu de profil) en fonction de trois positions différentes (très relevé ou couché)

Les résistances aérodynamiques

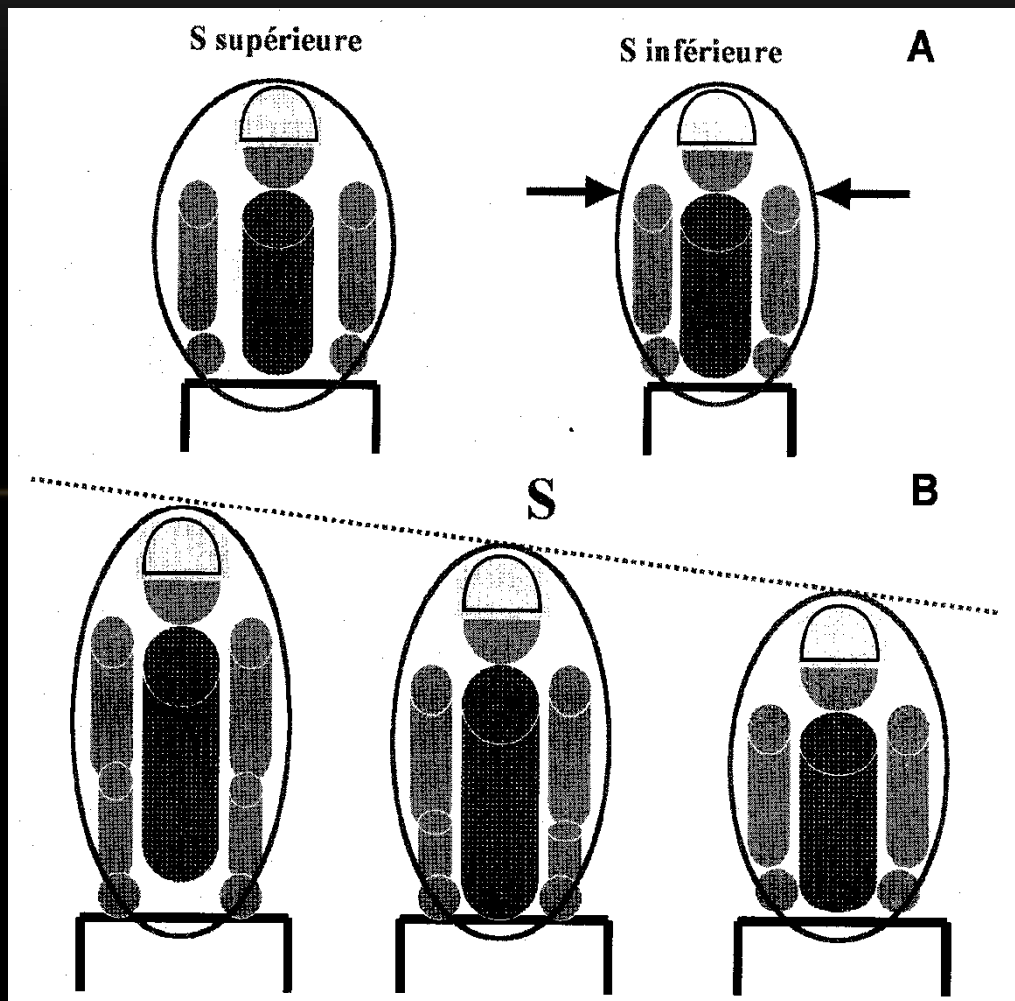
Les résistances aérodynamiques

Résistances qui s'appliquent sur le cycliste

La technique de pédalage

La fréquence de pédalage

La position



Vu de face

Diminution de la surface frontale du coureur avec le resserrement des membres supérieurs sur le guidon (A) et la flexion du buste vers l'avant (B)

Les résistances aérodynamiques

Les résistances aérodynamiques

Résistances qui s'appliquent sur le cycliste

La technique de pédalage

La fréquence de pédalage

La position



SCx = 0.40 pour un cycliste traditionnel avec bras tendus
SCx = 0.35 pour un cycliste traditionnel avec bras fléchis
SCx = 0.30 pour un cycliste traditionnel avec mains en bas du guidon
SCx = 0.25 pour un cycliste "contre la montre" ou triathlète

Les résistances aérodynamiques

Les résistances aérodynamiques

Résistances qui s'appliquent sur le cycliste

La technique de pédalage

La fréquence de pédalage

La position

Les trouvailles aérodynamiques 2013 de Lapierre

Grâce aux essais en soufflerie et aux logiciels de modélisation, Lapierre a peaufiné le profil aérodynamique des vélos de contre-la-montre utilisés par la FDJ pour son modèle 2013 « Aerostorm ».



Source : <http://www.lequipe.fr/explore/chasseurs-de-temps/2015>.

Les résistances aérodynamiques

Les résistances aérodynamiques

Résistances qui s'appliquent sur le cycliste

La technique de pédalage

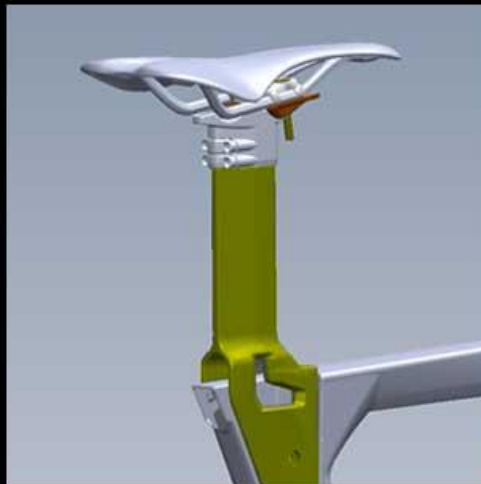
La fréquence de pédalage

La position

TIGE DE SELLE



La fixation de la tige de selle est cachée et perturbe moins les flux d'air. Le profil de cette tige de selle a aussi été redessiné.



Ancien modèle



Nouveau modèle

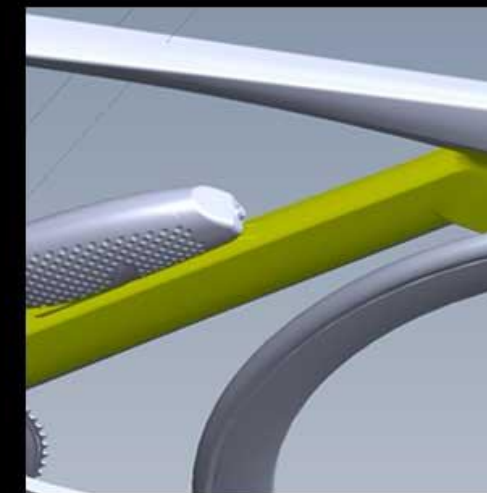
TUBE DIAGONAL



Le tube diagonal du cadre passe en profil "Kamm tail", une goutte d'eau tronquée. Une forme plus performante en vent de côté.



Ancien modèle



Nouveau modèle

Source : <http://www.lequipe.fr/explore/chasseurs-de-temps/2015>.

Les résistances aérodynamiques

Les résistances aérodynamiques

Résistances qui s'appliquent sur le cycliste

La technique de pédalage

La fréquence de pédalage

La position

FOURCHE



Les freins avant sont intégrés à l'intérieur de la nouvelle fourche.



Ancien modèle

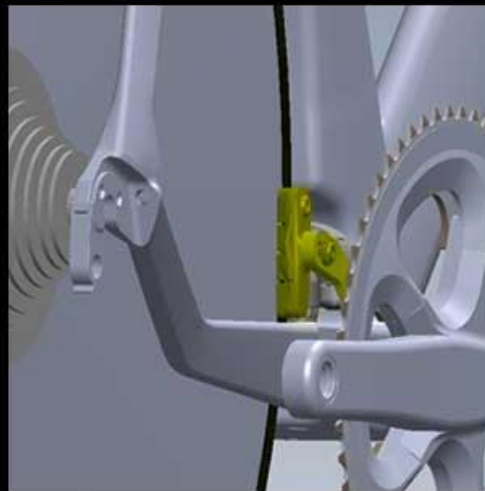


Nouveau modèle

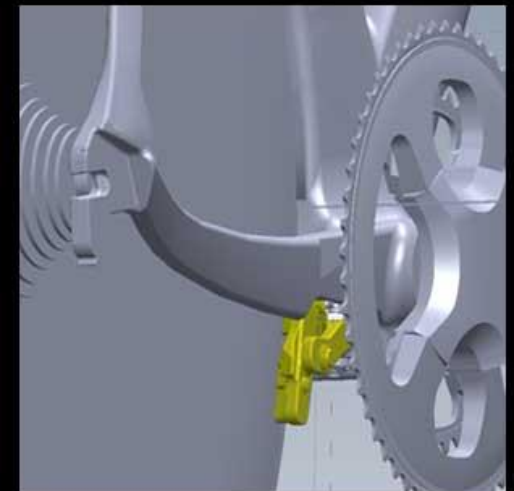
FREINS ARRIÈRES



Les freins avant sont intégrés à l'intérieur de la fourche.



