

# Biomécanique

## - Les résistances à l'avancement -

**Sources :** Pratique du cyclisme. Peter Konopka, Paris, Vigot, 1987.  
L'aérodynamique des véhicules mus par la force musculaire, A. Gross, C. Kyle et D. Malevicki, Revue Pour la Science, février 1994.  
Cyclisme sur route. R.Legeay, J.Hardy, D.Roux. Amphora, Paris, 1999.  
Cyclisme et optimisation de la performance. F.Grappe, De Boeck, Paris, 2005.  
Les équations du vélo. F.Grappe, in Le vélo, la plus belle conquête de l'homme, Sport & Vie hors-série n°31, 2009.  
Cyclisme & Science. M.Glaskin, Vigot, Paris, 2015.

Trois types de résistance s'opposent au déplacement d'un cycliste : les résistances aérodynamiques (traînée), la résistance au roulement, et la force de gravité.

$$R_t = R_a + R_r + R_g$$

### I. Les résistances aérodynamiques

Sur terrain plat, lorsque la vitesse avoisine 50 km/h, environ 90% de la puissance développée sert à vaincre la traînée aérodynamique. Cette résistance est due à la viscosité liée à la structure moléculaire de l'air.

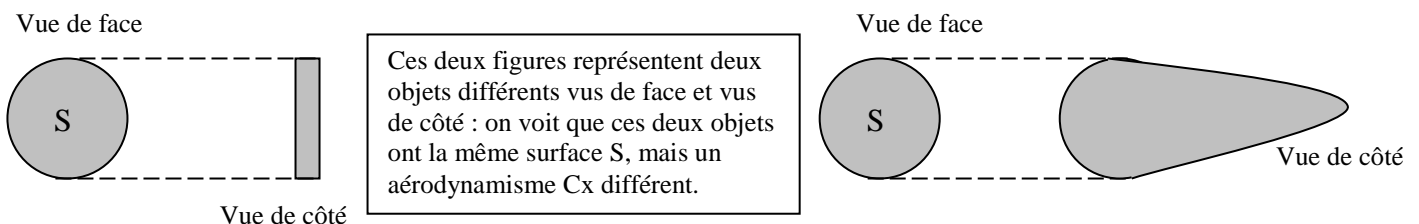
Si l'on soustrait le coût lié à la résistance de l'air, on obtient un coût énergétique non aérodynamique (CNA). Celui-ci reste constant en ambiance thermique de 20° sur terrain plat : il s'élève à 0,17 J.kg<sup>-1</sup>.m<sup>-1</sup> entre 5 et 20 m.s (18-72 km/h). La résistance de l'air est responsable de la nette augmentation du coût total avec la vitesse.

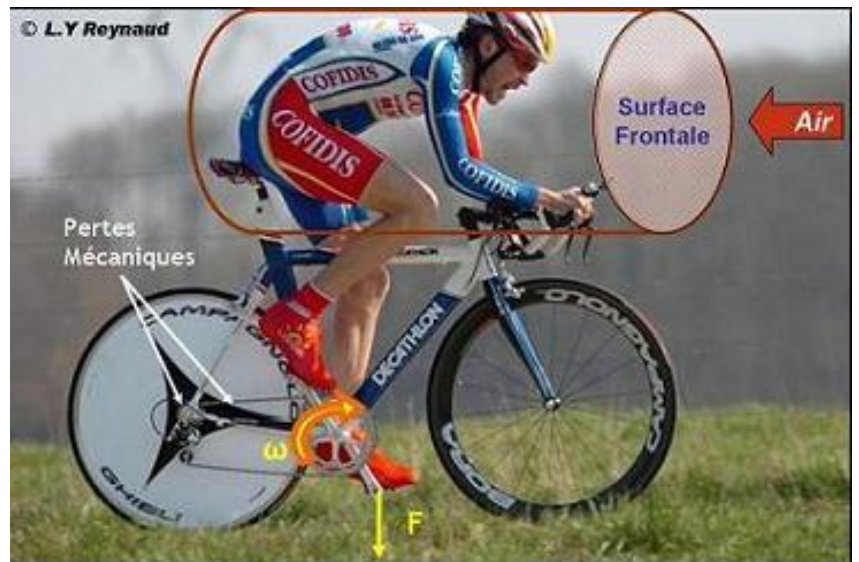
Les résistances aérodynamiques correspondent à l'équation suivante :

