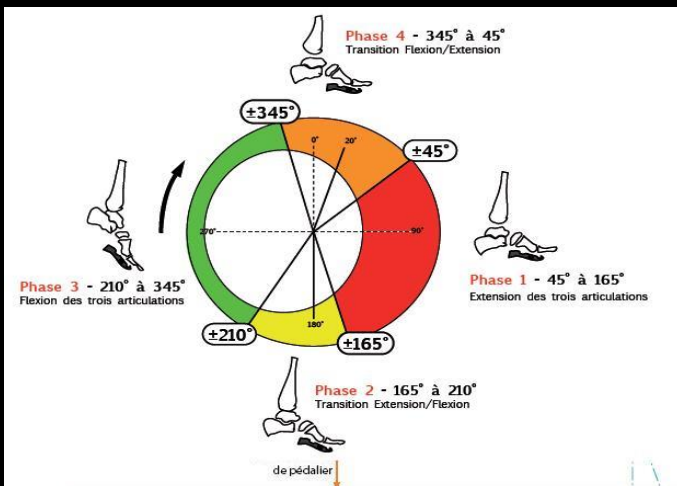
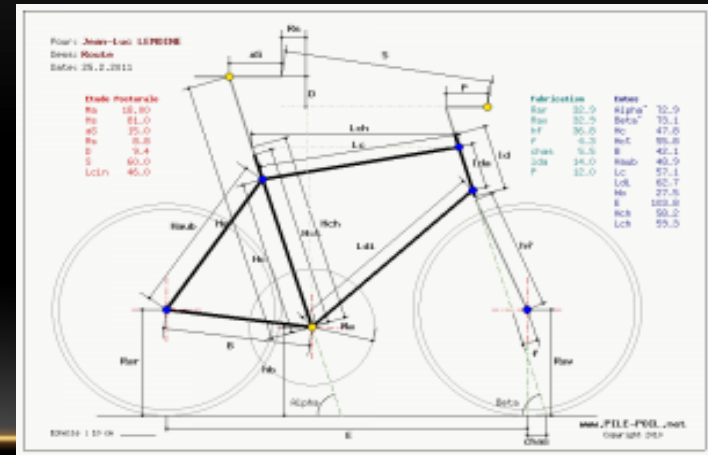
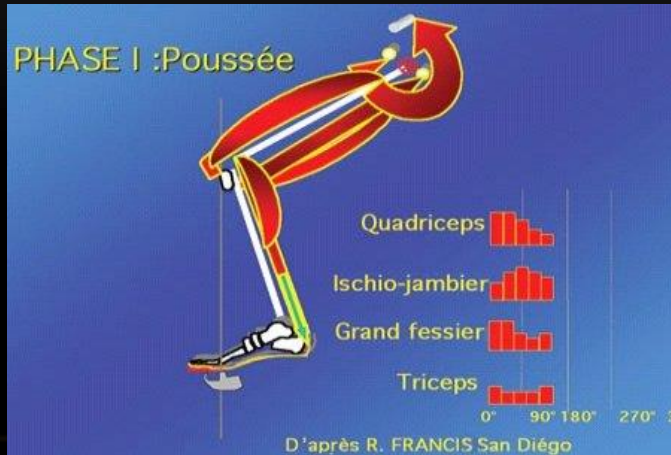


Biomécanique du cyclisme



Les résistances aérodynamiques

Les
résistances
aérodynami-
ques

Résistances
qui
s'appliquent
sur le
cycliste

La technique
de pédalage

La fréquence
de pédalage

La position

[https://www.youtube.com/
watch?v=DcRLHSmqTpl](https://www.youtube.com/watch?v=DcRLHSmqTpl)

Les résistances aérodynamiques

Les
résistances
aérodynami-
ques

Résistances
qui
s'appliquent
sur le
cycliste

La technique
de pédalage

La fréquence
de pédalage

La position

$$Ra = SCx \times \rho / 2 \times Va^2$$

Ra = traînée aérodynamique,

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

Cx = 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,

→ **SCx représente donc la surface frontale effective**

ρ = densité de l'air = à 1.23 kg/m^3 au niveau de la mer contre $0,93 \text{ kg/m}^3$ 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),

Va = somme de la vitesse de déplacement (Vd) et de la vitesse du vent (Vv).

Les résistances aérodynamiques

Les
résistances
aérodynami-
ques

Résistances
qui
s'appliquent
sur le
cycliste

La technique
de pédalage

La fréquence
de pédalage

La position

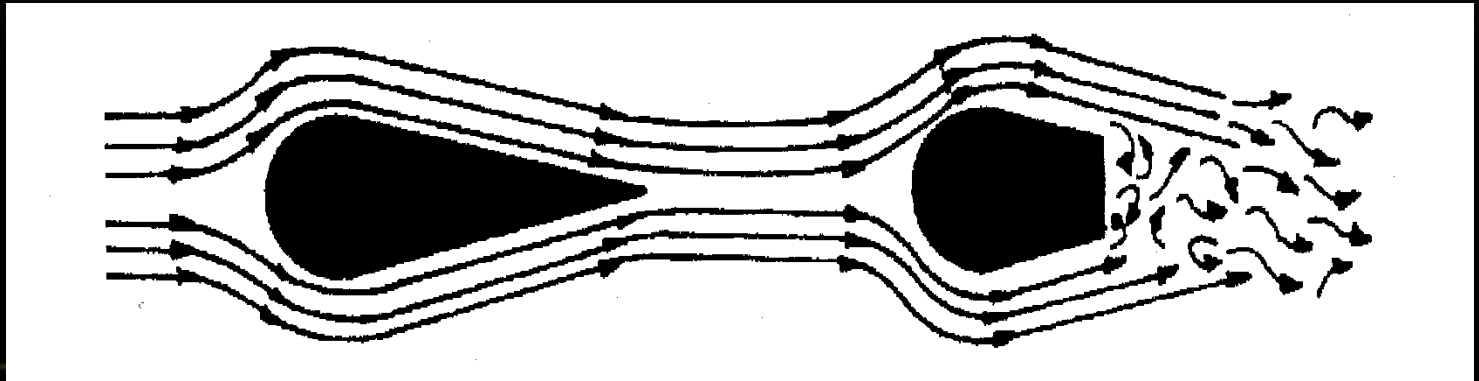


Illustration de l'écoulement de l'air :

- 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

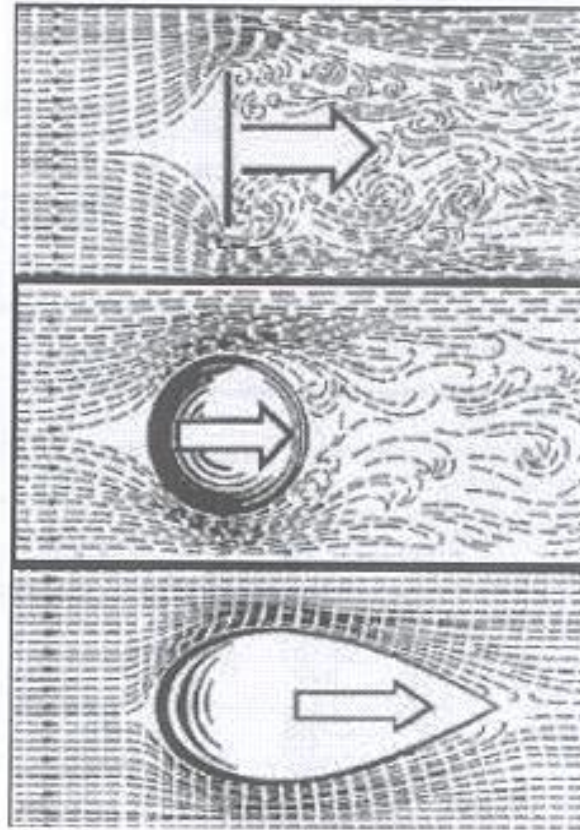
Les
résistances
aérodynami-
ques

Analyse
psycho-
sociale

Analyse
neurophy-
siologique

Analyse
cognitive

Analyse
didactique



Plaque : $C_x = 1$

Sphère : $C_x = 0.2$

Profil aérodynamique : $C_x = 0.04$

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

Les résistances aérodynamiques

Les résistances aérodynamiques

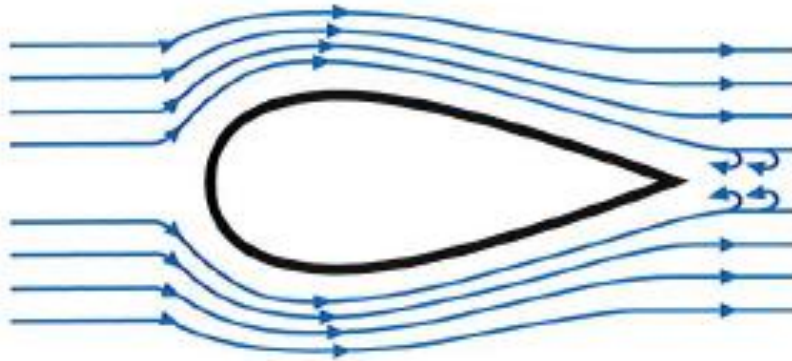
Résistances qui s'appliquent sur le cycliste

La technique de pédalage

La fréquence de pédalage

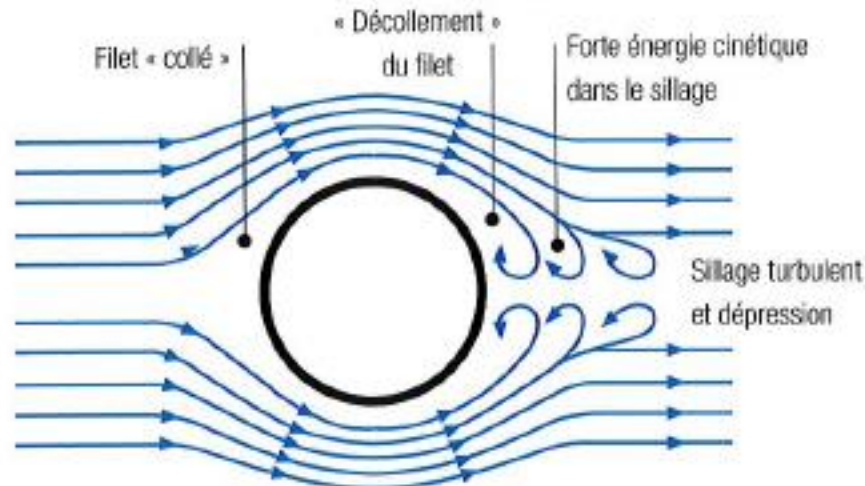
La position

Fourreau de fourche profilé



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.