Ancien modèle



Nouveau modèle

Les résistances aérodynamiques

Les résistances aérodynamiques

Résistances qui s'appliquent sur le cycliste

La technique de pédalage

La fréquence de pédalage

La position



Profil kamm tail

Les résistances aérodynamiques

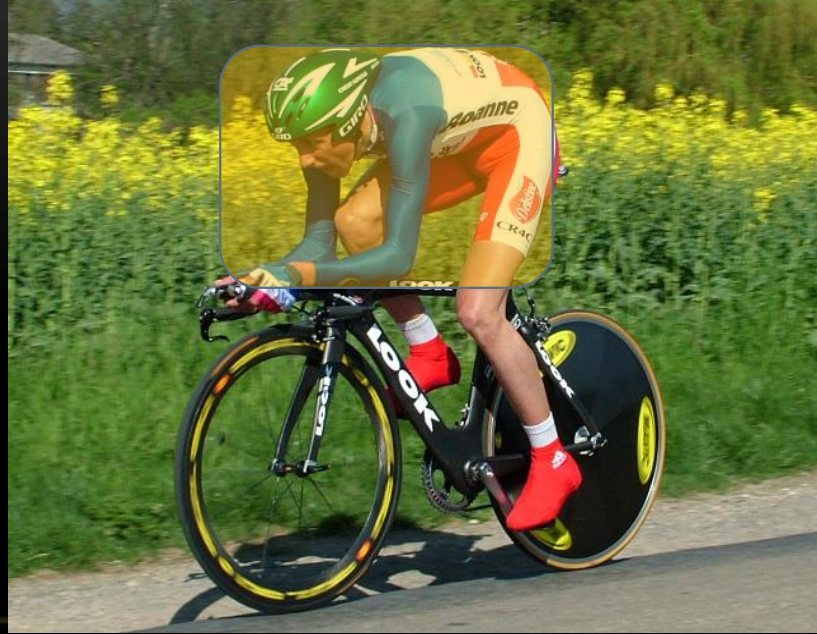
Les résistances aérodynamiques

Résistances qui s'appliquent sur le cycliste

La technique de pédalage

La fréquence de pédalage

La position



Vue de profil

Position idéale en contre-la-montre :

- Un buste très abaissé (tête au niveau des fesses).
- Des avant-bras horizontaux et resserrés.
- Le bon positionnement de la tête regard vers l'avant.
- Le dos plat.
- Le casque dans le prolongement du dos (pas de décrochage de la pointe du casque).

Les résistances aérodynamiques

Les résistances aérodynamiques

Résistances qui s'appliquent sur le cycliste

La technique de pédalage

La fréquence de pédalage

La position



Vue de profil

Position idéale en contre-la-montre :

- Un buste très abaissé (tête au niveau des fesses).
- Des avant-bras horizontaux et resserrés.
- Le bon positionnement de la tête regard vers l'avant.
- Le dos plat.
- Le casque dans le prolongement du dos (pas de décrochage de la pointe du casque).

Les résistances aérodynamiques

Les résistances aérodynamiques

Résistances qui s'appliquent sur le cycliste

La technique de pédalage

La fréquence de pédalage

La position



Vue de face

Position idéale en contre-la-montre :

- Un buste très abaissé (tête au niveau des fesses).
- Des avant-bras horizontaux et resserrés.
- Le bon positionnement de la tête regard vers l'avant.
- Le dos plat.



Vue de dos

- On ne voit pas dépasser le casque !

Les résistances aérodynamiques

Les résistances aérodynamiques

Résistances qui s'appliquent sur le cycliste

La technique de pédalage

La fréquence de pédalage

La position



Même en danseuse le dos reste plat et le buste très abaissé.

Les résistances aérodynamiques

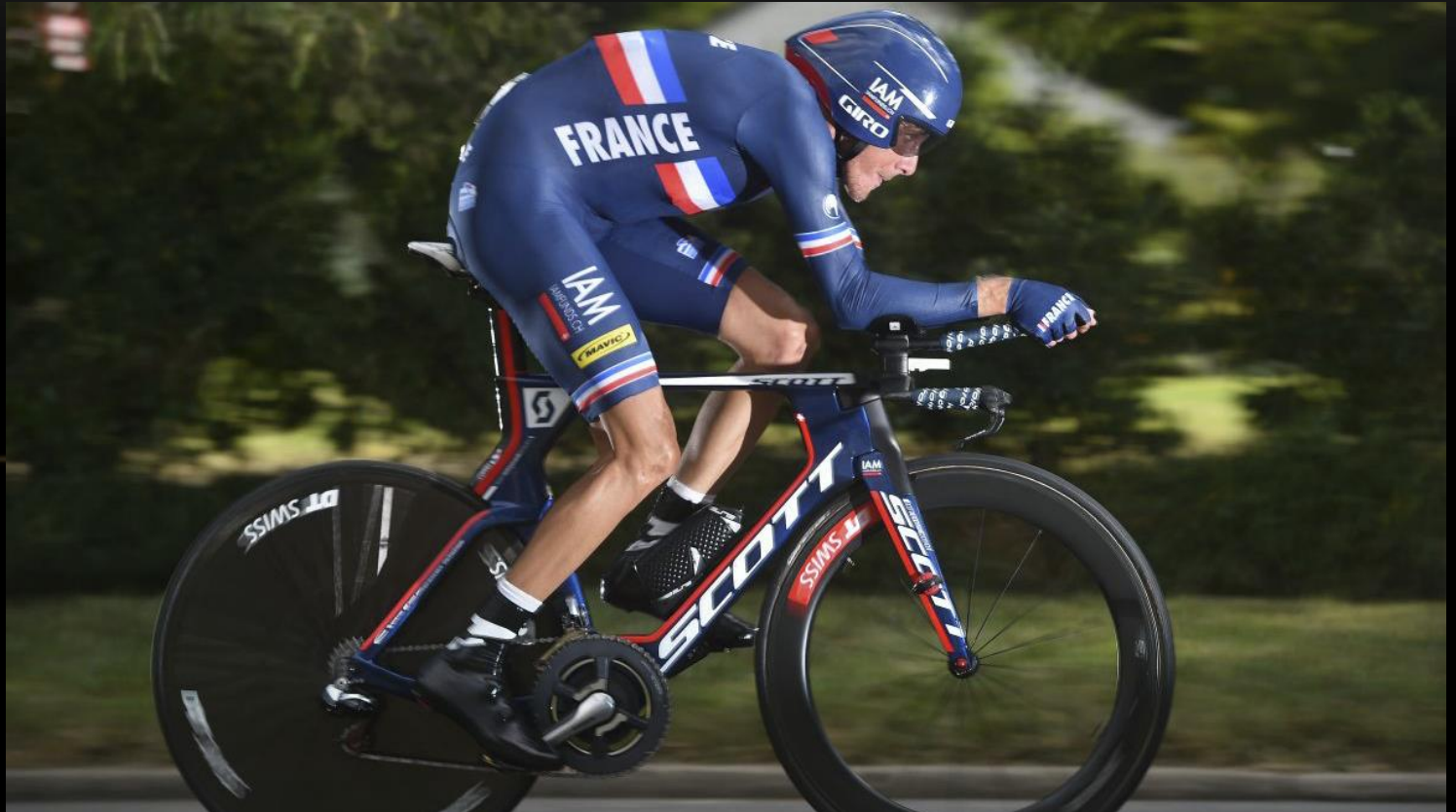
Les résistances aérodynamiques

Résistances qui s'appliquent sur le cycliste

La technique de pédalage

La fréquence de pédalage

La position



Sa nouvelle position chez IAM : apparemment moins aérodynamique (guidon plus haut → posture moins « couchée ») ... mais tout aussi efficace (ici 3^e au dernier Championnat du Monde CLM) !

Les résistances aérodynamiques

Les derniers champions du monde

Les résistances aérodynamiques

Résistances qui s'appliquent sur le cycliste

La technique de pédalage

La fréquence de pédalage

La position



Fabian Cancellara 2010



Tony Martin 2011, 2012, 2013, 2016



Bradley Wiggins 2014



Vasil Kiryenko 2015

Les résistances aérodynamiques

Les derniers champions du monde

Les résistances aérodynamiques

Résistances qui s'appliquent sur le cycliste

La technique de pédalage

La fréquence de pédalage

La position



Tom Dumoulin 2017



Rohan Dennis 2018, 2019

2020

2021

Les résistances aérodynamiques

Les résistances aérodynamiques

Résistances qui s'appliquent sur le cycliste

La technique de pédalage

La fréquence de pédalage

La position



Vue de face

Tony Martin : position aérodynamique avec les avant-bras horizontaux et très resserrés.

