

---

# Chapitre 12.

## LES FROTTEMENTS

«Voilà les feuilles sans sève  
Qui tombent sur le gazon ;  
Voilà le vent qui s'élève  
Et gémit dans le vallon...

Alphonse de LAMARTINE, *Pensée des morts*, Harmonies poétiques et religieuses.

C'est la saison où tout tombe  
Aux coups redoublés des vents ;  
Un vent qui vient de la tombe  
Moissonne aussi les vivants... »

### 12.1. CONCEPTS ET DÉFINITIONS

Pour avancer, le cycliste doit d'abord créer de l'énergie cinétique, nous venons de le voir. Il crée cette énergie par son travail musculaire pendant les seules phases d'accélération. L'énergie cinétique est rendue dans les phases de décélération, soit sous forme de chaleur (freinage ou frottements), soit sous forme d'énergie potentielle (élan du début d'une côte). S'il monte une côte, il crée de même de l'énergie potentielle, là encore par son travail musculaire. Cette énergie est rendue à la moindre descente en énergie cinétique. Mais il lui faut, aussi et en permanence, fournir de l'énergie pour lutter contre les frottements dus au vent, à la résistance de l'air, à la mécanique du vélo, ou aux réactions de la route.



Le frottement est une force qui s'oppose au glissement d'une surface sur une autre. Dit autrement, c'est une force qui s'oppose à un mouvement prêt à s'établir ou déjà établi. Tous les frottements ne sont pas maléfiques. Le vent dans le dos a bonne réputation et nous verrons que les frottements avec la route sont utiles.

#### 12.1.1. FROTTEMENTS STATIQUES

Le frottement statique est une force  $F_{FS}$  qui empêche un mouvement de démarrer. C'est lui qui nous permet, en s'appuyant sur le sol, d'avancer et de tenir la route dans un virage. La bicyclette se déplace vers l'avant quand le pneu arrière pousse sur la route, vers l'arrière, grâce au frottement. Par réaction, le sol pousse le pneu vers l'avant, et par la suite le vélo et son cycliste. Nous y reviendrons au début du chapitre 14. Le frottement statique n'est pas consommateur d'énergie puisqu'il ne s'accompagne d'aucun déplacement (le travail est égal à une force multipliée par une distance) sauf en cas de dérapage, mais l'on parle alors de frottement cinétique. La force maximale de frottement statique  $F_{FSmax}$ , au-delà de laquelle il y a glissement, est proportionnelle à la force normale  $F_N$  (sur laquelle nous allons revenir ci-dessous) selon un coefficient de frottement statique  $\mu_s$ , dépendant des deux matériaux en contact.

$$F_{FSmax} = \mu_s \times F_N$$

##### 12.1.1.1. Le coefficient de frottement statique $\mu_s$

Prenons l'exemple du frottement statique entre la route et les pneus. Le premier matériau est le goudron de la route, ou la terre et les cailloux du chemin mulétier. Il y a différentes textures du bitume ou qualités du chemin. Le deuxième matériau est le pneu. Ses propriétés varient selon la gomme, la chape... Dans ce domaine, le choix est infini. De plus, l'état d'un matériau peut changer selon les circonstances. Le coefficient de frottement statique d'un pneu sur du bitume sec est plus élevé que celui d'un pneu sur du goudron mouillé. Il l'est encore moins si la route est verglacée ou peinte et humide comme sur les passages pour piétons.

$F_{FSmax}$  est indépendante de la valeur de la surface de contact entre deux corps solides. Donc, entre le goudron et le pneu que l'on assimile à un corps solide. À qualité de gomme égale, la tenue de route n'est pas meilleure avec des pneus de 700, de 650 ou de 26 pouces, avec des pneus de faible section ou des gros boudins.