Fourreau de fourche cylindrique



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

Les résistances aérodynamiques

Les résistances aérodynamiques

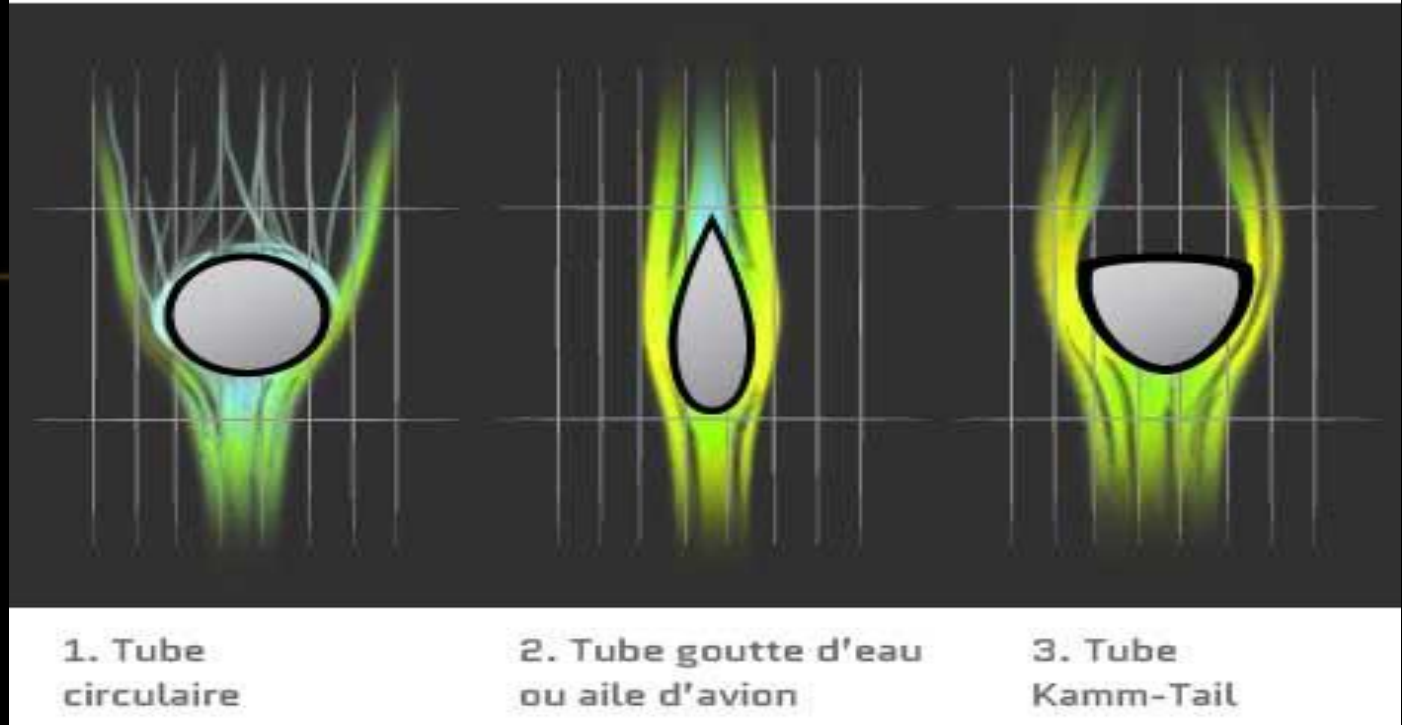
Résistances qui s'appliquent sur le cycliste

La technique de pédalage

La fréquence de pédalage

La position

Comment l'aérodynamisme a remodelé les tubes de vélo



Les résistances aérodynamiques

Les
résistances
aérodynami-
ques

Résistances
qui
s'appliquent
sur le
cycliste

La technique
de pédalage

La fréquence
de pédalage

La position



Profil kamm tail

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

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
aérodynami-
ques

Résistances
qui
s'appliquent
sur le
cycliste

La technique
de pédalage

La fréquence
de pédalage

La position

Les résistances aérodynamiques

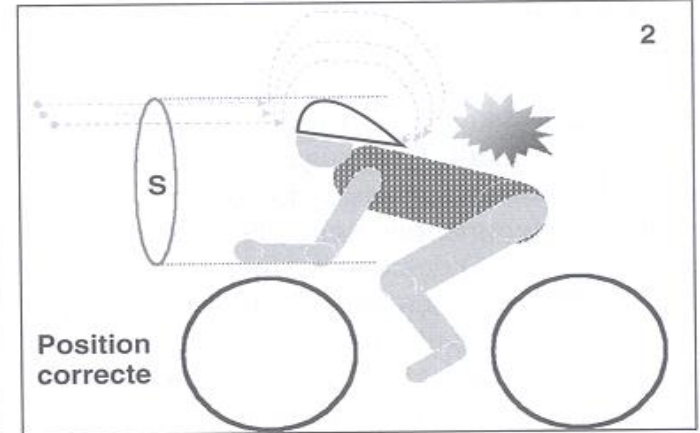
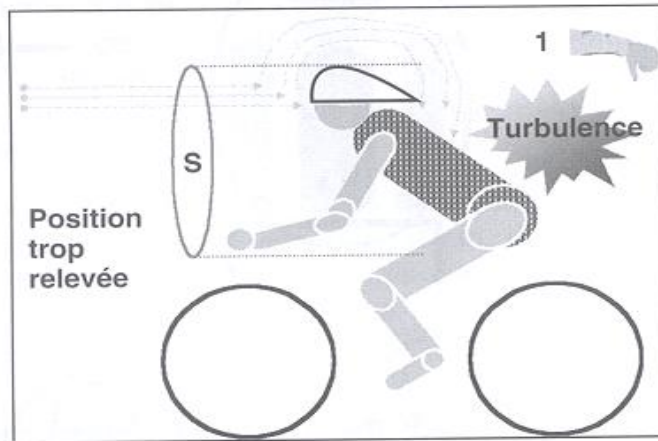
Les résistances aérodynamiques