Les résistances aérodynamiques

Les résistances aérodynamiques

Résistances qui s'appliquent sur le cycliste

La technique de pédalage

La fréquence de pédalage

La position



L'optimisation de la position chez INEOS

Les résistances aérodynamiques

Evolution du record de l'heure

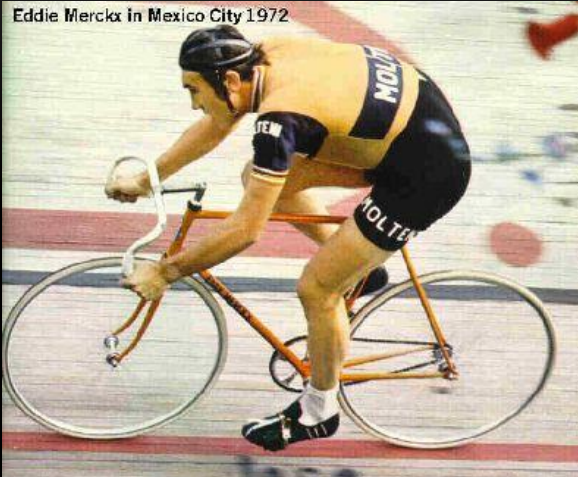
Les résistances aérodynamiques

Résistances qui s'appliquent sur le cycliste

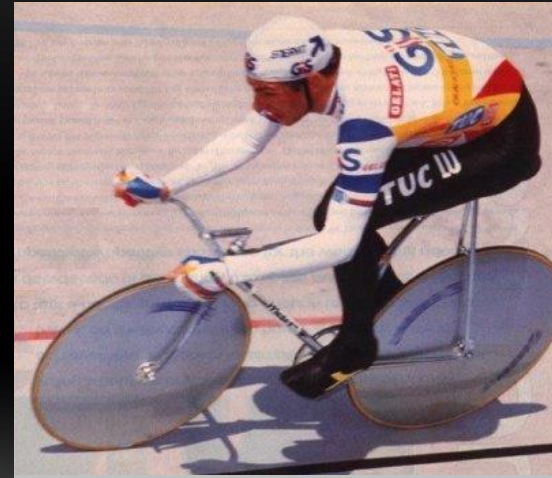
La technique de pédalage

La fréquence de pédalage

La position



Eddy Merckx en 1972 :
49,431 km



Francesco Moser en 1984 :
51,151 km



Graeme Obree en 1993 :
51,596 km



Chris Boardman en 1993 :
52,270 km

Les résistances aérodynamiques

Evolution du record de l'heure

Les résistances aérodynamiques

Résistances qui s'appliquent sur le cycliste

La technique de pédalage

La fréquence de pédalage

La position



Miguel Indurain en 1994 :
53,040 km



Tony Rominger en 1994 :
55,291 km



Chris Boardman en 1996 :
56,375 km (Scx = 0,18)



Chris Boardman en 2000 :
49,441 km

Les résistances aérodynamiques

Evolution du record de l'heure

Les résistances aérodynamiques

Résistances qui s'appliquent sur le cycliste

La technique de pédalage

La fréquence de pédalage

La position



Ondřej Sosenka en 2005 :
49,700 km



Jens Voigt en 2014 :
51,115 km



Rohan Dennis en 2015 :
52,491 km/h



Victor Campenaerts en
2019 : 55,089 km

Les résistances aérodynamiques

Résistances qui s'appliquent sur le cycliste

La technique de pédalage

La fréquence de pédalage

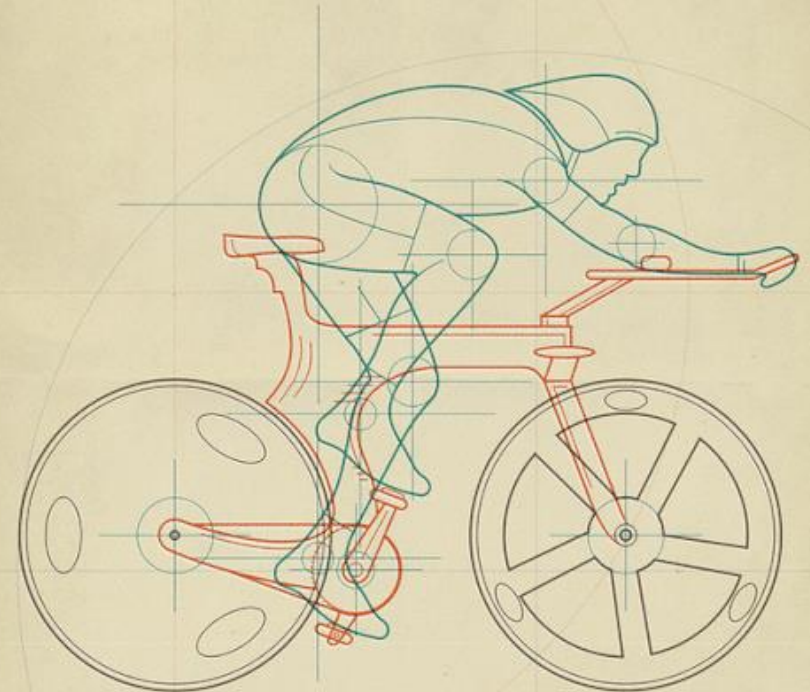
La position

BOARDMAN

GR.
56x13/8.95m

CR.
170.0mm

CA.
105.0rpm



KM.
56.375*

D.
06.09

Y.
1996

V.
MANCHESTER

Les résistances aérodynamiques

Evolution du record de l'heure

Les résistances aérodynamiques

Résistances qui s'appliquent sur le cycliste

La technique de pédalage

La fréquence de pédalage

La position



Bradley Wiggins en 2015 : 54,526 km

Puissance moyenne sur une heure = 440 à 450 W

5,9 à 6,1 W/kg (poids = 74 kg)

Braquet = 58 X 14 (équivalent 54 X 13)

Développement = 8,72 m

Fréquence de pédalage = 104 rpm

Les résistances aérodynamiques

Evolution du record de l'heure

Les résistances aérodynamiques

Résistances qui s'appliquent sur le cycliste

La technique de pédalage

La fréquence de pédalage

La position



Bradley Wiggins en 2015 : 54,526 km
Puissance moyenne sur une heure = 440 à 450 W
5,9 à 6,1 W/kg (poids = 74 kg)
Braquet = 58 X 14 (équivalent 54 X 13)
Développement = 8,72 m
Fréquence de pédalage = 104 rpm

Les résistances aérodynamiques

Comparaison Ullrich / Armstrong

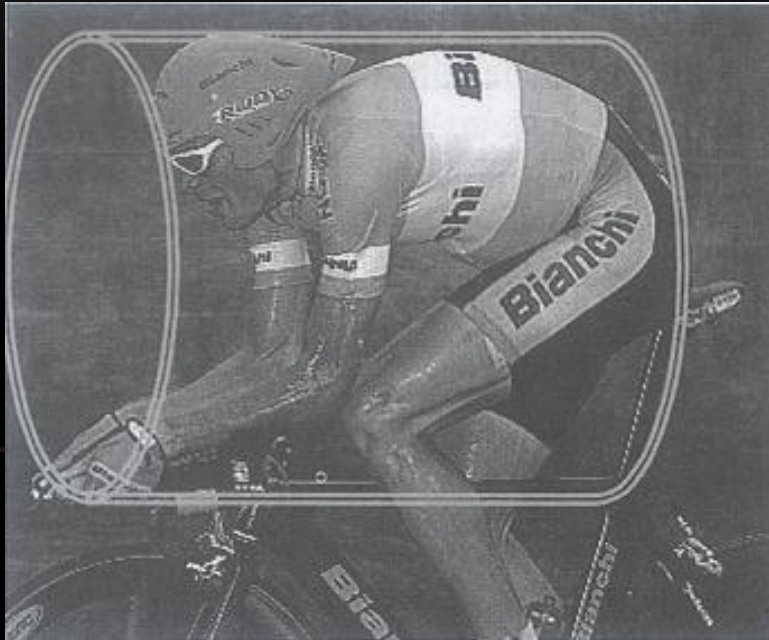
Les résistances aérodynamiques

Résistances qui s'appliquent sur le cycliste

La technique de pédalage

La fréquence de pédalage

La position



Diminution de la surface frontale ($S = - 32\%$) et amélioration de la forme ($C_x = - 5-10\%$) de Lance Armstrong comparé à Yan Ullrich dans le Tour de France 2003 (d'après Grappe, 2005)

