

Thème : Biomécanique (3)

3. Les résistances à l'avancement

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

$$R_t = R_a + R_r + P$$

Les résistances aérodynamiques

Ces résistances sont dues à la viscosité liée à la structure moléculaire de l'air. Elles 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^2 du coureur et de son VTT (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),

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),

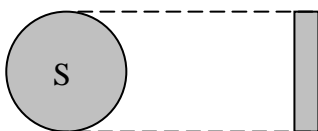
V_a = somme de la vitesse de déplacement (V_d) et de la vitesse du vent (V_v).

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 $R_a = SC_x \times \rho/2 \times (V_d - V_v)^2$.

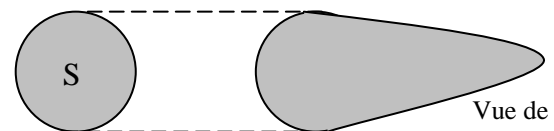
Vue de face



Vue de côté

Ces deux figures représentent deux objets différents vus de face et vus de côté : on voit que ces deux objets ont la même surface S , mais un aérodynamisme C_x différent.

Vue de face



Vue de côté



Quelques C_x

Plaque verticale	1,15
Camion	0,75 à 0,9
Lance Armstrong	0,25 (en CLM)
GS Citroën	0,30
Sphère	0,2
Avion	0,054
Goutte d'eau	0,04

Remarque : C_x agit comme un coefficient multiplicateur : sa diminution, même décimale, entraîne un gain considérable (les ingénieurs estiment qu'un progrès de 2 % du C_x permet un gain de 50 centièmes de seconde sur 1 km). En tombant, une goutte d'eau éprouve une forme aérodynamique parfaite.

4 Conséquences : → plus la surface frontale effective SCx est petite, plus la résistance de l'air sur le système coureur-vélo est faible. En cyclisme sur route surtout certaines innovations technologiques portant sur le matériel ou la position du coureur ont eu pour objectif de diminuer SCx : vélos plongeants, matériels profilés, guidon type triathlète (qui permis à Greg Lemond de battre Laurent Fignon dans le Tour de France de 1998), forme du casque, combinaisons lisses et moulantes, surchaussures en lycra, etc.

→ les résistances augmentent de façon exponentielle avec la vitesse. 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%).

→ 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 (drafting). Dans un peloton ou s'il y a du vent, cette économie d'énergie peut être encore plus importante. D'où des techniques et des stratégies pour « s'abriter » des résistances aérodynamiques qui existent surtout en cyclisme sur route (un peu en VTT cross-country).

→ en vélo tout terrain, les résistances aérodynamiques sont moins importantes qu'en cyclisme sur route car les vitesses atteintes sont plus réduites. De plus, il est généralement beaucoup plus difficile de rester dans la roue en raison du caractère accidenté du terrain qui oblige une lecture beaucoup plus fine des trajectoires. C'est pourquoi la conception du vélo et la position du coureur privilégient davantage la maniabilité et le confort que la pénétration dans l'air.

	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).

La résistance au roulement

Elle provient des forces qui s'opposent au mouvement d'un objet en contact avec un autre. Cette résistance (Rr) provient pour l'essentiel des contacts des roues sur le sol, mais aussi des frictions de l'ensemble des pièces mécaniques du vélo qui comportent un roulement (chaîne, moyeux, pédalier, roulettes du dérailleur arrière, roue libre..).

Remarque : 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 sur route (47km/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). Elle dépend aussi des conditions atmosphériques et de la nature du terrain : elle est beaucoup plus importante par temps pluvieux et sur sol boueux qu'en conditions sèches sur route bitumée.

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

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

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) X $\sqrt{d^2 - h^2} / d$

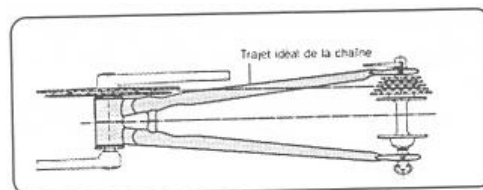
Remarque : R_r a également été décrite comme dépendante de la vitesse de déplacement du coureur : $R_r = C_r m g + aVd$. Mais le terme aVd a été négligé dans la plupart des études car il représente une part très faible de R_r (R_r varie de manière importante avec la vitesse seulement à partir de vitesses supérieures à 100km/h).