Résistances qui s'appliquent sur le cycliste

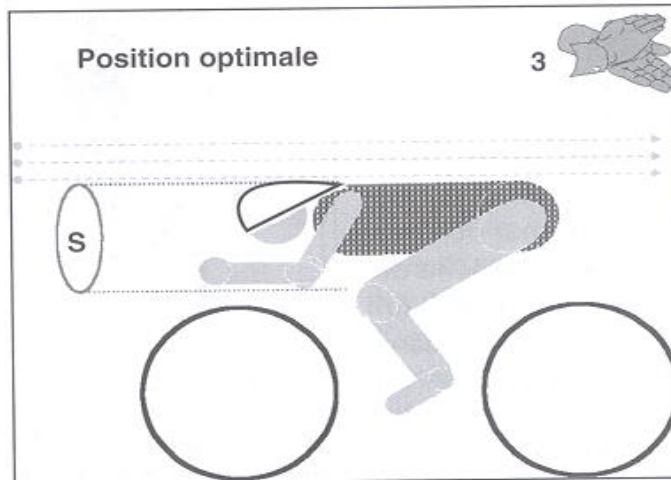
La technique de pédalage

La fréquence de pédalage

La position



En pointillés sont symbolisés les filets d'air



En gris est matérialisée la zone de turbulence derrières le dos

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

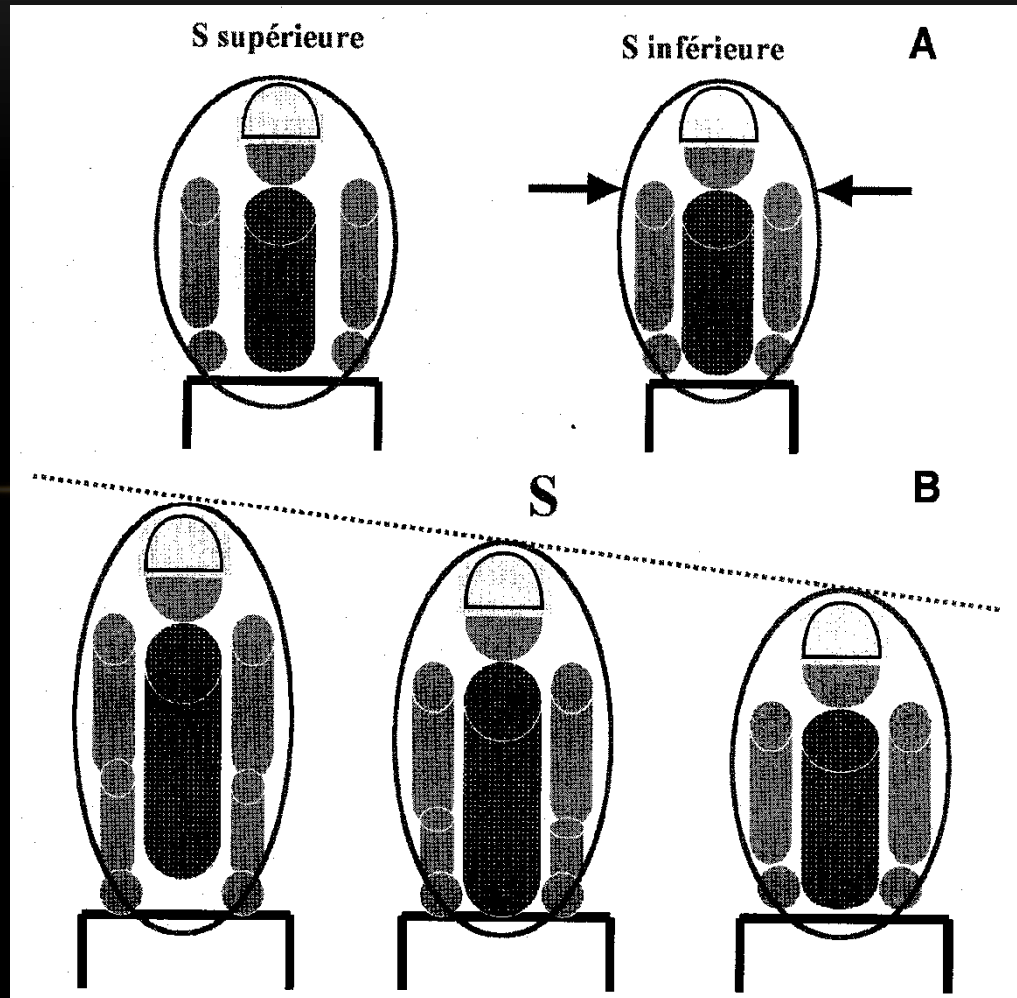
Les résistances aérodynamiques

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
aérodynami-
ques

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
aérodynami-
ques

Résistances
qui
s'appliquent
sur le
cycliste

La technique
de pédalage

La fréquence
de pédalage

La position



Cette roue possède sur les côté des jantes des motifs alvéolés censés améliorer l'efficacité aérodynamique. C'est le principe des balles de golf : les flux d'air restent collés à la structure au lieu d'être soumis à des turbulences

Les résistances aérodynamiques

Les
résistances
aérodynami-
ques

Résistances
qui
s'appliquent
sur le
cycliste

La technique
de pédalage

La fréquence
de pédalage

La position



Ces roues « aéro » ont des jantes en forme de vague censées améliorer l'aérodynamisme et la stabilité en vent latéral

Les résistances aérodynamiques

Les derniers champions du monde

Les
résistances
aérodynami-
ques

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 Kiryienka 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



Filippo Ganna 2020



Filippo Ganna 2021

Les résistances aérodynamiques

Les derniers champions du monde

Les
résistances
aérodynami-
ques

Résistances
qui
s'appliquent
sur le
cycliste

La technique
de pédalage

La fréquence
de pédalage

La position



Tobias Foss 2022



Remco Evenepoel 2023



Remco Evenepoel 2024



Remco Evenepoel 2025

Les résistances aérodynamiques

Les
résistances
aérodynami-
ques

Résistances
qui
s'appliquent
sur le
cycliste

La technique
de pédalage

La fréquence
de pédalage

La position



Vue de face

Filippo Ganna: position aérodynamique avec les avant-bras très resserrés et une position « de l'œuf » (comme un skieur de descente)

Les résistances aérodynamiques

Les
résistances
aérodynami-
ques

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

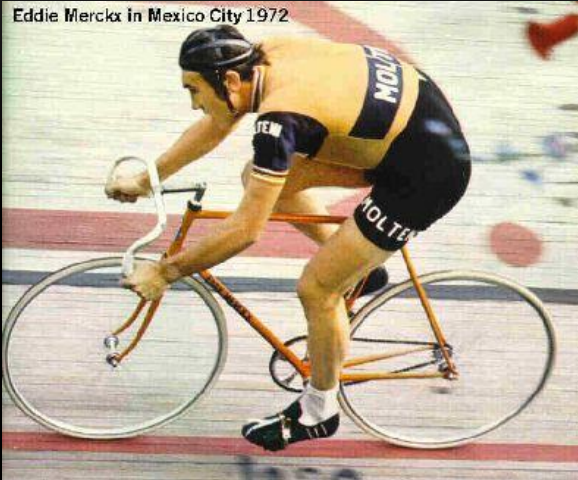
Les
résistances
aérodynami-
ques

Résistances
qui
s'appliquent
sur le
cycliste

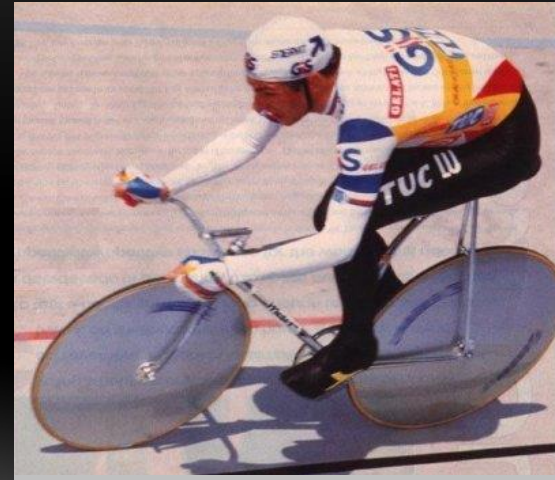
La technique
de pédalage

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
aérodynami-
ques

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
aérodynami-
ques

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**



**Mathias Brandle en 2014 :
51,850 km**



**Rohan Dennis en 2015 :
52,491 km**

Les résistances aérodynamiques

Evolution du record de l'heure

Les
résistances
aérodynami-
ques

Résistances
qui
s'appliquent
sur le
cycliste

La technique
de pédalage

La fréquence
de pédalage

La position



**Victor Campenaerts en 2019 :
55,089 km (à Mexico)**



**Filippo Ganna en 2022 : 56,792
km (à Granges)**



Les
résistances
aérodynami-
ques

Résistances
qui
s'appliquent
sur le
cycliste

La technique
de pédalage

La fréquence
de pédalage

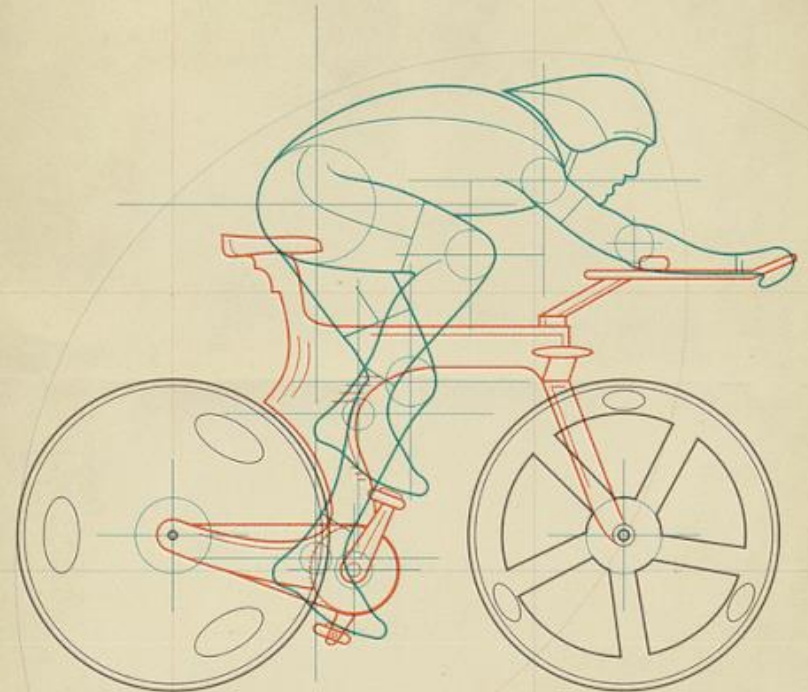
La position

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
aérodynami-
ques

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
aérodynami-
ques

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

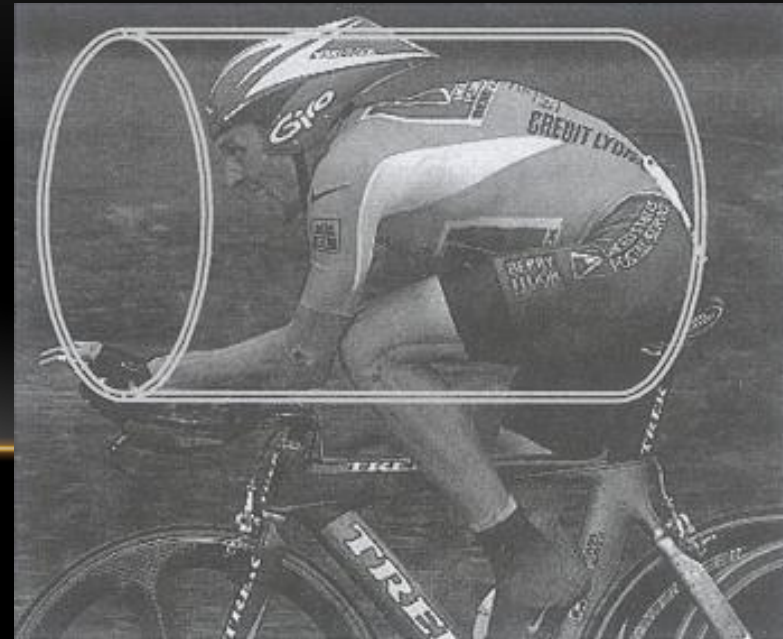
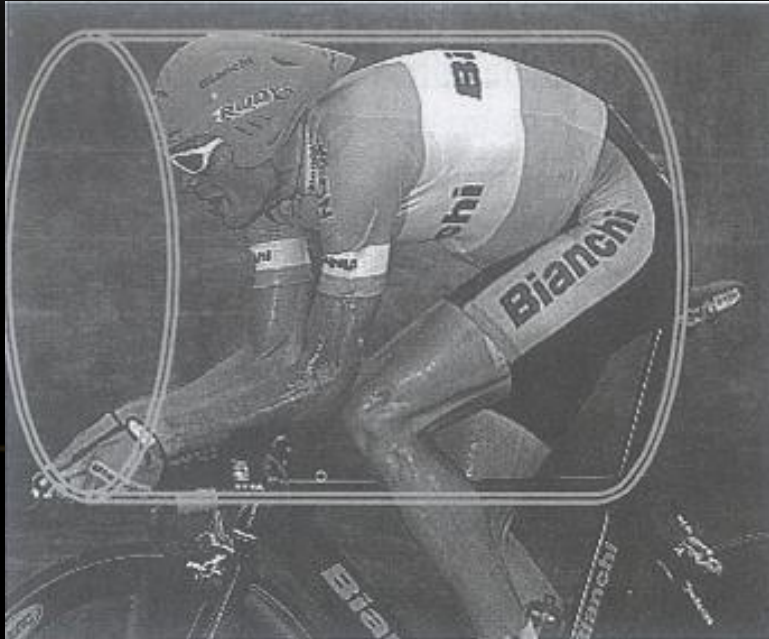
Les
résistances
aérodynami-
ques