$$R_a = SC_x \times \rho/2 \times V_a^2$$

avec  $R_a$  = traînée aérodynamique,  
 $S$  = surface frontale en m<sup>2</sup> du coureur et de son vélo (surface du mètre couple),  
 $C_x$  = coefficient de pénétration dans l'air qui dépend de la forme du coureur et de son vélo (coefficient de forme) ainsi que de la texture de la surface de ses vêtements,  
→  $SC_x$  représente donc la surface frontale effective  
 $\rho$  = densité de l'air (= à 1.23 kg/m<sup>3</sup> au niveau de la mer contre 0,93 kg/m<sup>3</sup> 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 ( $V_v$ ).

Remarque : si le vent est nul, alors on a  $V_a = V_d$  donc  $R_a = SC_x \times \rho/2 \times V_d^2$ ,  
si le vent est de face, alors  $V_a = V_d + V_v$  donc  $R_a = SC_x \times \rho/2 \times (V_d + V_v)^2$ ,  
si le vent est de dos, alors  $V_a = V_d - V_v$  donc  $R_a = SC_x \times \rho/2 \times (V_d - V_v)^2$ .





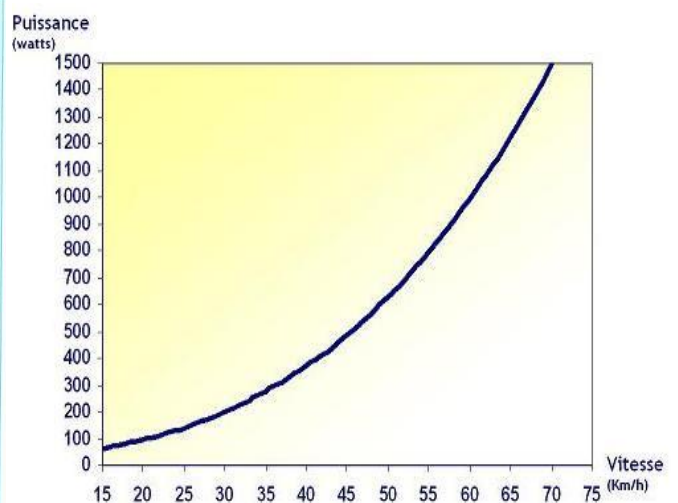
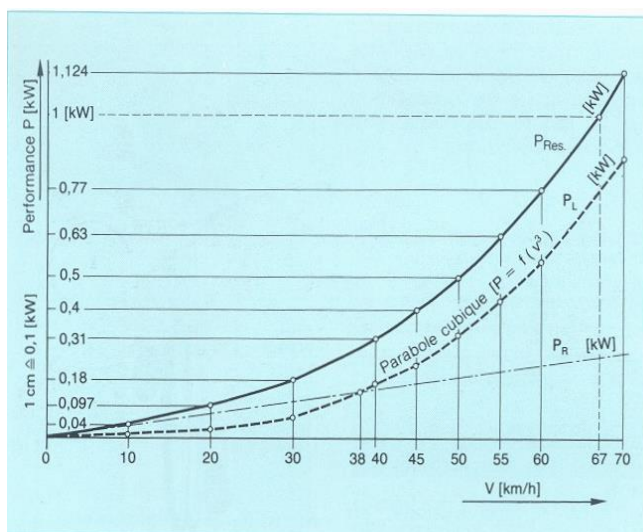
Différents coefficients de pénétration dans l'air  $SC_x$  :

- Mains au cintre, bras légèrement fléchis, buste droit ----->  $SC_x = 0.43$
- Mains aux cocottes, bras fléchis, buste penché vers l'avant ----->  $SC_x = 0.40$
- Mains aux cocottes, bras fléchis, buste très penché----->  $SC_x = 0.39$
- Mains aux creux du cintre, bras très fléchis, buste pratiquement à l'horizontale --->  $SC_x = 0.36$ .