Les résistances aérodynamiques

Comparaison Ullrich / Armstrong

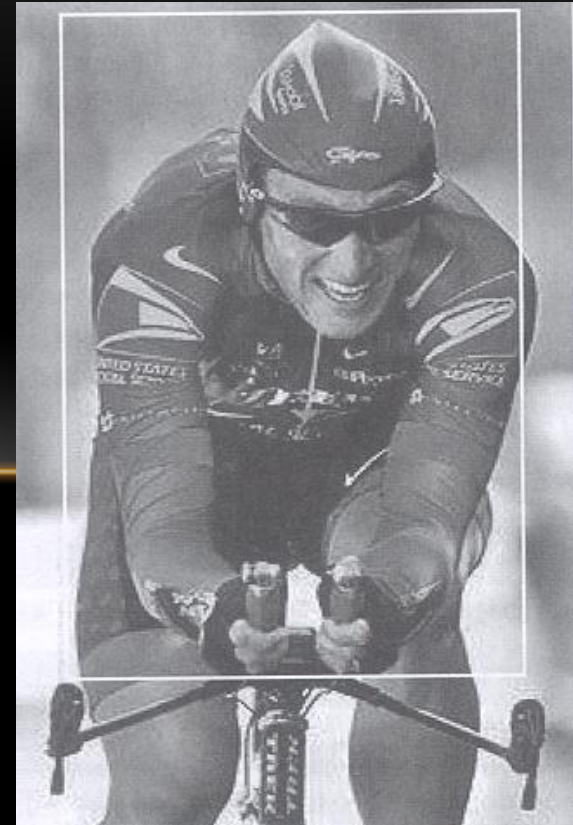
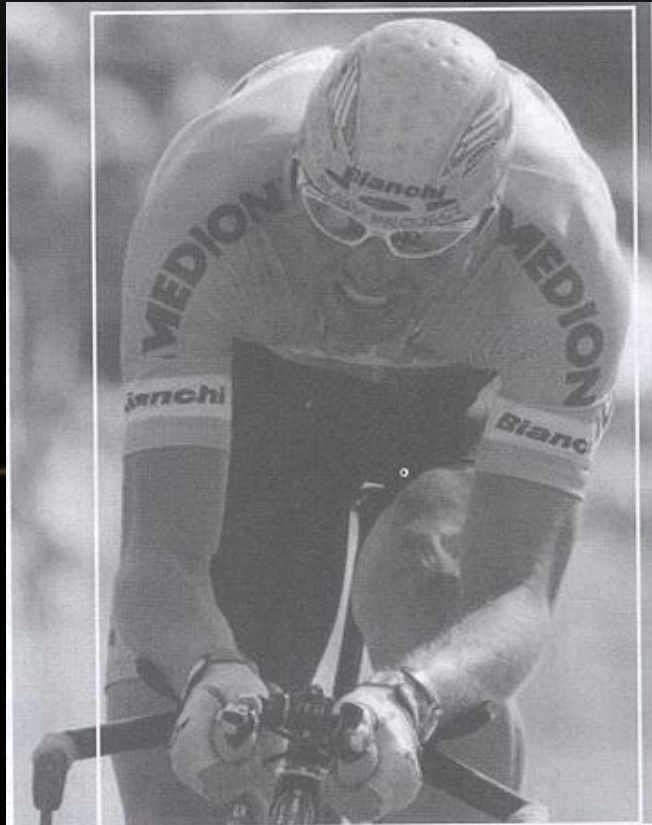
Les résistances aérodynamiques

Résistances qui s'appliquent sur le cycliste

La technique de pédalage

La fréquence de pédalage

La position



On estime le SCx d'Ullrich à 0,27, contre 0,22 pour celui d'Armstrong (resserrement des membres supérieurs sur le guidon, avant-bras horizontaux, flexion du buste plus importante) → + 20% de puissance supplémentaire (Grappe, 2005)

Les résistances aérodynamiques

Lemond / Fignon, Tour de France 1989



Traînée de différents types de casques mesurée à 48 km/h (15)

Positions	Guidon	Traînée (N)	Variations
➤ Fignon, sans casque, avec couette	corne de vache	32,8	
➤ Fignon, sans casque, sans couette	corne de vache	32,3	- 1,5 %
➤ Fignon, casque « System U »	corne de vache	31,4	- 4,2 %
➤ Lemond, casque « Giro »	Scott aéro	26,8	- 18,3 %

→ Grappe (2005) estime à 3,5 km/h et à 6 sec au km les gains de Lemond sur le plat / à Fignon.

Les résistances aérodynamiques

Résistances qui s'appliquent sur le cycliste

La technique de pédalage

La fréquence de pédalage

La position

Les résistances aérodynamiques

Les records de vitesse

Les résistances aérodynamiques

Analyse psychosociale

Analyse neurophysiologique

Analyse cognitive

Analyse didactique



Denise Mueller-Korenek, 296 km/h derrière écran (2018)



Eric Barone, 227,72 km/h sur neige à Vars (2017)

8 | Le Monde | Samedi 11 novembre 2011 | SCIENCE & TECHNO | TECHNOLOGIE

L'Eiviestretto, le vélo le plus rapide du monde

91,556 kilomètres. C'est la distance parcourue en une heure à la seule force des jambes par le Suisse Francesco Russo le 2 août sur un circuit allemand. Il décroche ainsi le record du monde à bord de l'Eiviestretto, prototype conçu avec le Suisse Dorian Zabornek. « Je suis couché la tête en avant pour améliorer l'aérodynamisme du vélo, indique Francesco Russo, tout en étant servi dans le carénage afin de réduire au maximum la surface frontale offerte au vent... Un profil de fusée qui permet à ce type de vélo d'atteindre des vitesses impressionnantes, le record sur 100 mètres dépassant les 300 km/h.

Roue avant directrice
Diamètre 52 cm. Largeur 20 cm. Pas de fourche, mais un système positionné dans la roue qui comprend des freins à disque, comme sur les VTT.

Aérodynamisme
La position horizontale, la tête vers l'avant, augmente l'aérodynamisme jusqu'à environ 10% par rapport à un vélo couché caréné avec la tête dans le sens de la route.

Guidon asymétrique
L'ajout d'un axe qui part de la gauche et qui va jusqu'à la droite de la roue. Permet de se pencher sans mouvement, le pilote tire le guidon à droite quand il veut un virage à droite dans son sens - alors qu'il agit d'un virage à gauche. Virages serrés alternés. Équilibre avec le guidon et les mouvements de tête.

Roue arrière, transmission inversée
75 cm de diamètre. Il faut inverser la transmission de la chaîne pour que la première rotation de la roue se fasse dans le bon sens. Pas de frein sur la roue arrière.

Axe d'inversion de la transmission

Sortie du CO₂

Dispositif de rétrovision

Arrivée et départ d'air

Le cycle dispose de deux tubes. Un part de l'avant du vélo et supporte l'air frais, dans l'autre il expulse le CO₂ qui est expulsé de l'arrière. Le manque d'air frais du carénage se traduit par de la chaleur et de la condensation.

Entrée de l'air

Coupe en carbone et résine epoxy

VITESSES
Le vélo dispose de 3 vitesses. La première est utilisée de 0 à 33 km/h (un coup de pédale = 2 mètres et demi), la seconde jusqu'à 75 km/h, la troisième jusqu'à 100 km/h, voire au-delà (un coup de pédale = 15 mètres et demi).