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

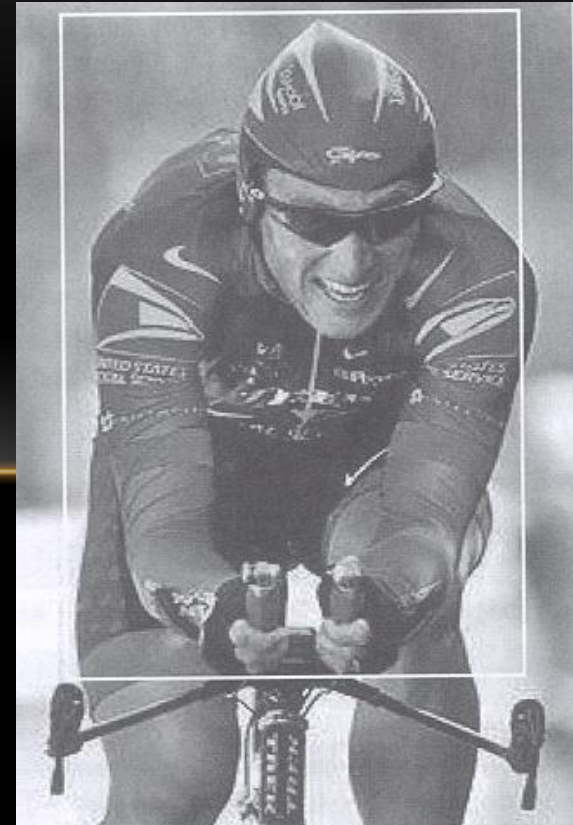
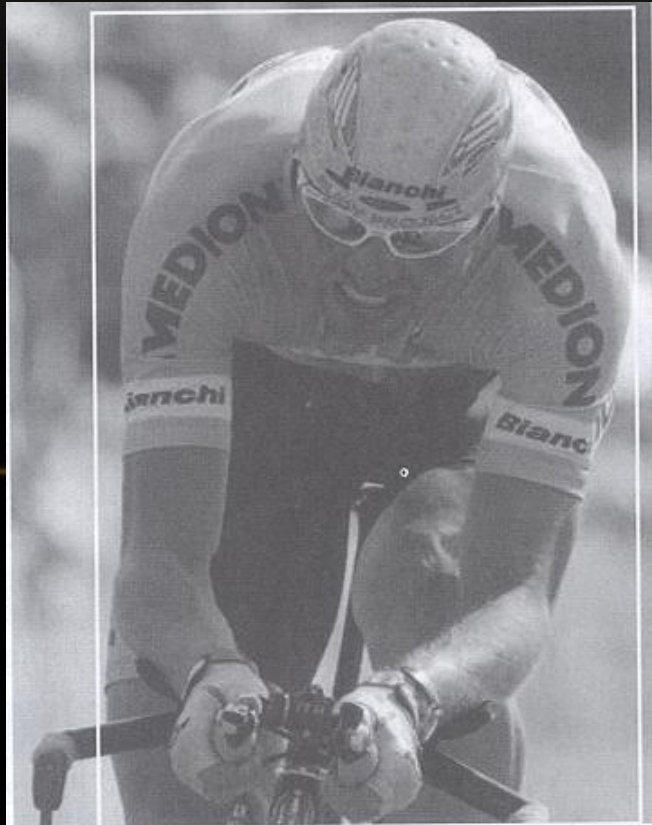
Les
résistances
aérodynami-
ques

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

Les
résistances
aérodynami-
ques

Résistances
qui
s'appliquent
sur le
cycliste

La technique
de pédalage

La fréquence
de pédalage

La position



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

Les records de vitesse

Les résistances aérodynamiques

Résistances qui s'appliquent sur le cycliste

La technique de pédalage

La fréquence de pédalage

La position



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



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

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

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 Bissini le 3 août sur circuit allemand. Il débute, ainsi qu'il record à domicile à bord de l'Eiviestretto, prototype conçu avec le Slovène Damjan Jozabek. « Je suis couché la tête en avant pour améliorer l'aérodynamisme du vélo », explique Francesco Bissini, tout en étant serré dans le carénage d'un de ces tubes qui recouvrent la surface frontale offerte au vent. Un profil de fusée qui permet à ce type de vélotype d'atteindre des vitesses impressionnantes, le record sur 200 mètres dépassant les 190 km/h.

Roue avant directrice
Diamètre 34 cm. Largeur 30 mm.
Pne de Bouchelle, 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 (gain d'environ 50% par rapport à un vélo couché confort avec la tête dans le sens de la route).

Guidon asymétrique
Équipé d'un axe qui part de la gauche et qui va jusqu'à la droite de la roue. Permet de se pencher sans inverser les mouvements : le pilote tire à gauche à droite quand il veut virer à gauche ou inversement – alors que si c'était d'un étranger à gauche. Virages assez alambiqués. Quatrième avec le guidon et des 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.

Dispositif de rétrovision

Accélération de la machine

Sortie du CO₂

Vitesse

Le vélo dispose de 3 vitesses.
La première est utilisée de 0 à 35 km/h, les coups de pédale = « mètres et demi », la seconde jusqu'à 70 km/h, la troisième jusqu'à 100 km/h, même au-delà (un coup de pédale = 100 m) ; vitesse et durée.

Arrivée et départ d'air
Le cycle dispose de deux tubes.
Un type de lavant doit voler et apporter l'air frais, l'autre à l'arrière le repousse en l'éjectant vers l'arrière de l'habitacle. Le manque d'aération du carénage se traduit par de la chaleur et de la condensation.

Couque en carbone et résine époxy

Energie du tour

DISTANCE PARCOURUE EN KM

Océlyste lambda Distance moyenne parcourue en ville

Bon amateur Vélo de course Route de campagne

Jeanne Longo-Cipelli 1984 Vélo classique

Chris Brudenell 1992 Vélo classique aérodynamique

Bon Startist et Bon Rollandier 1980. Vector turbo

Barbara Hines 1984 Vélo classique

Francesco Bissini 2008 Vélo spécial circuit

INNOVATION DÉVELOPPÉE À BORDEAUX POUR AMPLIFIER LA PERFORMANCE HUMAINE

Les résistances aérodynamiques

L'abri « dans la roue »

Les
résistances
aérodynami-
ques

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

L'abri « dans la roue »

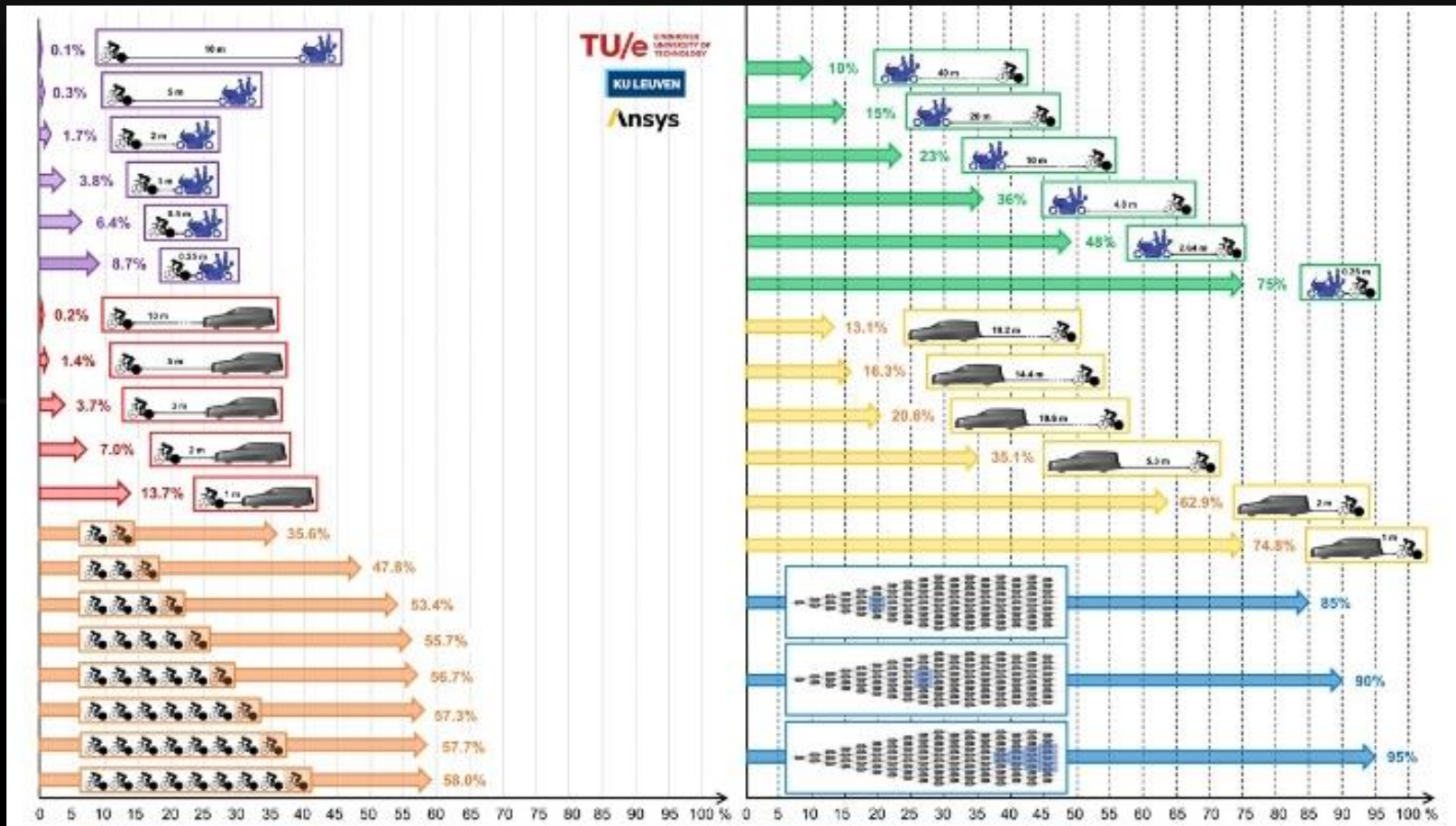
Les résistances aérodynamiques

Résistances qui s'appliquent sur le cycliste

La technique de pédalage

La fréquence de pédalage

La position



Les résistances aérodynamiques

L'abri « dans la roue »