### 12.1.1.2. La force normale $F_N$

La force exercée par la route sur le cycliste et son vélo est appelée force de réaction  $F_{\text{route}}$ . Elle part du point de contact entre la route et les deux pneus. Nous avons déjà vu cela au chapitre 10 (en 10.3.1). Dans un plan orthogonal à la trajectoire, on peut décomposer  $F_{\text{route}}$  en deux forces : La première force est la force normale  $F_N$  qui est perpendiculaire à la route. Si la surface de la route est horizontale, la force normale est verticale. Elle est alors, répartie sur les deux roues, égale et opposée à la force du poids  $F_P$  de la bicyclette et du cycliste, par définition toujours verticale. La deuxième force est tangente à la surface. C'est une force de frottement. Elle est nulle sur une route horizontale dans une trajectoire rectiligne. Dans un virage, elle est dirigée vers l'intérieur de la courbe. C'est elle qui s'oppose au glissement du pneu. Nous l'avons également évoquée à propos de la force centripète au chapitre 10 (en 10.3.2). La force de réaction de la route est liée au poids du cycliste et du vélo et augmente avec lui. Donc, plus le cycliste est lourd ou chargé, plus la force maximale de frottement statique est élevée.

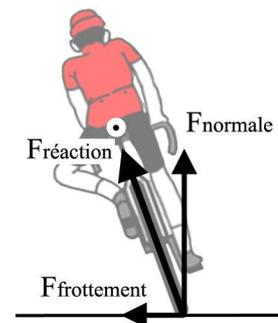


Figure 12.1 La force normale et la force de frottement.

## 12.1.2. FROTTEMENTS CINÉTIQUES

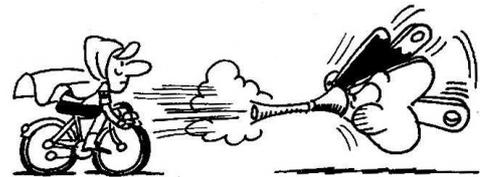
Le frottement cinétique est la force qui tend à freiner un corps glissant sur une surface. Cette force  $F_{\text{FC}}$  est égale et de sens opposé à la force motrice nécessaire pour maintenir le corps en mouvement uniforme. Elle est donnée par la formule  $F_{\text{FC}} = \mu_c \times F_N$ , dans laquelle  $\mu_c$  est le coefficient de frottement cinétique.

Le frottement cinétique est habituellement inférieur au frottement statique. Cela veut dire qu'il faut une force plus grande pour vaincre l'adhérence (due au frottement statique) que pour entretenir le glissement consécutif à la perte d'adhérence. Une fois que la roue est partie... Le frottement cinétique diminue souvent, mais pas toujours comme nous allons en voir une illustration au paragraphe suivant, lorsque la vitesse de glissement augmente. Nous avons tous constaté qu'il fallait lâcher les freins au fur et à mesure que la vitesse diminuait, pour ne pas s'arrêter brutalement ou voir une roue dérapager.

Parce qu'il y a mouvement, les frottements cinétiques, contrairement aux frottements statiques, consomment de l'énergie du cycliste et la transforment en énergie thermique. Les pièces en frottement l'une contre l'autre chauffent, nous le savons d'expérience.

### 12.1.2.1 Les frottements solide-gaz

Dans la pratique cycliste, il existe de nombreux frottements cinétiques. Le plus important, dans ses conséquences, est le frottement solide-gaz avec l'air. Ce frottement est difficile à analyser. Essayons, cependant, de comprendre un peu ce qui se passe. Lorsqu'un cycliste traverse une masse d'air, ce qu'il fait en permanence, il perturbe le cheminement des molécules qui composent l'air et modifie la vitesse de certaines d'entre elles. Puis la masse d'air se reforme derrière lui. Ces différences de vitesse entre les couches d'air créent une zone de surpression à l'avant du cycliste, qui tend à le repousser. À l'inverse, elles créent une zone de dépression à l'arrière du cycliste, qui tend à le retenir.