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, l'épaisseur de la gomme à déformer, la sculpture de la chape du pneumatique et sa section transversale.

Remarque : en vélo tout terrain, les pressions sont inférieures (entre 2 et 3 bars), les pneus utilisés présentent des sculptures marquées, et la section transversale est plus importante que sur la route.

5 Conséquences : → une pression des pneumatiques mal adaptée ou un VTT mal entretenu augmentent les forces de frottement qui s'exercent sur l'ensemble homme - machine, et diminuent le rendement mécanique du pédalage en occasionnant une dépense énergétique superflue. Toutes les pièces qui comportent un roulement doivent donc être régulièrement et correctement lubrifiées.

→ 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.



→ le choix du déplacement est important pour diminuer le plus possible les résistances de roulement : le vététiste doit choisir la trajectoire au sol qui présente le moins d'aspérité.

→ la nature du terrain et la météo conditionnent fortement l'importance des résistances de roulement au sol (plus importantes sur terrain gras).

→ les frottements au sol sont toutefois nécessaires pour permettre le déplacement. En effet, si les frottements sur le pneu arrière sont insuffisants, il n'y a plus 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).

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.

En VTT, cette résistance augmente avec l'inclinaison de la pente et avec le poids de l'ensemble homme-machine. Elle peut s'exprimer selon l'équation suivante :

$$P = m \times g \times h/d$$

Résistance due à la gravité = masse de l'ensemble cycliste+bicyclette (en kg)

X Accélération de la gravité (9,81m/s) X rapport entre la hauteur gravie par le cycliste et la distance effectuée

3 Conséquences : → 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 comme c'est souvent le cas en cross-country, ce ne sont plus les résistances aérodynamiques les plus importantes à vaincre, mais celles dues à la gravité. 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 (route) 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%.

→ en descente, la gravité n'a plus tendance à freiner le coureur, mais à accélérer sa vitesse de déplacement. C'est pourquoi le vététiste peut atteindre de grandes vitesses 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 222 km/h (par Eric Barone sur la piste des Arcs).

→ 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 gabarits selon les spécialités du VTT et la réussite des « petits gabarits » en cross-country (comme les champions olympiques Miguel Martinez ou Julien Absalon).

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

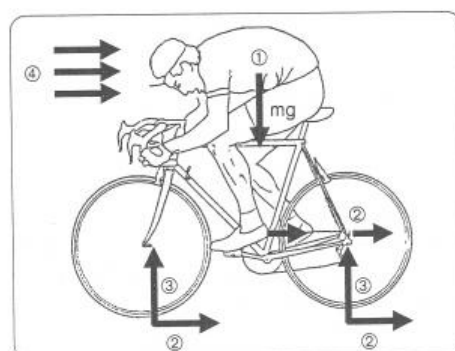
La réaction du sol

D'après la loi d'action – réaction, toute action exerce une réaction de même intensité mais de sens contraire. La force de réaction qui s'exerce sur le VTT est augmentée à chaque fois que s'accroît la force élastique de renvoi liée à la compression sur le sol.

2 Conséquences : → il faut rechercher une trajectoire du centre de gravité la plus rectiligne possible afin de diminuer les pertes d'énergie dues à la réaction du sol.

→ le vététiste qui souhaite sauter un obstacle utilise ce principe d'action - réaction en exerçant au sol une flexion/compression puis une extension/allègement afin de profiter d'une réaction propulsant le VTT vers le haut.

Les forces externes qui s'exercent sur le cycliste et sa machine



3.5 Conclusion sur la propulsion : le coût énergétique en vélo tout terrain

Le coût énergétique (encore appelé coût du déplacement ou économie de déplacement) correspond à la dépense énergétique d'un individu pour parcourir une distance donnée. Optimise les forces internes qui contribuent au déplacement, et minimise les forces externes qui

Remarque : à vitesse de déplacement égale, la dépense énergétique peut varier de 1 à 2 entre un sujet très économique dans ses déplacements à VTT et un sujet peu économique.

Améliorer le coût énergétique suppose une optimisation des forces internes qui permettent la propulsion, et une minimisation des forces externes qui ont tendance à freiner le déplacement.

Facteurs du coût énergétique	Influencés par	Actions potentielles du vététiste