Les
résistances
aérodynami-
ques

Résistances
qui
s'appliquent
sur le
cycliste

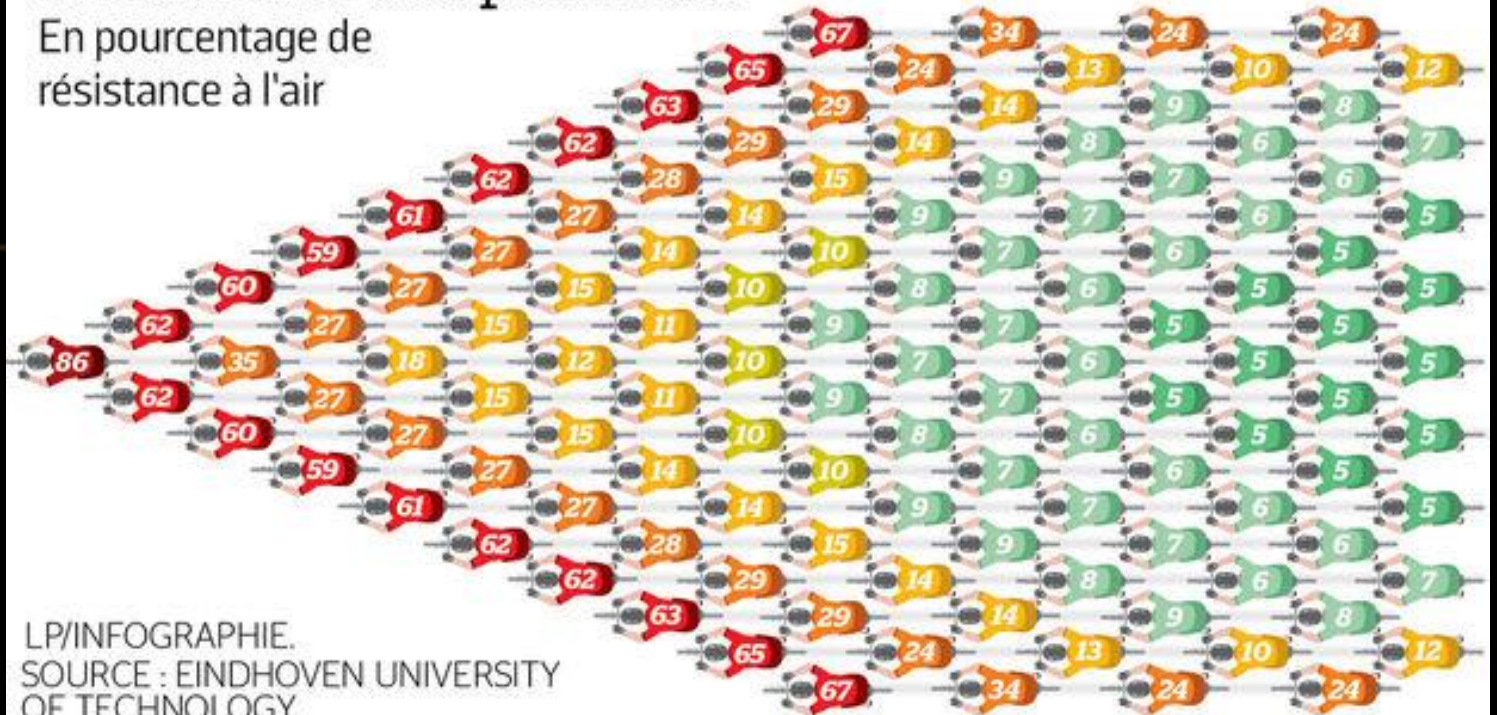
La technique
de pédalage

La fréquence
de pédalage

La position

Les meilleures places au centre et à l'arrière du peloton

En pourcentage de
résistance à l'air



Les
résistances
aérodynami-
ques

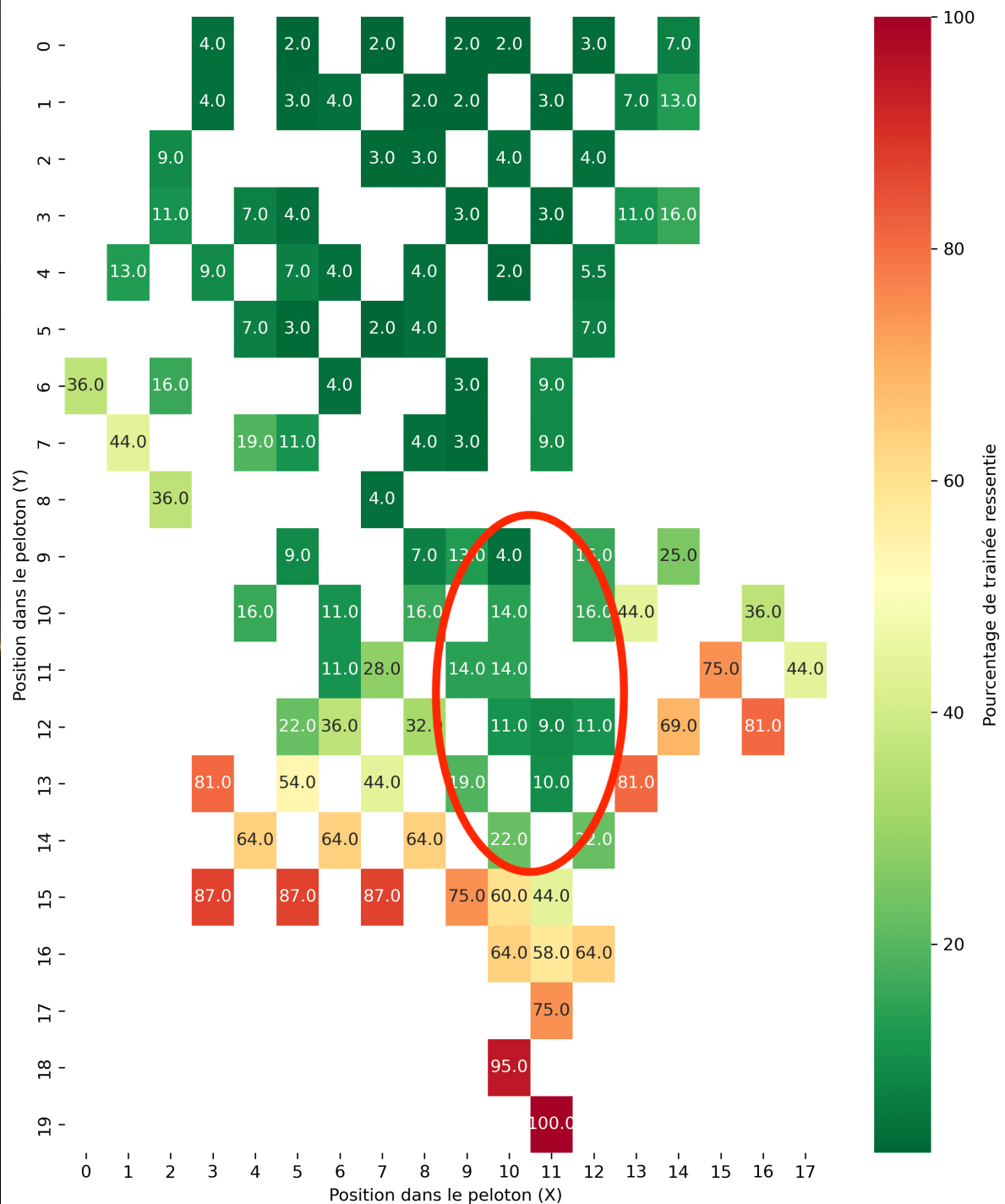
Résistances
qui
s'appliquent
sur le
cycliste