Les forces de frottement avec l'air dépendent des vitesses respectives du cycliste et de l'air. Contrairement à ce qui vient d'être dit ci-dessus, la résistance de l'air augmente avec la vitesse de glissement de l'air sur le cycliste et son vélo. On distingue deux sortes de forces de frottement avec l'air.

La première est due à la viscosité de l'air. Des molécules de l'air sont en contact direct avec le cycliste et son vélo. Sous l'effet d'interactions électromagnétiques, elles adhèrent au pédaleur et à sa bicyclette. Elles ont donc une vitesse relative, par rapport au cycliste, qui est nulle. Ce phénomène se déroule sur une couche d'air très mince. Plus les molécules de l'air sont éloignées du cycliste, plus leur vitesse, par rapport au cycliste, est grande, jusqu'à atteindre la vitesse d'écoulement libre de l'air. La force de frottement ainsi créée par la viscosité de l'air augmente proportionnellement à la vitesse de glissement. Elle diminue avec l'augmentation de la température, l'altitude et augmente avec l'humidité.

La deuxième force de frottement est due aux turbulences, elle augmente avec le carré de la vitesse. L'air ne contourne pas jusqu'au bout la surface du corps et de la bicyclette, surface très complexe par ses reliefs et irrégularités. Il se forme derrière le cycliste des tourbillons qui constituent ce qu'on appelle la traînée (qui conditionne le fameux  $C_x$ ). Ce méli-mélo de turbulences consomme de l'énergie qu'il a prise au cycliste. Nous allons y revenir concrètement ci-dessous, à propos de l'aérodynamisme.

Sans vent, avec un air immobile, le frottement de l'air, dont la vitesse relative est alors égale à celle du cycliste, est déjà un obstacle important. Il impose une dépense d'énergie qui se transforme en énergie thermique dissipée, pour l'essentiel, dans l'air. Avec un vent de face, les vitesses respectives du vent et du cycliste s'additionnent, pour donner la vitesse de l'air. Nous avons tous vécu ces moments difficiles pendant lesquels la progression ralentit et le rythme cardiaque s'accélère. Vent dans le dos, la vitesse du vent se soustrait à elle du cycliste, jusqu'à annuler la résistance de l'air, voire provoquer une poussée du cycliste.

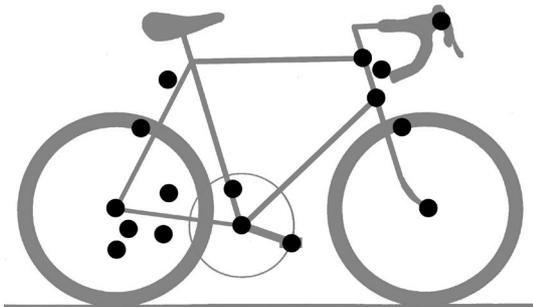
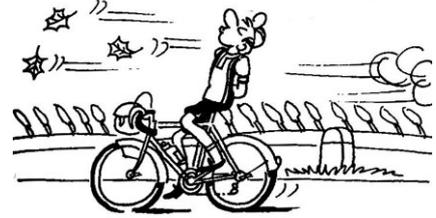


Figure 12.2. Sur une bicyclette, il y a de très nombreux endroits nécessitant d'être lubrifiés régulièrement.

### 12.1.2.2. Les frottements solide-solide

Les plus nombreux des frottements cinétiques sont des frottements solide-solide entre les pièces du vélo (ou du corps humain). Ce sont les « résistances passives » décrites par Vélocio. Ils forment l'essentiel des frottements « secs » (voir plus bas). La figure 12.2 montre tous les points de frottement sur une bicyclette. Pour les limiter, il n'y a qu'un remède : garder les surfaces de contact séparées. C'est le rôle qui est dévolu à l'huile ou à la graisse sur les roulements, axes ou zones de glissement de la machine. C'est aussi le rôle du liquide synovial dans les articulations.