Valeurs typiques de la densité de l'air ( $\rho$ ) :

- 1.23 au niveau de la mer
- 1.167 à 500 m
- 1.111 à 1000 m
- 1.0057 à 1500 m
- 1.007 à 2000 m
- 0.957 à 2500 m.

Un doublement de la surface (A) provoque un doublement de la résistance, alors qu'un doublement de la vitesse (v) provoque un quadruplement de la résistance.



De cette formule on peut tirer six conséquences :

1. plus la surface frontale effective  $SC_x$  est petite, plus la résistance de l'air sur le système coureur-vélo est faible (idéal = se rapprocher de la goutte d'eau). Certaines innovations technologiques portant sur le matériel ont eu pour objectif de diminuer  $SC_x$  : vélos plongeants et profilés, roues pleines, guidon type triathlète (qui permit à Greg Lemond de battre Laurent Fignon dans le Tour de France de 1998), forme du casque, combinaisons lisses et moulantes, surchaussures en lycra, gants aéro, etc.
2. il est possible d'améliorer l'aérodynamisme et d'améliorer  $SC_x$  en adoptant une forme qui se rapproche de la forme de la goutte d'eau. Les critères posturaux concernent principalement le bon positionnement du haut du corps et secondairement des membres inférieurs. La position du tronc constitue le facteur crucial : il s'agit de réduire le plus possible l'angle d'inclinaison du tronc par rapport à l'horizontal (idéalement, le dos devrait être parallèle au sol, mais cette posture est difficile à supporter longtemps en pratique). Un autre avantage aérodynamique consiste à rapprocher les coudes (not. en CLM avec des supports pour les avant-bras). Enfin, la position de la tête intervient aussi : baisser la tête permet de diminuer la traînée aérodynamique (sans casque). Depuis le début des années 80 grâce aux essais en soufflerie, ces différents facteurs de la performance ont été étudiés, ce qui a eu pour effet (surtout en ce qui concerne la route) de repenser la position du coureur sur sa machine (cadres, jantes et casques profilés, guidon type « triathlète », position O.Bree ou Colinelli, roues lenticulaires ou à bâtons, combinaisons lisses et moulantes facilitant l'écoulement de l'air, etc.). Ainsi on a mesuré que dans une position avec les mains en bas du guidon, les résistances aérodynamiques diminuaient de 11% par rapport avec la position relevée avec les mains au-dessus du guidon, ce qui correspond à une augmentation de vitesse de 45 à 50 km/h à puissance donnée. Un nouveau gain de 4% peut être obtenu en adoptant une position de triathlète correspondant à un accroissement de vitesse de 50 à 52 km/h. Enfin, allonger encore les bras (position « Colinelli » ou « Superman ») permet de disposer d'un ultime gain de 6 ou 7 % (mais cela au prix d'un inconfort croissant et d'un pilotage plus délicat). Avec une position et un matériel optimisé pour réduire les résistances aérodynamiques, Chris Boardman porta le record de l'heure à 56,375 km en 1996 à Manchester (appelé aujourd'hui meilleure performance dans l'heure) avec un  $SC_x$  de  $0.18 \text{ m}^2$ . Quatre ans plus tard, il retente ce record sur la même piste de Manchester, mais cette fois avec un vélo dit « traditionnel » : le record de l'heure chute alors à 49, 441.  
Selon F.Grappe (2005), on peut estimer le  $SC_x$  d'Armstrong à  $0,22\text{m}^2$  contre  $0,27 \text{ m}^2$  pour celui d'Ullrich. Pour une vitesse proche de 50km/h, Ullrich doit donc développer 20% de puissance supplémentaire comparé à Armstrong.
3. plus la vitesse augmente, et plus les résistances à vaincre sont importantes car ces résistances augmentent avec le carré de la vitesse de déplacement. Sur route plate, un cycliste doit dépenser approximativement 50 Watts pour rouler à 18 km/h. A 25 km/h, il doit multiplier sa puissance par 2, soit environ 100 watts, et par 6 à 40 km/h, soit une dépense de l'ordre de 300 watts. A 50 km/h, un cycliste roulant sur route plate dépense en moyenne 500 Watts, dont environ 450 servent à lutter contre la résistance de l'air (90%). L'adoption d'une position recherchant l'aérodynamisme est donc d'autant plus importante que le cycliste se déplace rapidement (dans les descentes, les genoux sont placés près du cadre, le cycliste se « couche » sur son vélo en rapprochant ses bras, parfois certains placent un bras le long du corps et la main derrière la selle, etc.).
4. L'adoption d'une position aérodynamique (diminution de  $SC_x$ ) est aussi d'autant plus importante que le vent est fort et s'applique face au coureur. Les résistances aérodynamiques varient en effet en fonction du vent. Ainsi un vent léger appliqué sur un