La technique
de pédalage

La fréquence
de pédalage

La position

Source : Aérodynamique
d'un peloton cycliste :
simulation CFD - EOLIOS



Les résistances aérodynamiques

Conséquences technico-tactiques

Les résistances aérodynamiques

Résistances qui s'appliquent sur le cycliste

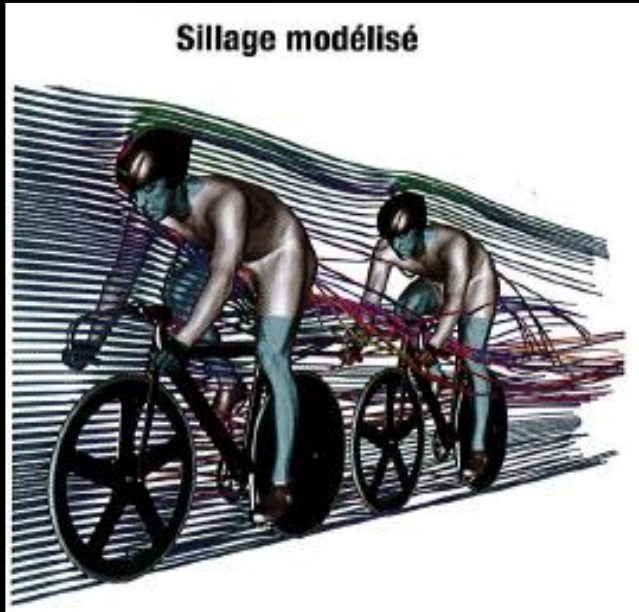
La technique de pédalage

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

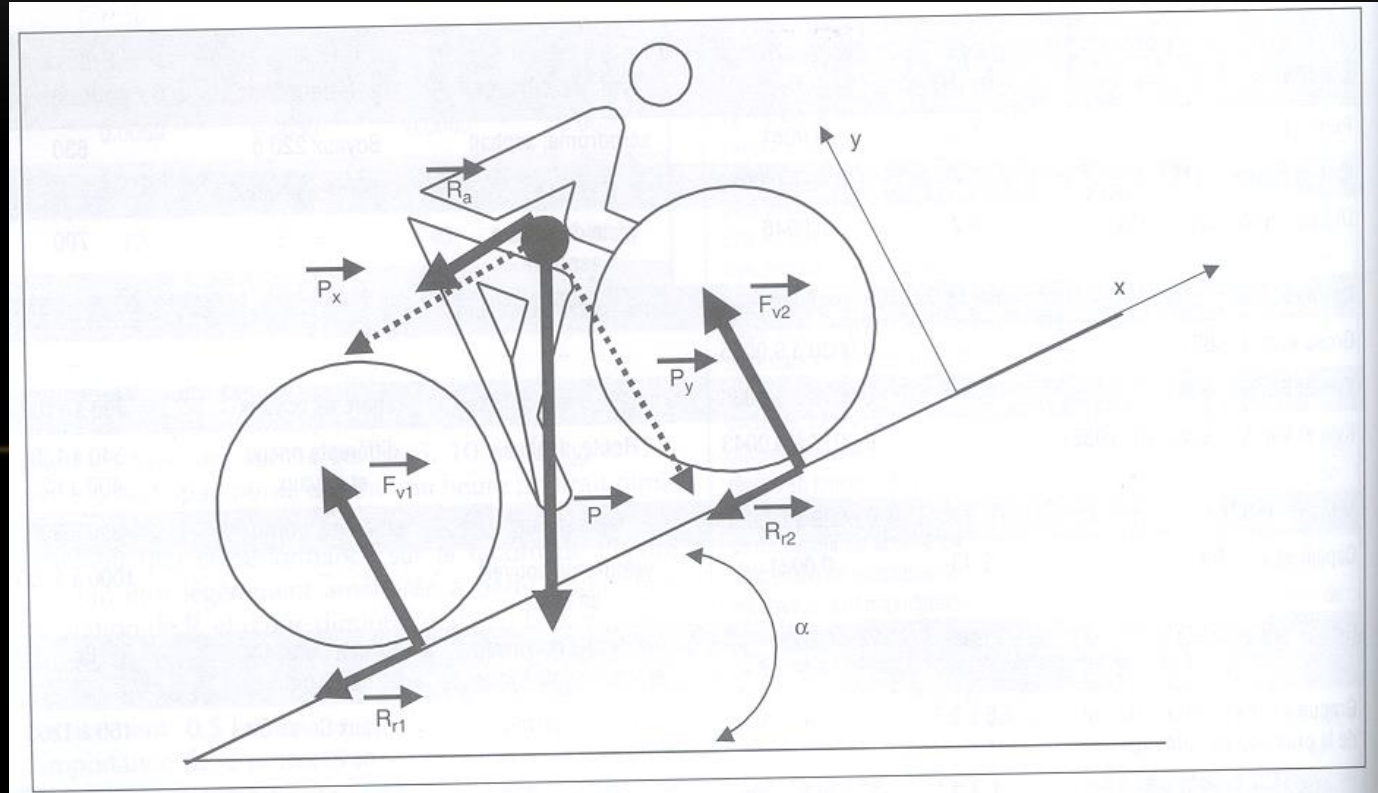
Les
résistances
aérodynami-
ques

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

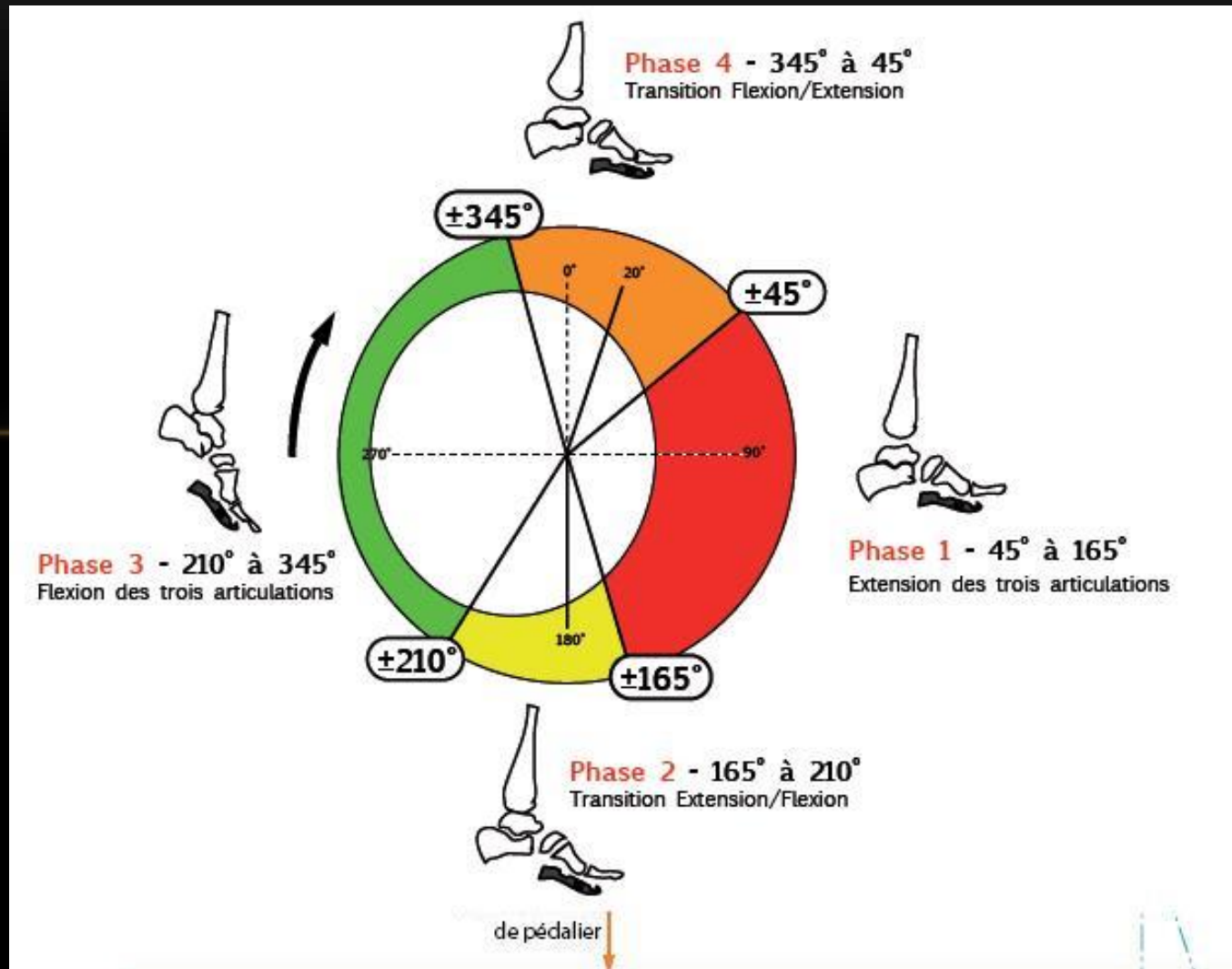
Les résistances aérodynamiques

Résistances qui s'appliquent sur le cycliste

La technique de pédalage

La fréquence de pédalage

La position



Le pédalage

Pattern de pédalage

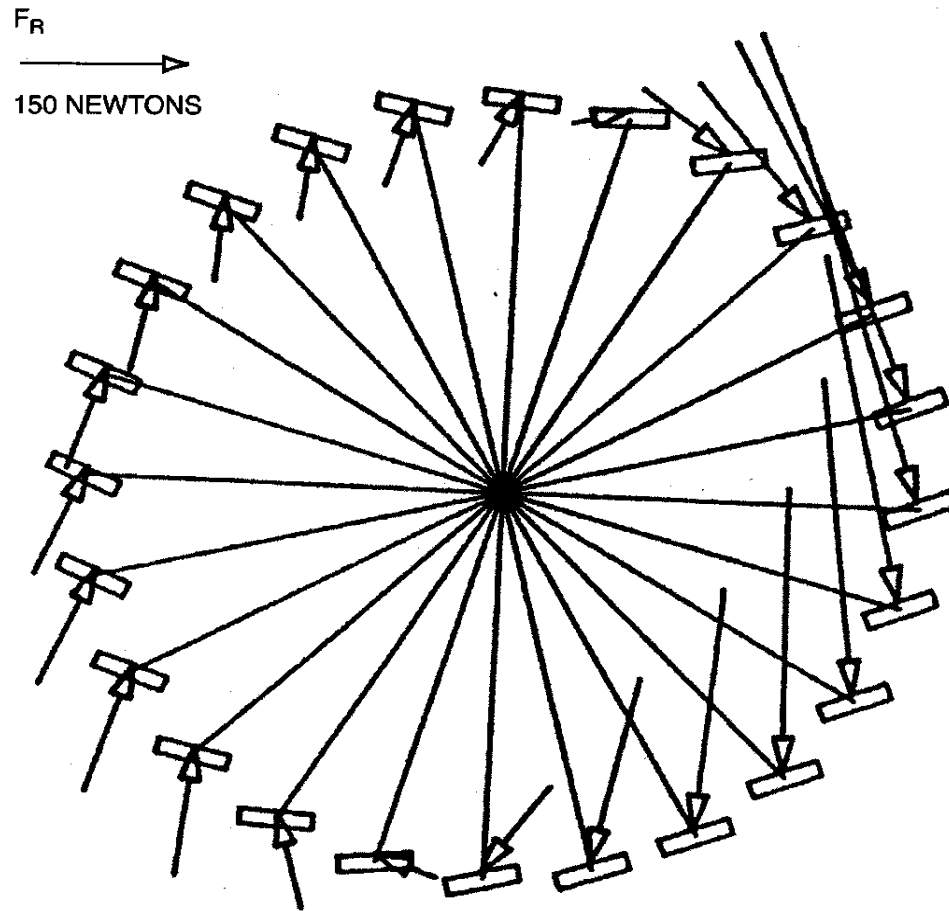