Mais certains frottements cinétiques sont utiles, comme ceux des patins de frein sur les jantes. Pas question de mettre de l'huile sur la jante. Au contraire, on cherche à augmenter le coefficient de frottement par un bon usinage des flancs des jantes ou dans la composition des patins. De même, les frottements des manettes de dérailleurs permettent d'équilibrer la tension provoquée par les ressorts de rappel des dérailleurs...

### 12.1.3. FROTTEMENTS AVEC ROULEMENT

En théorie, une roue rigide sur une surface plane devrait rouler indéfiniment. Dans la pratique, ce n'est pas le cas en raison d'un frottement dit « avec roulement ». La cause en est une déformation du pneu de la roue, bien visible, et de la surface de la route, imperceptible celle-là. Le frottement avec roulement répond à la formule :  $F_{FR} = \mu_r \times F_N$  dans laquelle  $\mu_r$  est le coefficient de frottement. À faible vitesse, la résistance due à ce frottement est plus importante que la résistance de l'air. À grande vitesse, il devient, en proportion, marginal. Une bonne pression des pneus les limite au maximum. Ils consomment de l'énergie.

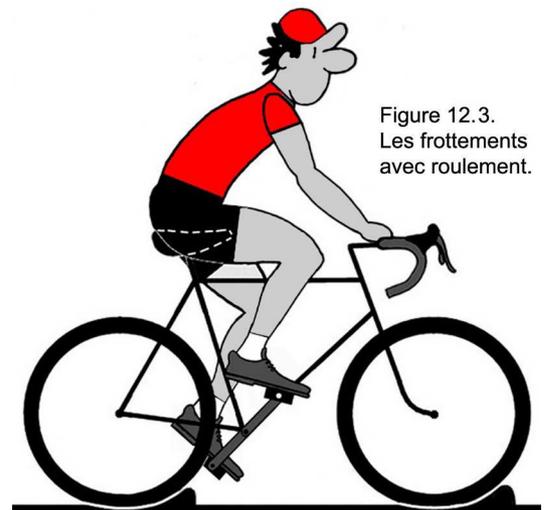


Figure 12.3. Les frottements avec roulement.

### 12.1.4. L'AÉRODYNAMISME

L'aérodynamisme est la capacité à offrir peu de résistance à l'air. C'est très important à bicyclette à partir d'une certaine vitesse ou quand il y a du vent. Pour se rendre aérodynamique, il faut agir sur les frottements liés à la viscosité de l'air et se positionner pour créer le moins possible de turbulences.

#### 12.1.4.1. Réduire les effets de la viscosité de l'air

Pour réduire les effets de la viscosité de l'air, il faut utiliser des vêtements lisses, fabriqués dans une matière ne provoquant qu'un minimum de réactions électromagnétiques avec les molécules de l'air. L'option extrême, ce sont les combinaisons des coureurs sur piste ou contre la montre. La plupart des coureurs et les cyclotouristes n'en sont évidemment pas là.

### 12.1.4.2. Diminuer la surface frontale

Pour réduire les turbulences, le plus simple est de diminuer sa surface frontale.

D'abord, il faut porter des vêtements près du corps.

Le cycliste cherche ensuite à adopter une position qui minore cette surface. Il ne peut agir que sur le diamètre vertical du haut de son corps (flèches rouges verticales) car le diamètre horizontal - c'est la largeur des épaules - reste le même quelle que soit la position. Il incline donc le buste en avant, jusqu'à l'horizontale si besoin, en posant les mains sur la partie basse du guidon et/ou en fléchissant les avant-bras sur les bras.

C'est pour avoir à tout moment une position aérodynamique que les coureurs règlent leur vélo avec un cintre bien plus bas que la selle (flèches verticales noires). La différence de hauteur peut atteindre 10 à 12 cm, mais il ne faut pas exagérer car un cintre trop bas a pour effet d'augmenter la surface frontale du couple cycliste + vélo : Comparez les figures 12.7 et 12.8. On voit bien que le coureur perd de l'aérodynamisme par rapport au cyclotouriste, malgré la sacoche de guidon, à cause de la position de ses avant-bras qui ne sont pas assez horizontaux.