coureur qui roule à un rythme soutenu peut faire varier la vitesse de déplacement d'environ 14 km/h selon qu'il est appliqué dans le dos ou de face (de 38 km/h et 52 km/h pour une vitesse sans vent de 45 km/h).

5. L'importance des résistances aérodynamiques en cyclisme sur route donnent du sens à un certain nombre d'aspects technico-tactiques propres à cette discipline. Ainsi il est plus économique de se placer dans le sillage d'un autre cycliste (« dans la roue ») que d'être en tête de peloton (à 45 km/h, un cycliste calé dans la roue d'un autre vélo dépense entre 25 et 30% d'énergie en moins que s'il pédalait sans abri aérodynamiques devant lui, ce qui permettrait, pour la même dépense énergétique, d'augmenter la vitesse de 4 à 6 km/h). Les résistances aérodynamiques expliquent donc beaucoup de techniques spécifiques et de choix stratégiques :
  - technique des relais (une file, deux files, simple et double éventail, etc) ;
  - technique des « bordures » lorsque le vent vient de côté pour faire « exploser » le peloton ;
  - équipiers qui protègent leur leader en assurant des relais (le « tempo ») ;
  - stratégie d'une équipe qui regroupe ses coureurs pour « rouler » sur une échappée ;
  - échappée qui ne s'entend pas car certains coureurs ne souhaitent pas participer aux relais ;
  - stratégie de conduite d'un sprint : ne pas être en tête, ne pas lancer trop loin, lancement du sprint du côté d'où vient le vent afin de faire prendre le vent à ses partenaires, etc.
  
6. La densité de l'air ( $\rho$ ) diminue avec l'altitude, ce qui permet de diminuer d'autant la résistance de l'air. C'est pourquoi certains records sont tentés en altitude (km départ arrêté à La Paz à 3000m, record de l'heure à Mexico à 2200m, etc), même si la raréfaction de l'oxygène perturbe les capacités d'oxygénation musculaire.
  
7. L'importance différenciée des résistances aérodynamiques dans la performance selon les spécialités du cyclisme explique en partie l'existence d'une géométrie différente du vélo ainsi que l'adoption de positions différentes (ainsi en vélo tout terrain les résistances aérodynamiques sont moins importantes qu'en cyclisme sur route car les vitesses atteintes sont plus réduites. La conception du vélo et la position du coureur privilégient donc davantage la maniabilité du vélo et le confort que la pénétration dans l'air).
  
8. Le règlement UCI intervient aussi sur l'application des résistances aérodynamiques sur le déplacement en réglementant le matériel utilisé et par conséquent indirectement la position adoptée sur le vélo (exigences de sécurité liées à la maîtrise du vélo).