Les
résistances
aérodynami-
ques

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

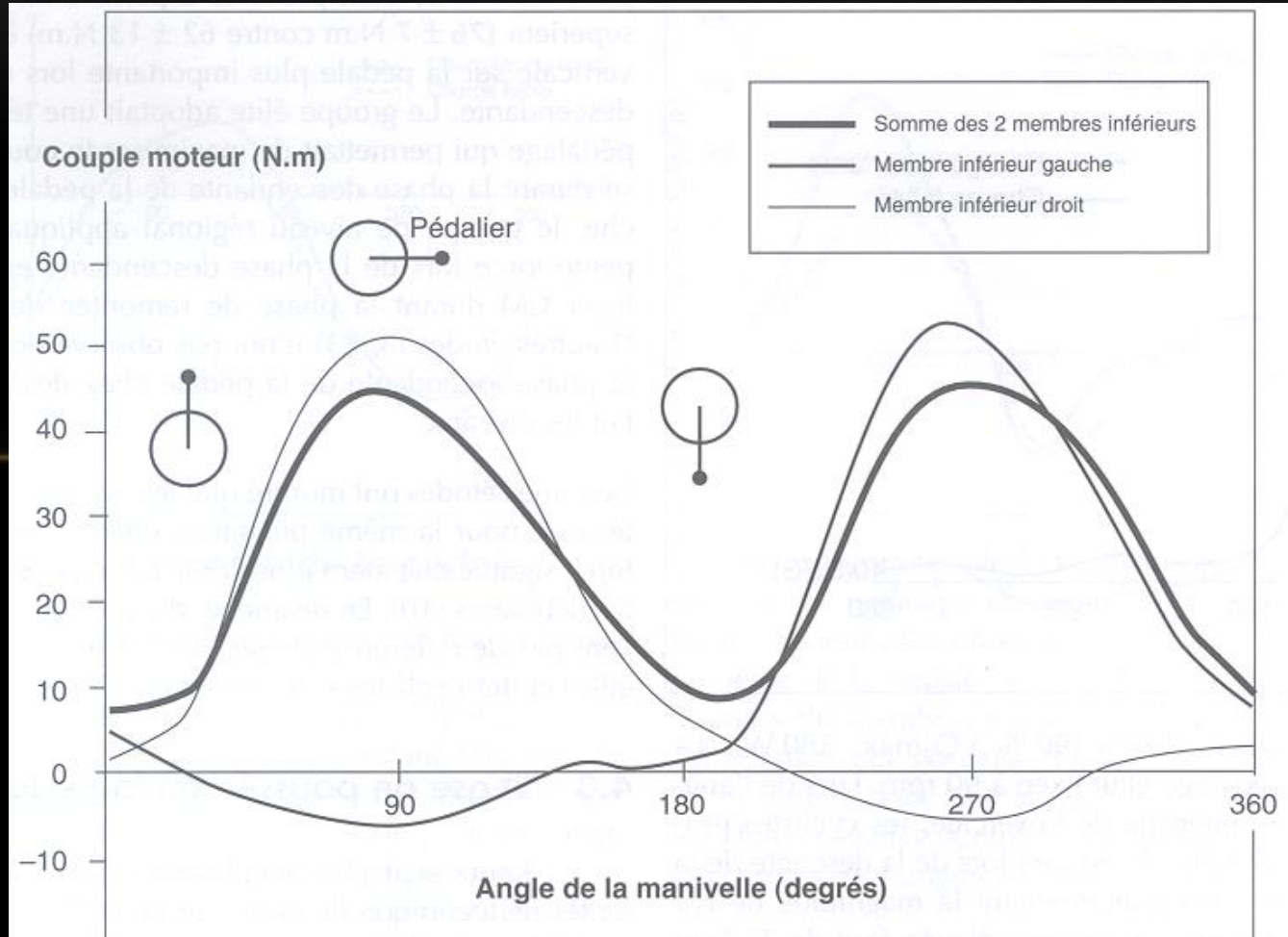
Les résistances aérodynamiques

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

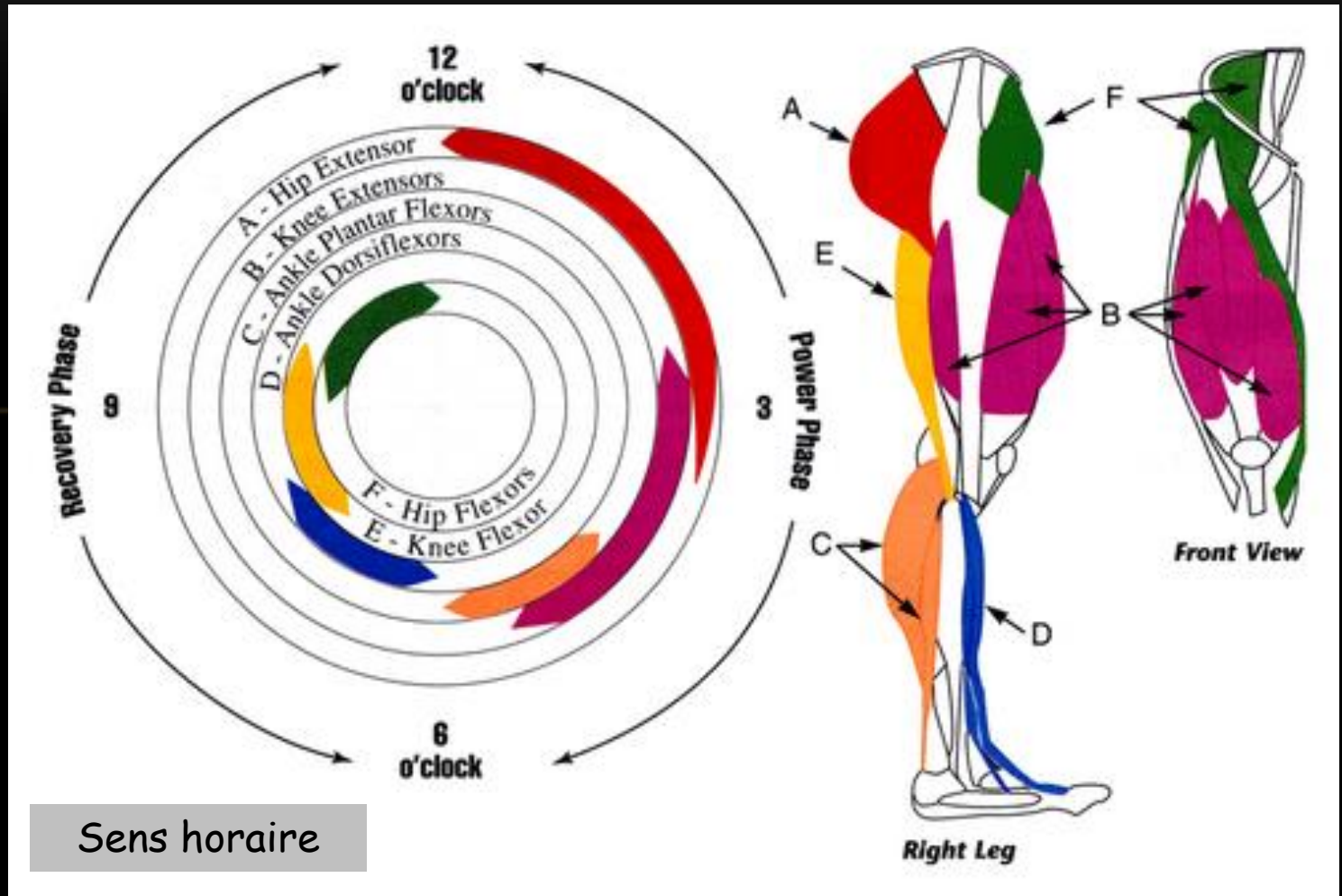
Les résistances aérodynamiques

Résistances qui s'appliquent sur le cycliste

La technique de pédalage

La fréquence de pédalage

La position



Le pédalage

Visualisation

Les
résistances
aérodynami-
ques

Résistances
qui
s'appliquent
sur le
cycliste

La technique
de pédalage

La fréquence
de pédalage

La position



Le pédalage

Lance Armstrong

Les
résistances
aérodynami-
ques

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

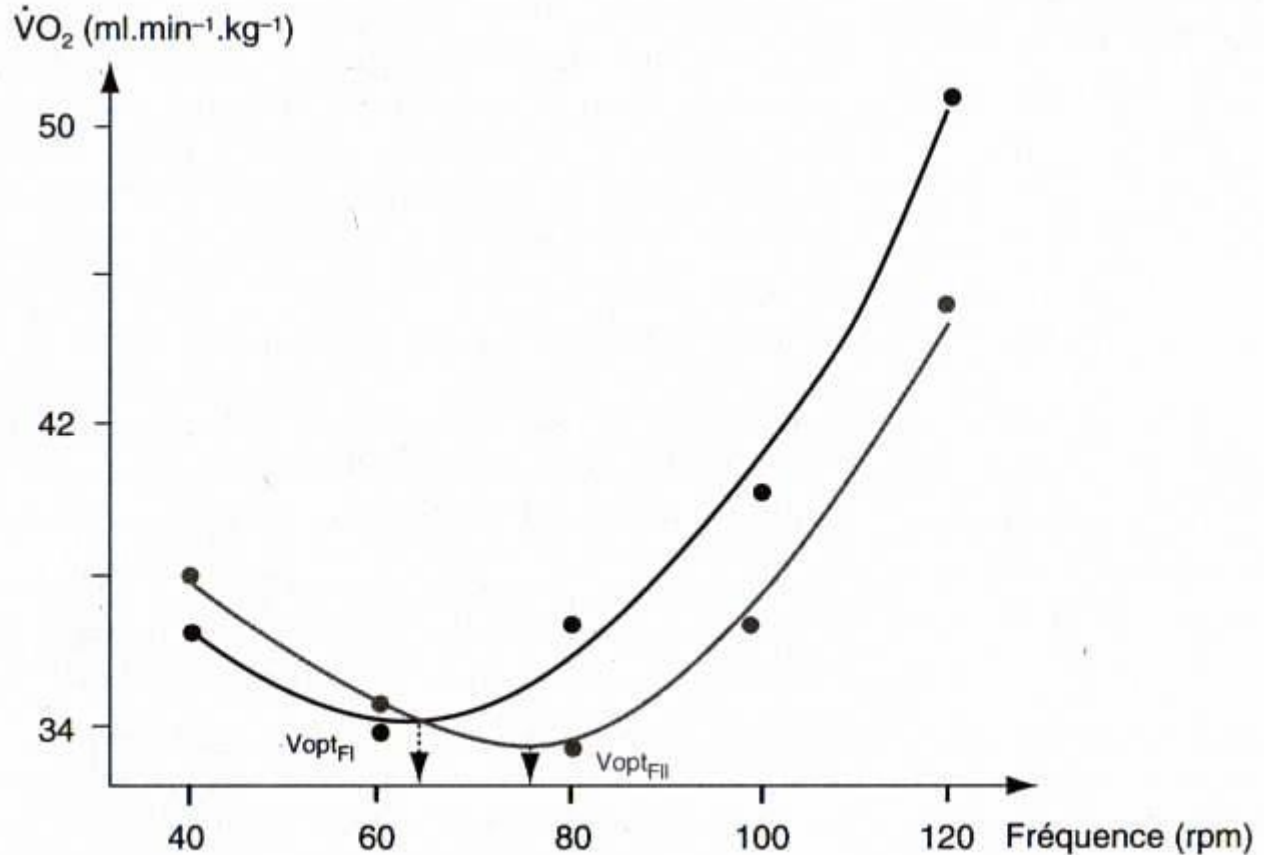
Les
résistances
aérodynami-