DISTANCE PARCOURUE EN UNES HEURES EN KM

16	31	48,510	101,932	174,12	44,011	91,556 km
Orville Peckham (USA) 1896	Walter Sauer (USA) 1904	Jeanes Longo (Canada) (USA) 1996	Chris Brinkman (USA) 1998	Ben Barone (USA) 2009	Francesco Russo (ITA) 2010	Francesco Russo (ITA) 2011
Vélo de course	Vélo de course	Vélo classique	Vélo classique aérodynamique	Vélo recumbent	Vélo recumbent	Vélo couché caréné
Route de campagne	Route de campagne					

— INNOVATIONNELLE MONDIE avec Mathieu Sabourdy

Francesco Russo, 91,556 km en une heure sur un vélo couché caréné (2011)

Les résistances aérodynamiques

L'abri « dans la roue »

Les résistances aérodynamiques

Résistances qui s'appliquent sur le cycliste

La technique de pédalage

La fréquence de pédalage

La position

Vitesse	Bénéfices de l'aspiration (= % d'économie / au coureur de tête)	Puissance coureur de tête	Puissance coureur dans la roue
55 km/h	35 %	750 W	490 W
50 km/h	31 %	570 W	390 W
45 km/h	28 %	435 W	310 W
40 km/h	25 %	320 W	240 W
35 km/h	22 %	230 W	180 W
30 km/h	19 %	160 W	130 W
25 km/h	15 %	105 W	90 W
20 km/h	12 %	65 W	57 W
15 km/h	9 %	40 W	36 W

Les résistances aérodynamiques

Conséquences technico-tactiques

Les résistances aérodynamiques

Résistances qui s'appliquent sur le cycliste

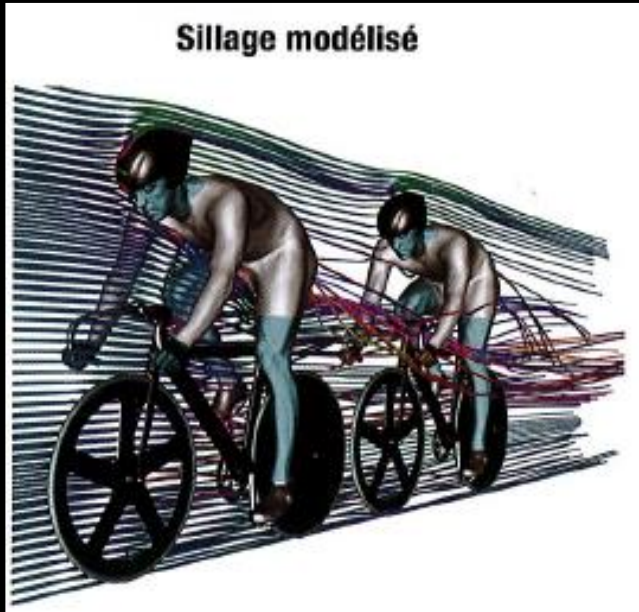
La technique de pédalage

La fréquence de pédalage

La position



Sillage modélisé



Simulation numérique qui montre que le suiveur affronte un flux d'air beaucoup moins dense que le meneur. Il rencontre des turbulences, mais leur effet ralentissant est largement compensé par l'allègement de la résistance de l'air, surtout sur les parties larges du corps.