	Vitesse (km/h)	Coût énergétique lié à la résistance de l'air (kW)	Part du coût total (%)
Marche de compétition	16,4	0,06	3
Course à pied	22,1	0,19	10
Patinage de vitesse	39,2	1,18	57
Cyclisme	46,3	2,08	91

Coût énergétique supplémentaire lié à la résistance de l'air aux vitesses record de 4 disciplines et pourcentage qu'il représente par rapport à l'énergie totale dépensée. Valeurs théoriques établies pour un athlète de 70 kg et 175 cm (d'après Di Prampero, *Int. J. Sports Méd.*, 1986, 7, 55-72).

**Résumé :** sur terrain plat, les résistances aérodynamiques constituent le facteur le plus important à prendre en considération (notamment en cyclisme sur piste et sur route) Une diminution de 10% de la surface frontale entraîne directement une diminution de 10% de la puissance développée pour une même vitesse de déplacement. Ainsi un coureur qui roule seul à 40 km/h et qui développe une puissance moyenne de 300 W ne développera plus que 270 W s'il se couche davantage sur son vélo et diminue son SCx de 10%. Cette différence de 30 W correspond à un écart d'une dent sur la roue libre.

## II. La résistance au roulement

Cette résistance ( $R_r$ ) provient pour l'essentiel du contact des roues sur le sol, mais aussi des frictions de l'ensemble des pièces mécaniques du vélo. La résistance au roulement représente une force plus ou moins importante selon la vitesse à laquelle se déplace le cycliste. Sa part est en effet plus importante à faible vitesse qu'à forte vitesse : à des vitesses de compétition (47 km/h), elle représente 10% de la résistance totale, alors qu'à des vitesses plus faibles, par exemple en montée, elle représente 30% de ces résistances (Grappe, 2005).

La résistance au roulement dépend surtout du coefficient de résistance au roulement du pneu :

$$R_r = C_r \times m \times g$$

**Résistances au roulement = coefficient de résistance au roulement X masse de l'ensemble cycliste+bicyclette (en kg) X Accélération de la gravité (9,81m/s)**

Les principaux facteurs qui permettent d'influencer le coefficient de résistance au roulement du pneu ( $C_r$ ) sont la pression de gonflage, le type de pneumatique (pneu ou boyau), l'épaisseur de la gomme à déformer, la sculpture de la chape du pneumatique et sa section transversale, et surtout **la nature du sol**.

Différents  $C_r$  :

- sur ciment lisse  $C_r = 0.002$
- sur billard asphalte  $C_r = 0.003$
- sur route normale  $C_r = 0.004$
- sur route dégradé  $C_r = 0.005$
- sur route en mauvais état  $C_r = 0.006$ .

De cette formule on peut tirer quatre conséquences :

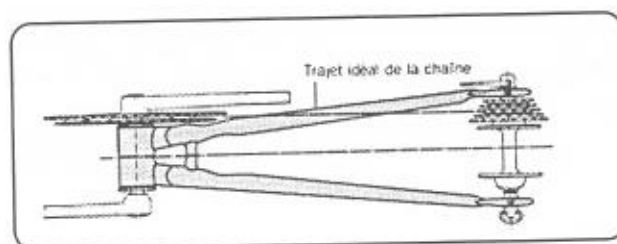
1. Lorsque la route s'élève plus le poids du coureur et celui de son vélo sont élevés, plus la résistance au roulement est importante.
2. Plus la pression des pneus est faible, plus la surface de frottement au sol est grande et par conséquent, plus la résistance au roulement est importante. Sur route, la pression optimale des pneumatiques varie entre 7 et 9 bars (pour des pneus) : cette pression permet de « diminuer les risques de crevaison, d'éviter les dérapages dans les virages, et déterminent une résistance au roulement optimale sur tous les types de terrain » (F.Grappe, 2005).
3. La nature du sol est le facteur le plus important : si la chaussée est de mauvaise qualité, la résistance au roulement augmente car à chaque fois que le pneu va rencontrer une aspérité au sol, sa surface de contact va augmenter (attention car des pneus trop gonflés peuvent aussi diminuer l'économie du déplacement, notamment sur route bosselée, car le vélo va avoir tendance à perdre de l'adhérence en « rebondissant » sur le sol selon le principe d'action – réaction).  
C'est pourquoi les résistances de roulement représentent une part encore plus importante des résistances totales en vélo tout terrain et en cyclo-cross.
4. néanmoins les frottements au sol sont nécessaires pour permettre le déplacement. Si ceux-ci sont insuffisants en effet, il n'y a pas assez d'adhérence et le cycliste va déraiper (c'est le cas lors d'une ascension à fort % sur un chemin en terre très sec en VTT, ou lors d'une brutale accélération, ou encore lors d'un démarrage en côte sur route humide).