Les coureurs adoptent aussi la position du triathlète, évoquée au chapitre 9, avec tous ses avantages (figures 12.5 et 12.9). Nous allons y revenir ci-dessous. Ils peuvent enfin, avec un cintre bien réglé en hauteur, se contenter de mettre les mains aux cocottes des leviers de frein (figure 12.10).

Les cyclotouristes roulent volontiers en solitaire et sont, en moyenne, plus âgés, moins souples et plus « enveloppés » que les coureurs. Ils ont plus de mal à adopter une position aérodynamique. Par rapport à la position de base (voir l'exemple de la figure 12.3 à la page précédente) ils posent volontiers les mains aux cocottes car cette position est agréable (figure 12.11) même si elle est à peine plus aérodynamique. Ils utilisent peu la position mains en bas du guidon (figure 12.12) sauf dans les descentes, pour bien maîtriser le vélo dans les virages en abaissant le centre de gravité, être en bonne posture pour actionner les poignées de frein (voir en 9.3.1.3, en 15.8.1 et la figure 12.23 plus bas) et mieux contrôler, avec les bras tendus, les effets de la décélération qui poussent le corps du cycliste en avant, à chaque coup de frein.

Au cours des analyses que nous venons de faire, nous n'avons pas tenu compte de la surface frontale du vélo et des membres inférieurs, considérant qu'elle ne variait pas dans les cas de figure étudiés, quelle que soit la position. Mais il existe d'autres positions, abordées en 9.1.5 : les positions couchées. Prenons l'exemple de la