Les résistances totales en montée

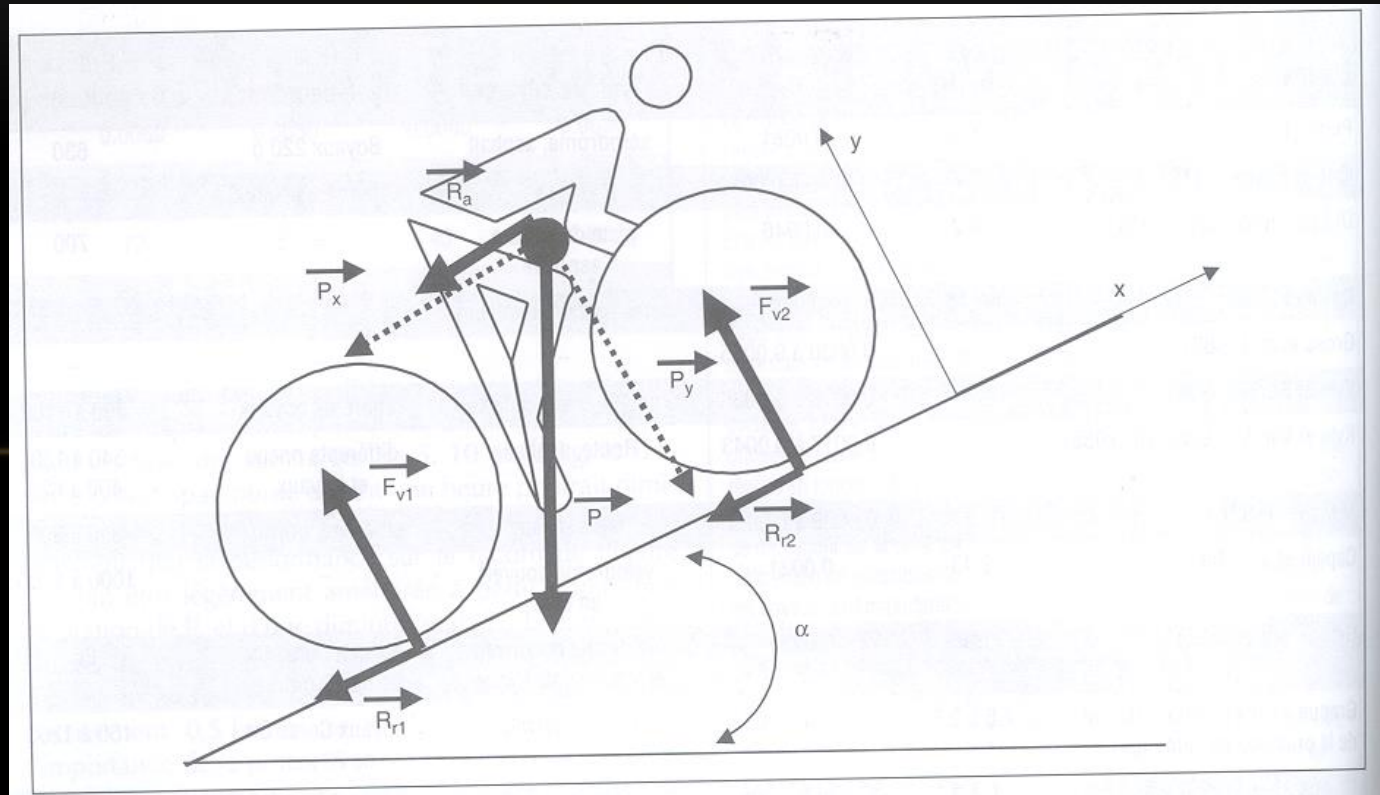
Les
résistances
aérodynami-
ques

Résistances
qui
s'appliquent
sur le
cycliste

La technique
de pédalage

La fréquence
de pédalage

La position



R_a : traînée

R_{r1} et R_{r2} : résistances au roulement appliquées sur
chaque pneu

F_{v1} et F_{v2} : force verticale appliquée sur chaque pneu

Le pédalage

Les 4 phases du cycle de pédalage

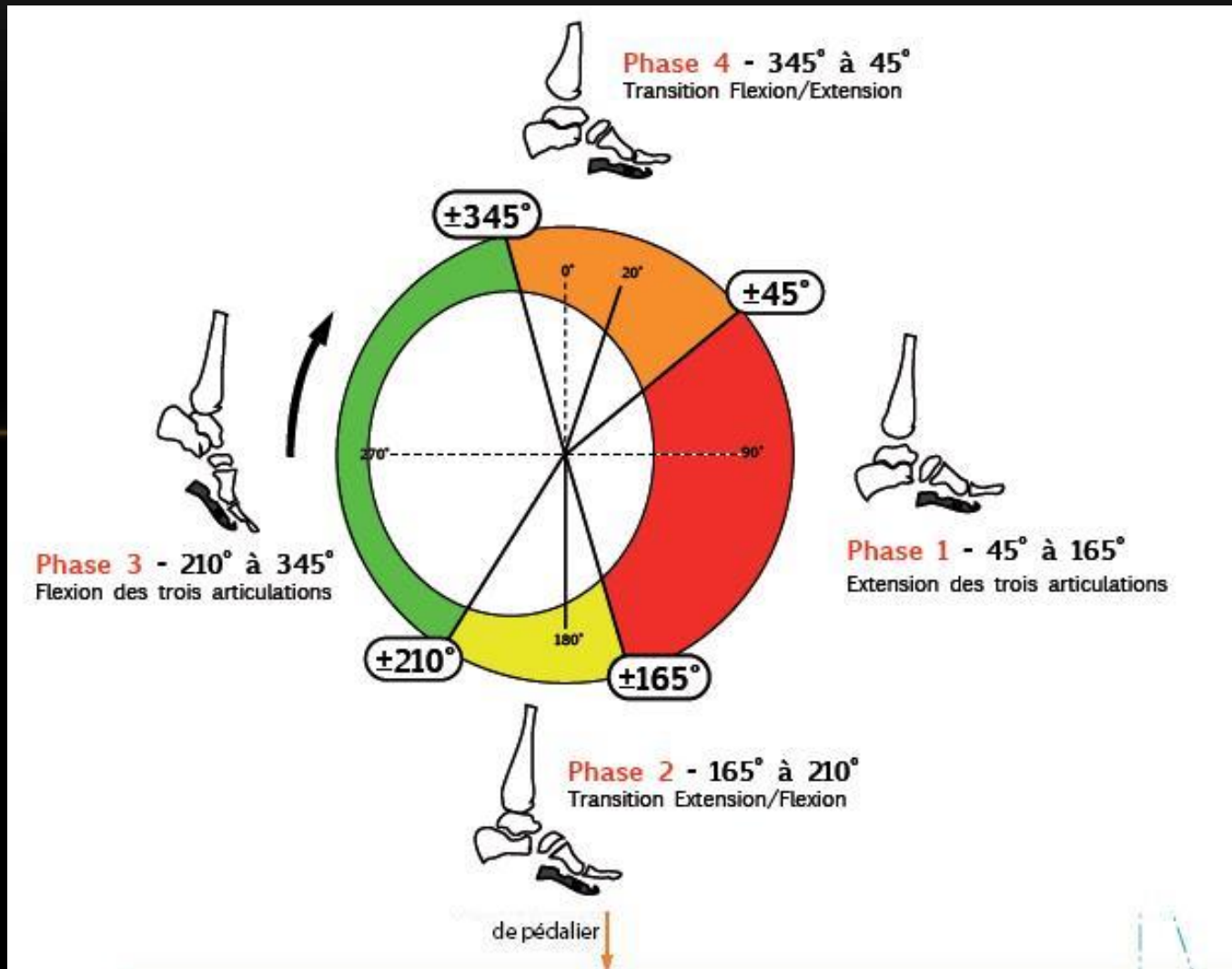
Les résistances aérodynamiques

Résistances qui s'appliquent sur le cycliste

La technique de pédalage

La fréquence de pédalage

La position



Le pédalage

Pattern de pédalage

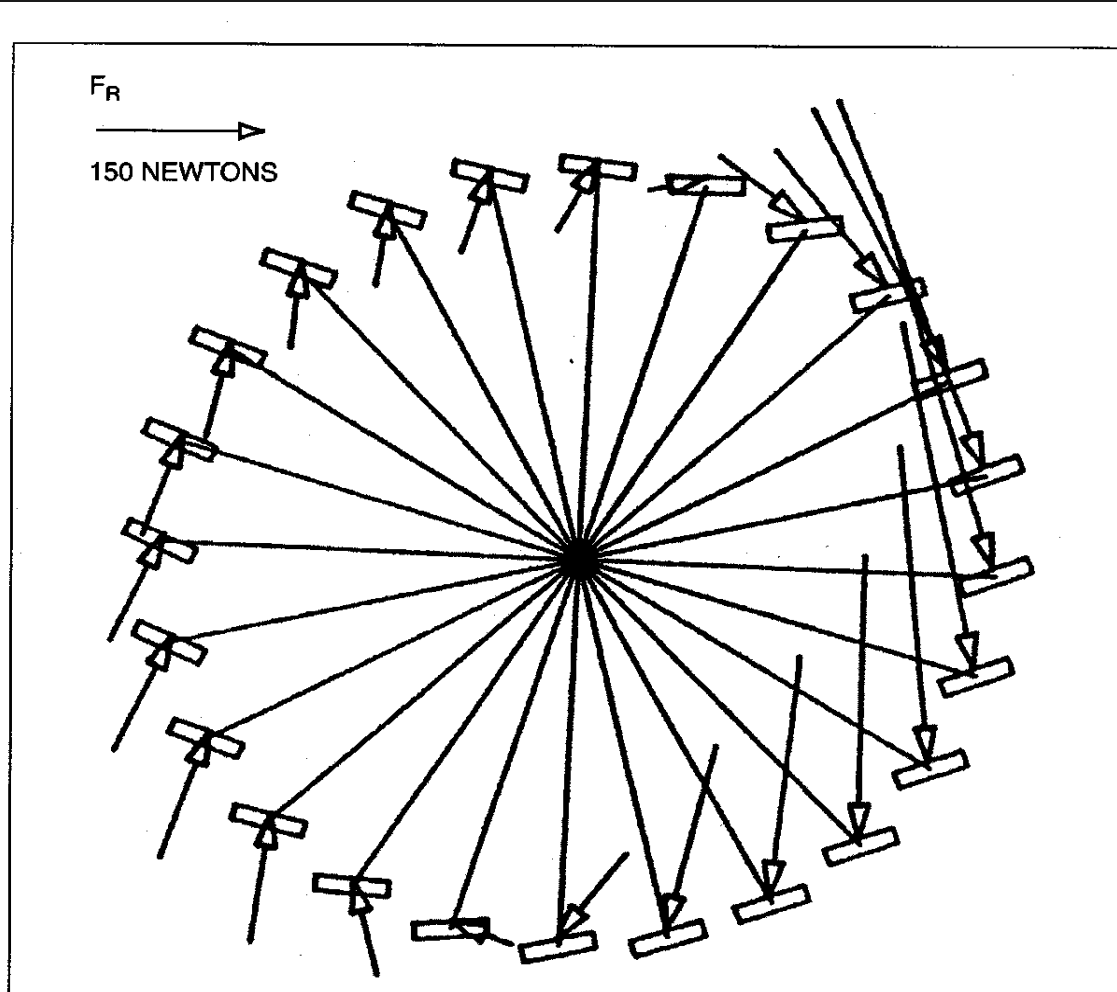
Les résistances aérodynamiques

Résistances qui s'appliquent sur le cycliste

La technique de pédalage

La fréquence de pédalage

La position



Représentation du pattern de pédalage en fonction de la force résultante appliquée sur la pédale (Grappe, 2005)

Le pédalage

Couple moteur

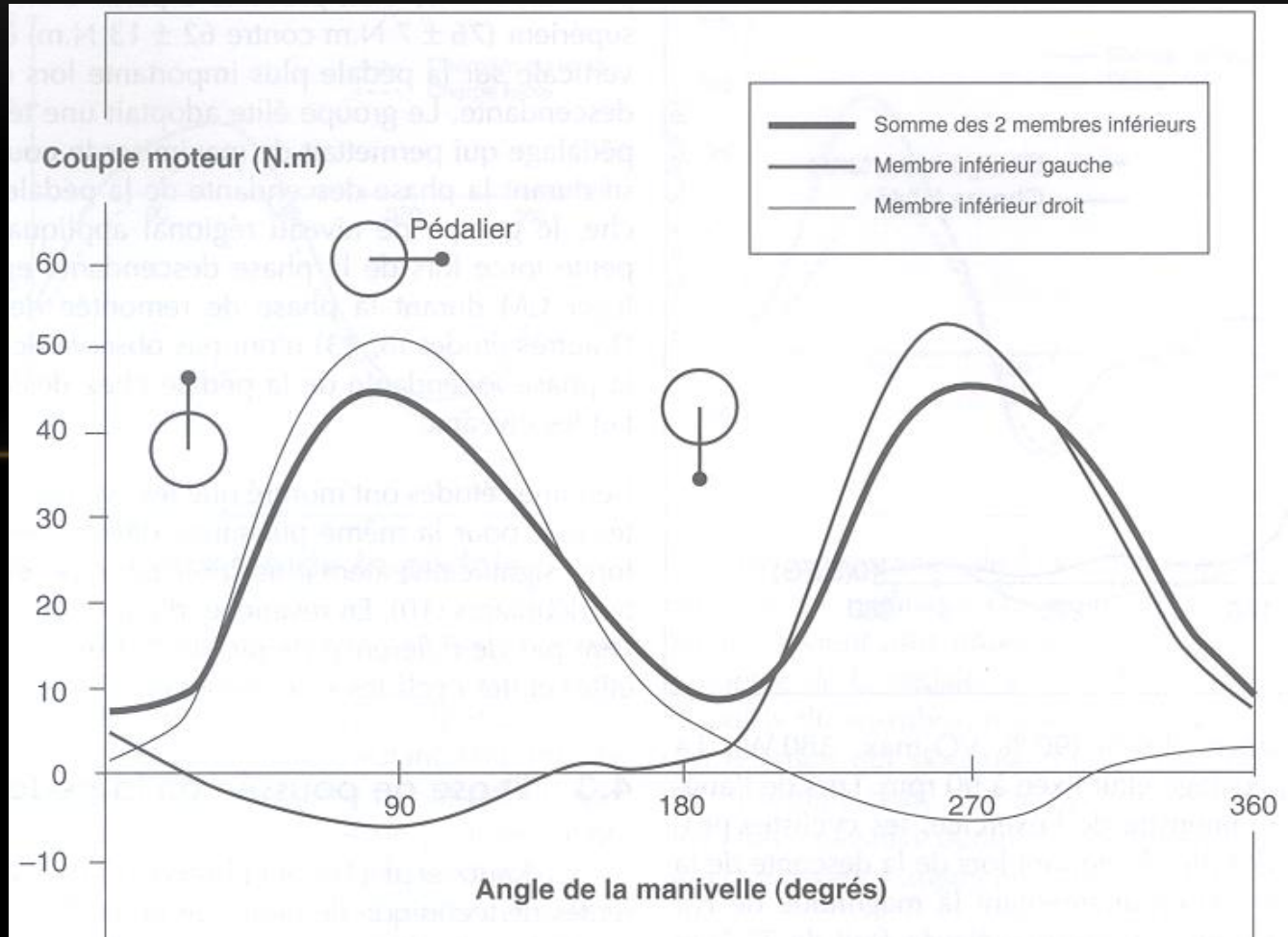
Les résistances aérodynamiques

Résistances qui s'appliquent sur le cycliste

La technique de pédalage

La fréquence de pédalage

La position



Evolution du couple moteur : la courbe en gras représente le CM des deux membres inférieurs (Grappe, 2005)