Notons qu'il existe d'autres résistances de frottement (qui n'apparaissent pas dans l'équation) et qui correspondent à tous les engrenages et les parties mobiles des mécanismes du vélo en déplacement. Ce sont :

- les frictions au niveau de toutes les pièces qui comportent un roulement : axes de pédales, de pédalier, moyen, roue libre, roulettes du dérailleur ;
- les frictions de la chaîne qui s'enclenche continuellement sur les dents du plateau avant et celles du pignon arrière.

Trois conséquences si l'on souhaite diminuer ces résistances :

1. toutes les pièces qui comportent un roulement devront être correctement et régulièrement lubrifiées.
2. le réglage fin des dérailleurs avant et arrière doit permettre à la chaîne de s'enclencher parfaitement sur les pignons.
3. la ligne de chaîne doit être parallèle à la ligne moyenne du cadre : il faut donc éviter les braquets qui provoquent un « croisement » de la chaîne (c-a-d grand plateau et grand pignon et petit plateau et petit pignon). De plus, chaque fois qu'une chaîne n'est pas en ligne, la mécanique souffre davantage et l'on risque de dérailler plus facilement.



### III. La résistance due à la gravité

La gravité est le phénomène en vertu duquel tous les corps matériels s'attirent réciproquement en raison directe de leur masse et en raison inverse du carré de leur distance. C'est la force qui agit sur le centre de gravité d'un corps et qui attire tout objet vers le centre de la terre.

Cette résistance augmente avec le pourcentage de la pente et avec le poids de l'ensemble homme-machine. Elle peut s'exprimer selon l'équation suivante :

$$R_g = m \times g \times h/d \text{ (ou \% de la pente)}$$

Résistance due à la gravité = masse de l'ensemble cycliste+bicyclette (en kg)  
 X Accélération de la gravité (9,81m/s) X sin de l'angle de la pente (déclivité de la route)

De cette formule on peut tirer quatre conséquences :

1. Plus le pourcentage de la pente est élevé, plus l'intervention de la gravité est importante, et donc, pour une même dépense énergétique, plus la vitesse est réduite. Lorsque la pente s'élève, ce ne sont plus les résistances aérodynamiques qui constituent les résistances les plus importantes à vaincre, mais la force de gravité (à partir de 2% d'inclinaison). Ainsi un coureur de 80 kg sur une pente de 12% doit développer une puissance de 300 watts environ pour rouler à 10 km/h, ce qui lui permettrait de rouler à 40 km/h en plaine (sans vent). Le même coureur qui atteint lors d'un sprint une vitesse maximale de 67 km/h en plaine en développant 1000 watts, ne pourra rouler qu'à 30 km/h dans une pente à 12%. Sur une pente à 10%, il faut développer 300 W pour rouler à 10 km/h, mais 450 w pour rouler à 15 km/h (coureur et vélo). Pour F.Grappe (2005), un cycliste de 70 kg (vélo de 8 kg) qui se déplace sur une pente de 7% en développant 300 W peut en théorie rouler à 17,7 km/h. S'il parvient à gagner 3 kg de poids de corps (67 kg) il est en mesure de rouler en développant la même puissance à 18,2 km/h, soit un gain de 0,5 km/h. Cela représente un gain de 6,1 sec. par km. Notons que les plus grandes différences sont enregistrées pour des montées dont la pente est supérieure à 7% (90% de la puissance développée à partir de 7%).