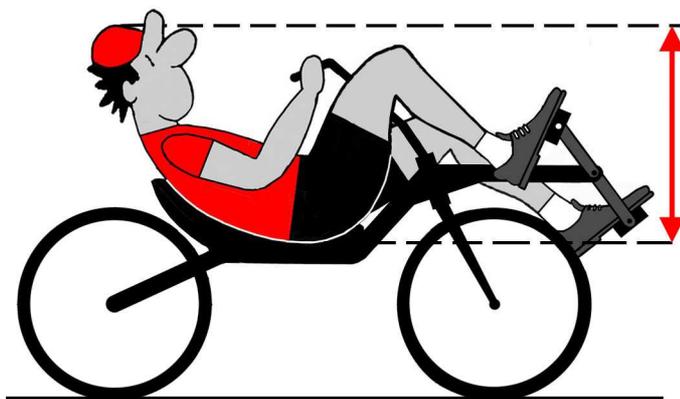
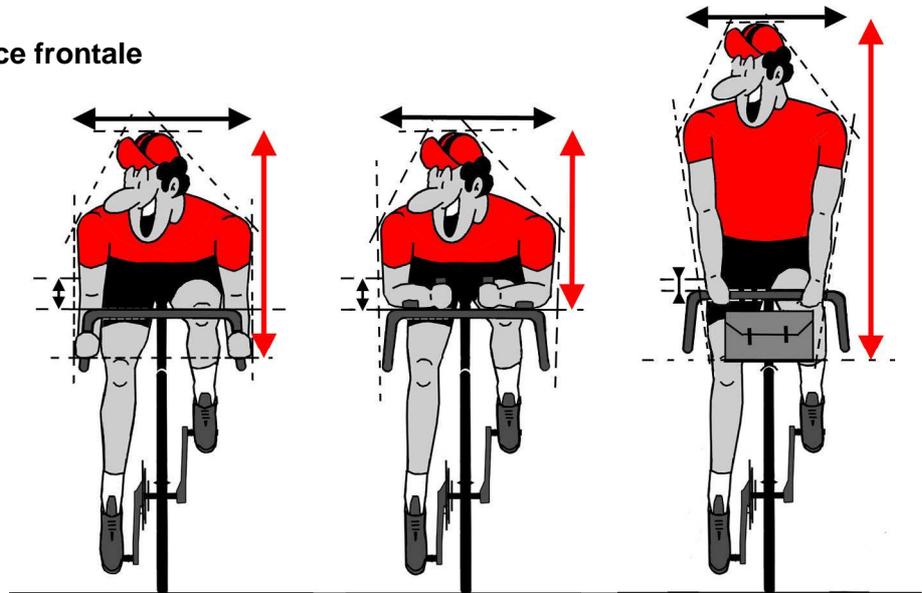
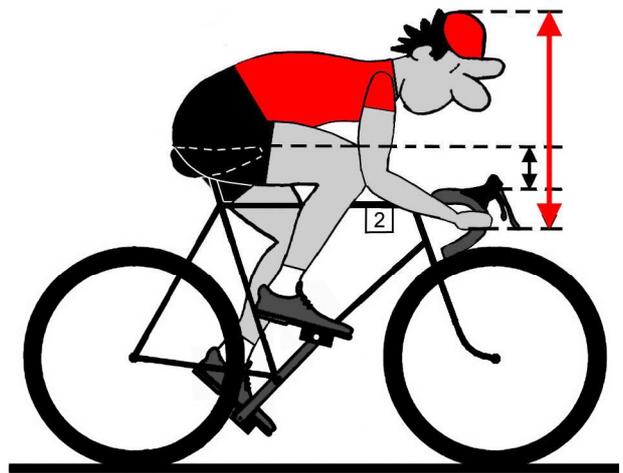
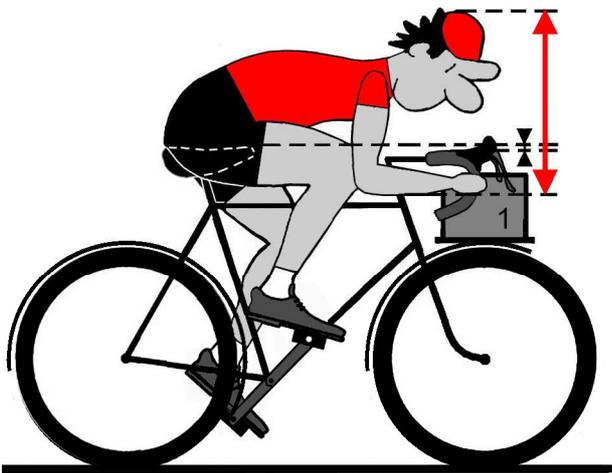


Figure 12.13. La position couchée sur le dos est particulièrement aérodynamique.

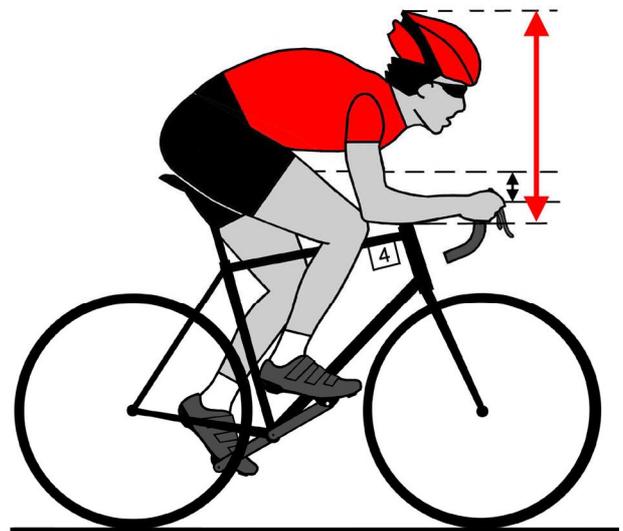
position couchée sur le dos (figure 12.13). C'est la plus fréquente notamment chez les cyclotouristes. La surface frontale des membres inférieurs et, à moindre degré, celle du vélo est incluse dans la surface frontale du haut du corps du cycliste. La surface frontale totale diminue ainsi d'une manière considérable. Cela explique la remarquable pénétration dans l'air des vélos couchés, accentuée probablement par le profilage général du cycliste et son vélo : les pieds, en avant, et le pédalier forment un ensemble dont le diamètre transversal est plus petit que celui des épaules du cycliste. L'ensemble est plus aérodynamique, comme chez le triathlète.