Le pédalage

Les muscles impliqués

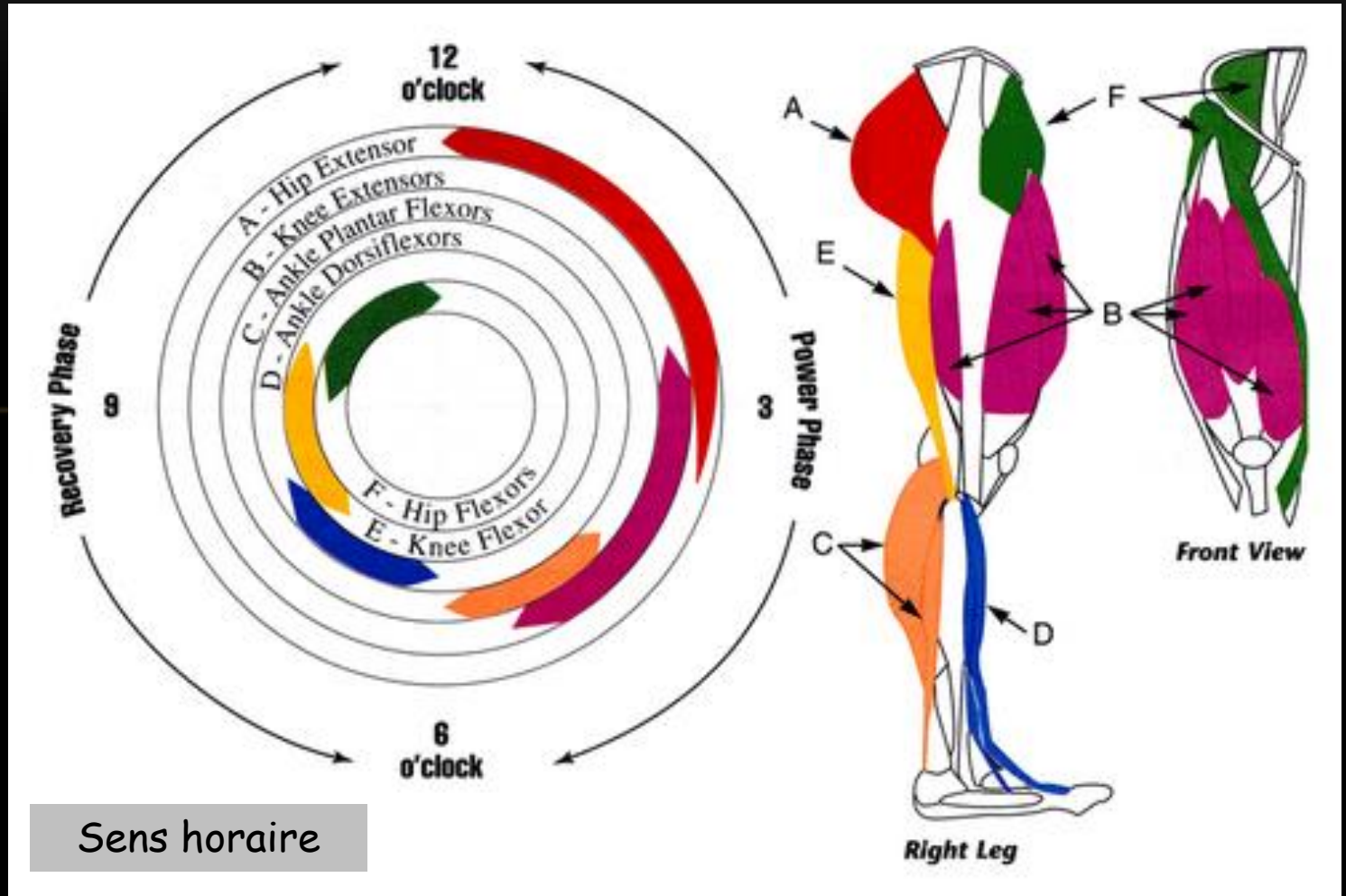
Les résistances aérodynamiques

Résistances qui s'appliquent sur le cycliste

La technique de pédalage

La fréquence de pédalage

La position



Le pédalage

Visualisation

Les résistances aérodynamiques

Résistances qui s'appliquent sur le cycliste

La technique de pédalage

La fréquence de pédalage

La position



Léger
mouvement
en avant

Le pédalage

Lance Armstrong

Les résistances aérodynamiques

Résistances qui s'appliquent sur le cycliste

La technique de pédalage

La fréquence de pédalage

La position



On remarque la souplesse de la cheville et un talon qui remonte très haut

La fréquence de pédalage

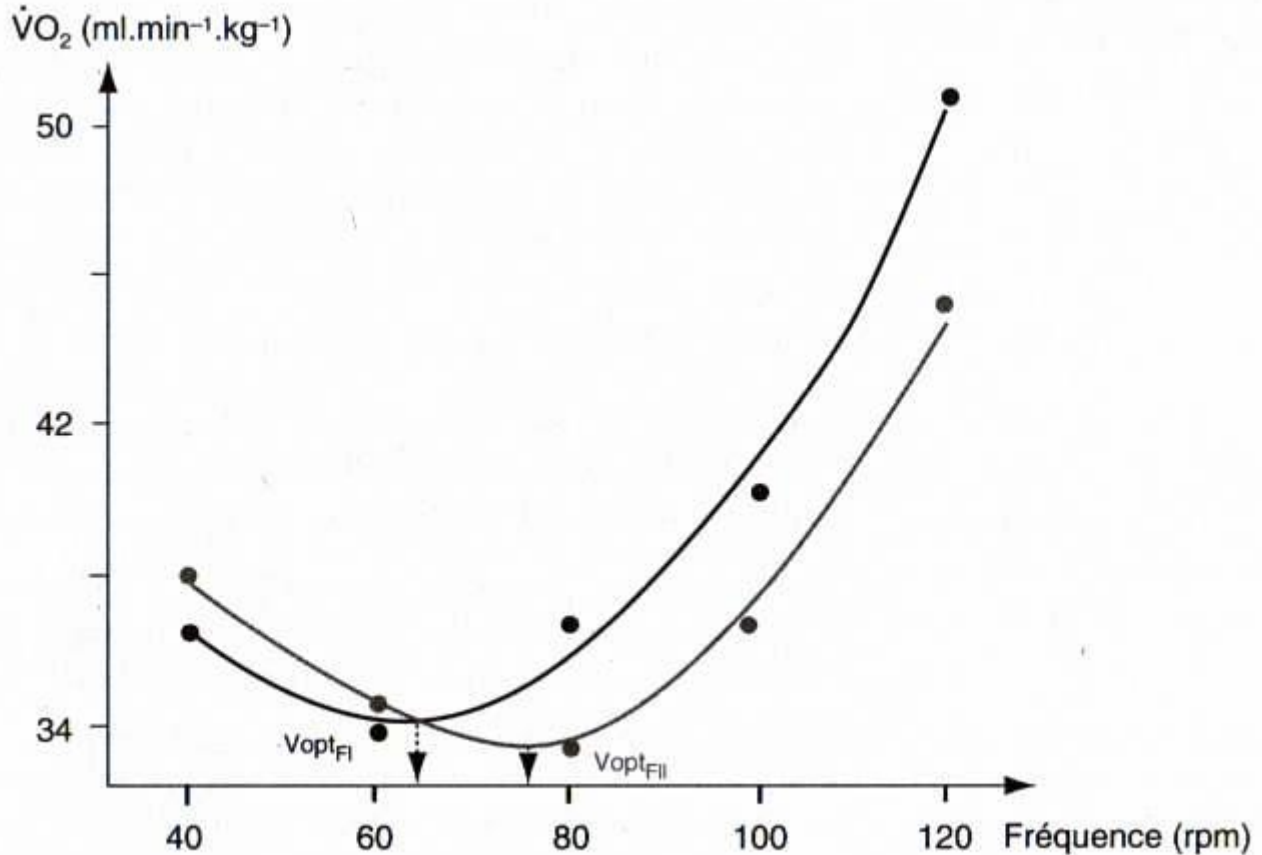
Les résistances aérodynamiques

Résistances qui s'appliquent sur le cycliste

La technique de pédalage

La fréquence de pédalage

La position



Relations entre la consommation d'oxygène et la fréquence de pédalage : la fréquence de pédalage est obtenue pour des cadences faibles (entre 60 et 80 rpm).