- Comme les résistances aérodynamiques deviennent de moins en moins déterminantes au fur et à mesure que la pente s'élève, les positions adoptées et les stratégies déployées ne sont pas les mêmes que celles observées en plaine.
- En descente, la gravité n'a plus tendance à freiner le coureur, mais à accélérer sa vitesse de déplacement. C'est pourquoi le cycliste peut atteindre de très grande vitesse en descente, même sans action propulsive (c-a-d sans pédaler). Ainsi dans une descente à 12%, un cycliste de 70kg et dont le vélo pèse 10 kg peut atteindre une vitesse de 80-90 km/h sans pédaler (s'il adopte une position suffisamment aérodynamiques). La vitesse record atteinte sur neige en vélo est de 223.3 km/h (par Eric Barone sur la piste de Vars).
- Plus le poids du coureur et de sa machine est élevé, et plus la force de gravité à vaincre est élevée. L'importance du facteur poids est d'autant plus décisive que la pente est raide. C'est la raison principale de la différenciation des morphotypes selon les spécialités du cyclisme et selon les qualités du coureur (différence de morphologie souvent évidente entre un « grimpeur » et un « sprinter »). Ainsi, toutes choses étant égales par ailleurs, sur une pente à 10%, un cycliste de 65 kg doit développer 40 watts supplémentaires qu'un cycliste de 60 kg. Pour F.Grappe (2009), une différence de 2 kg en plus dans la montée de l'Alpe d'Huez (13.8 km à 8% de moyenne) augmente le temps de 1 min.

#### IV. Puissances mécaniques développées et résistances à l'avancement (modélisation de la performance en cyclisme)

La puissance mécanique développée par un cycliste représente le produit de la résistance totale à l'avancement ( $R_t$ ) et de la vitesse de déplacement ( $V_d$ ) :

$$P_{méca} = R_t \times V_d$$

$$P_{méca} = P_{Ra} + P_G + P_{Rr}$$

$$\text{donc } P_{méca} = (R_a + R_r + R_g) \times V_d$$

$$\text{donc } P_{méca} = (SCx \times \rho/2 \times Va^2 + Cr m g + m g h/d) V_d$$

$$\text{donc } P_{méca} = (0,5 \rho SCx Va^3) + (Cr m g V_d) + (m g h/d V_d)$$

avec  $h$  = hauteur grimpée

$d$  = distance totale

Sur la base de cette équation, Di Prampero et al. (1979) proposent une modélisation de la performance en cyclisme qui fait intervenir 8 variables. Pour calculer la puissance mécanique développée ( $P_{méca}$ ), il faut connaître  $SCx$ ,  $\rho$ ,  $V_a$ ,  $Cr$ ,  $m$ ,  $h$ ,  $d$  et  $V_d$ , et pour calculer  $V_d$ , il faut connaître  $SCx$ ,  $\rho$ ,  $V_a$ ,  $Cr$ ,  $m$ ,  $h$ ,  $d$  et  $P_{méca}$ .

Exercice : calculer la puissance moyenne développée par Armstrong dans le CLM victorieux du Tour de France 2004 sur la montée de l'Alpe d'Huez.

	Scx (m <sup>2</sup> )	Masse (kg)		Cr	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	h (m)	d (m)	Va (m/s)		Puissances (W)		
		Cycliste	Vélo					Vd	Vv	P <sub>Ra</sub>	P <sub>Rr</sub>	P <sub>Rg</sub>
Armstrong	0,35	74	7	0,0025	0,997	79	1000	22,02	0	39,993	12	384,18
								6,12				

**Puissance moyenne totale développée = 40+12+384.2 = 436,2 watts.**