ques

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

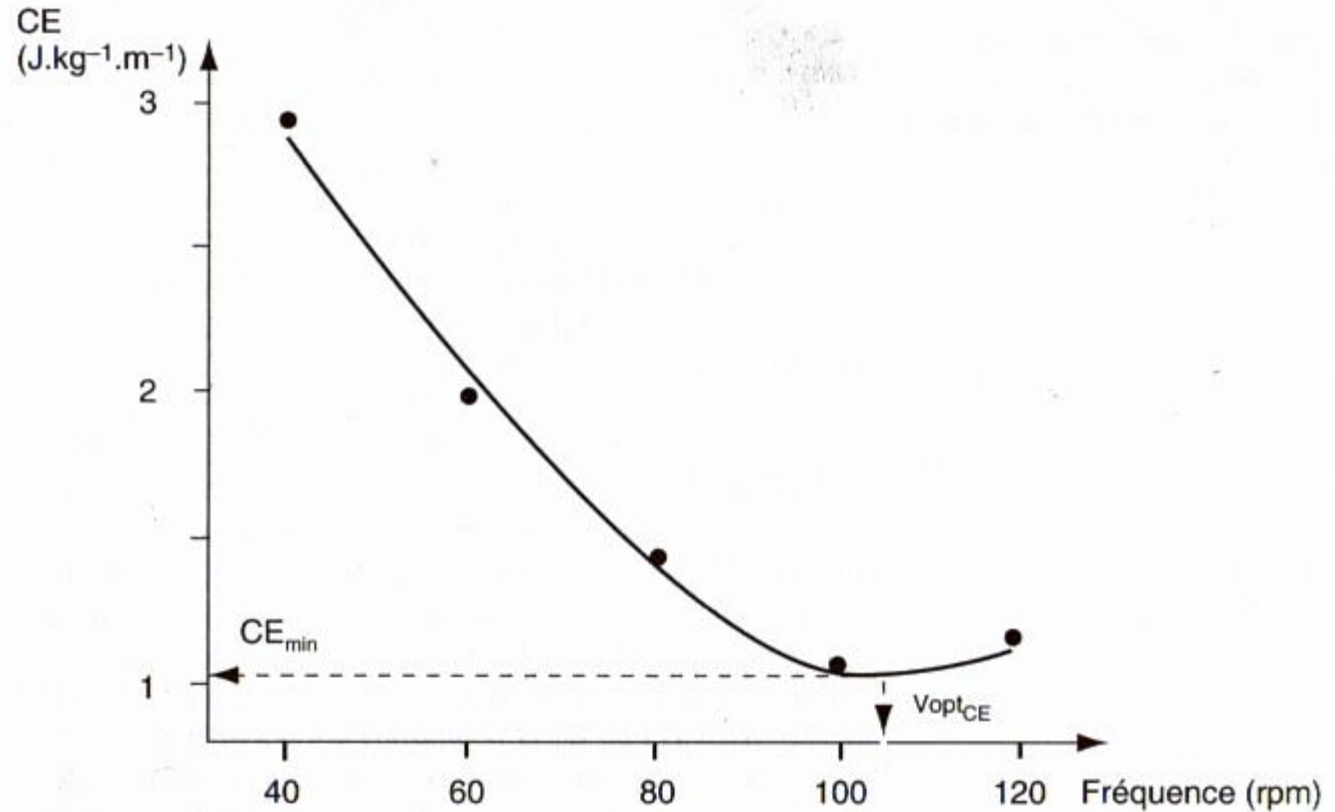
Les résistances aérodynamiques

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).

Source : F.Grappe, *Cyclisme et optimisation de la performance*, De Boeck, 2005.

La fréquence de pédalage

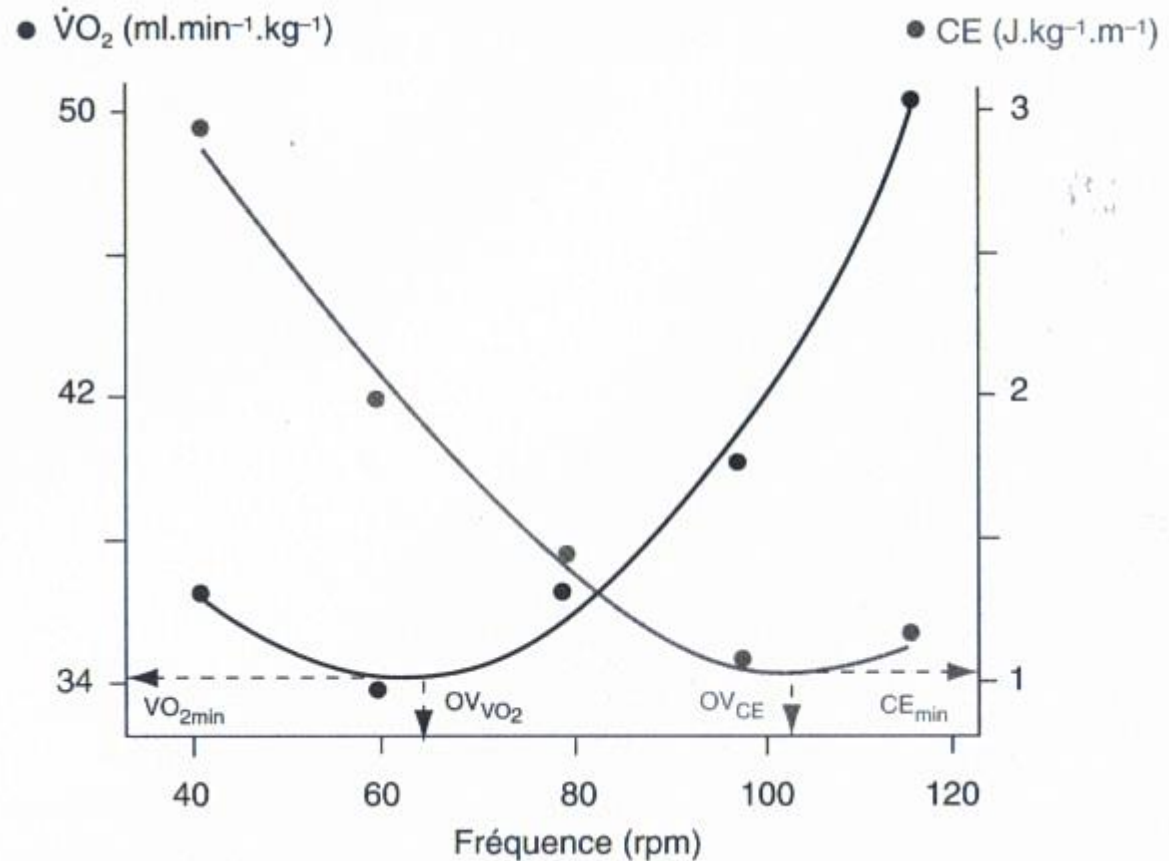
Les résistances aérodynamiques

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

Les résistances aérodynamiques

Résistances qui s'appliquent sur le cycliste

La technique de pédalage

La fréquence de pédalage

La position

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).

La position

Les
résistances
aérodynami-
ques

Résistances
qui
s'appliquent
sur le
cycliste

La technique
de pédalage

La fréquence
de pédalage

La position