La fréquence de pédalage

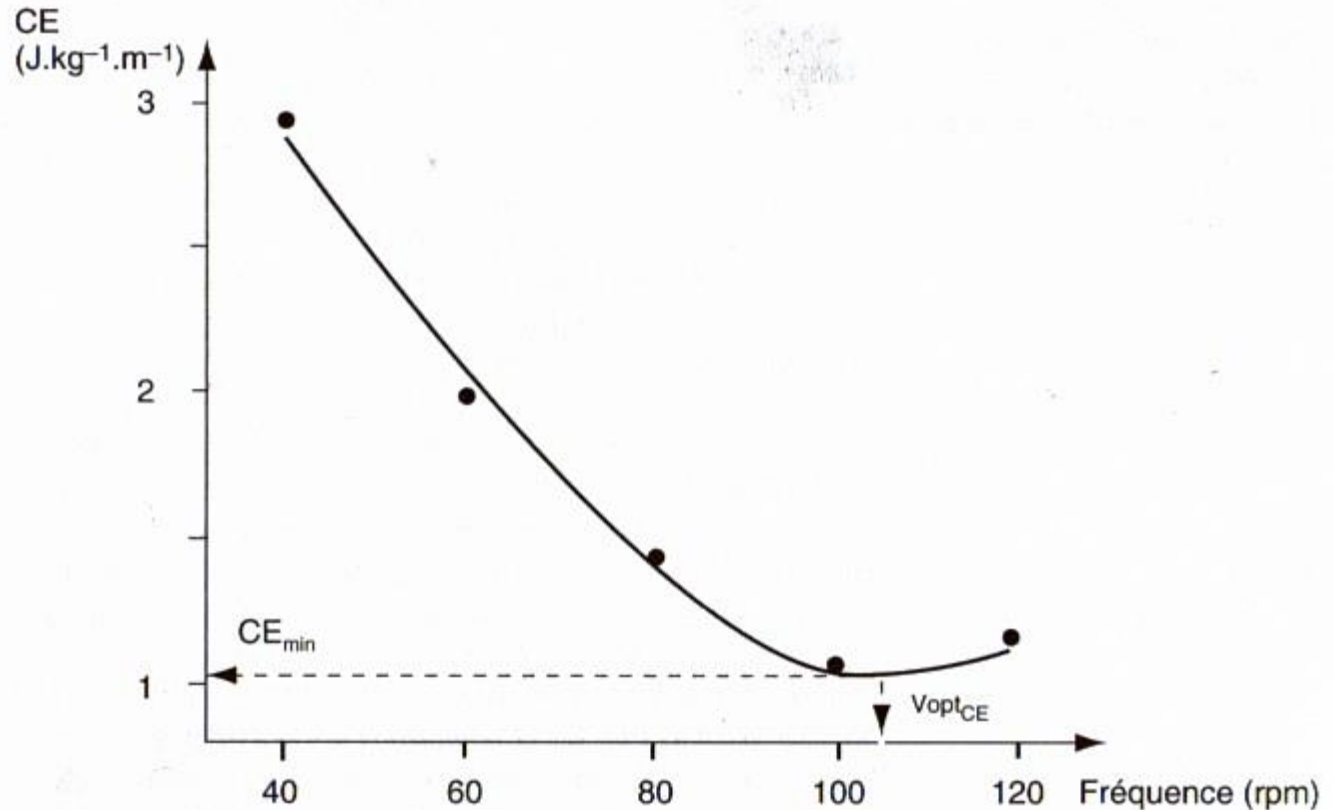
Les résistances aérodynamiques

Résistances qui s'appliquent sur le cycliste

La technique de pédalage

La fréquence de pédalage

La position



Relation parabolique entre le coût énergétique du déplacement et la fréquence de pédalage lors d'un test sous la seuil anaérobie. Les flèches illustrent les valeurs de CE minimale et de fréquence optimale correspondante → vers 105 rpm (Belli et Hintzy, 2002).

La fréquence de pédalage

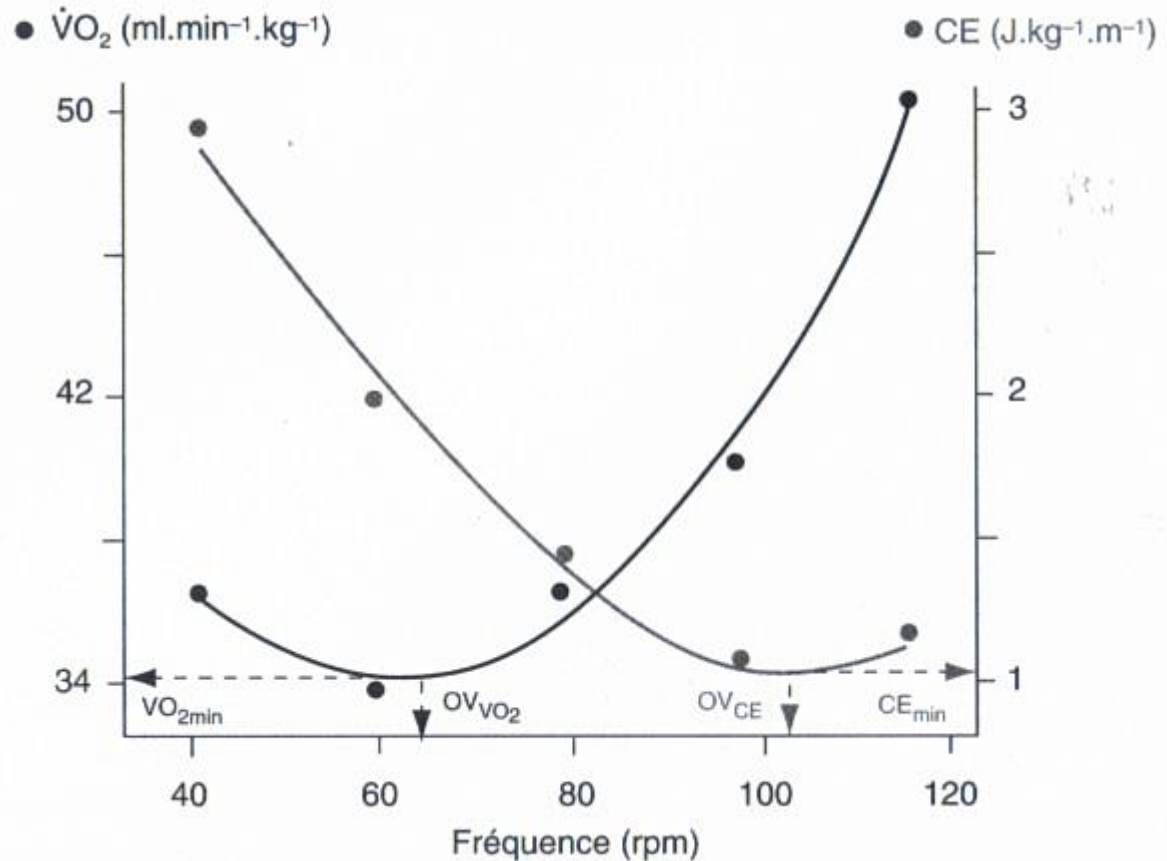
Les résistances aérodynamiques

Résistances qui s'appliquent sur le cycliste

La technique de pédalage

La fréquence de pédalage

La position



Synthèse des deux tableaux précédents

La fréquence de pédalage

Type d'effort	Situation de course	Classement effort	Fréquence optimale
Allure maximale explosive	Sprint	I7	130-180 rpm
Allure très élevée très courte	Prologue	I5	110 rpm
Allure élevée au seuil sur le plat	CLM	I4	100-105 rpm
Allure élevée au seuil en côte	Montée de col	I4	80-90 rpm
Allure modérée ou soutenue		I2, I3	80 rpm
Allure promenade		I1	60-70 rpm

« Il n'existe pas une fréquence optimale de pédalage en cyclisme, mais plusieurs fréquences optimales minimisant chacune une contrainte spécifique liée à la situation de terrain (...) La cadence optimale de pédalage dépend de la puissance développée, de la géographie du terrain, de la typologie musculaire et de la technique de pédalage » (F.Hintzy & F.Grappe, 2009).

Les résistances aérodynamiques

Résistances qui s'appliquent sur le cycliste

La technique de pédalage

La fréquence de pédalage

La position

La position

Les
résistances
aérodynami-
ques

Résistances
qui
s'appliquent
sur le
cycliste

La technique
de pédalage

La fréquence
de pédalage

La position