Figures 12.4, 12.5 et 12.6. C'est la position du haut du corps qui modifie le plus la surface frontale. A gauche un coureur avec un cintre trop bas, au milieu le même en triathlète et à droite en cyclotouriste lors d'un voyage à bicyclette avec bagages.



Figures 12.7 et 12.8. Positions d'un cycliste mains en bas du guidon. Quelle position est la plus aérodynamique ? Ce n'est peut-être pas le coureur (2) malgré la sacoche de guidon du cyclotouriste (1), à cause de ses avant-bras qui donnent trop de prise au vent.



Figures 12.9 et 12.10. Positions d'un triathlète sur son guidon spécial (3) et d'un coureur mains aux cocottes (4). Lequel est le plus aérodynamique ? Ils ont à peu près la même surface frontale mais le triathlète est mieux profilé (mains rapprochées).



Figures 12.11 et 12.12. Pour se rendre plus aérodynamique, la cyclotouriste adopte la confortable position mains aux cocottes (5). Dans les descentes, pour se laisser glisser rapidement, bien maîtriser la vitesse de son vélo et être en bonne position pour freiner, elle met les mains en bas du guidon (6).

### 12.1.4.3. Avoir une forme profilée, voire carénée

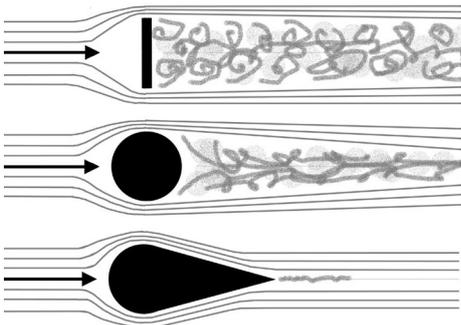


Figure 12.14. Importance de la forme d'un corps sur les turbulences dans un frottement avec l'air, pour une même surface frontale.  
En haut, une plaque (une sacoche de guidon ?).  
Au milieu, une sphère (c'est presque une tête).  
En bas, un suppositoire (ou un casque profilé !).

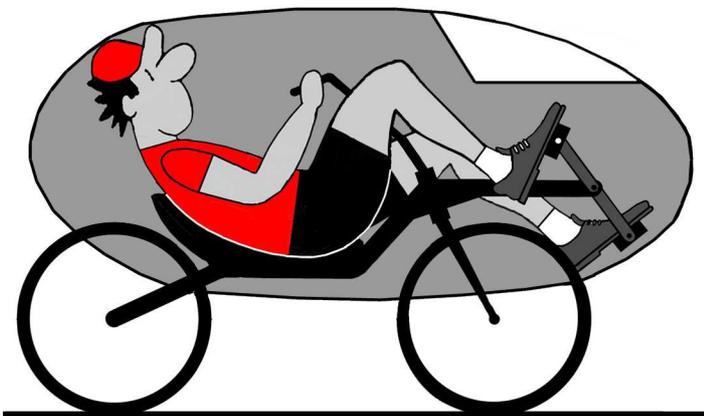


Figure 12.15. Le carénage réduit les turbulences. Avec une position couchée le pédaleur peut battre bien des records de vitesse !

question qu'il modifie sa position confortable et contemplative pour mettre en permanence les mains en bas du guidon et pour se donner l'aérodynamisme d'un coureur. Mais les sacoches, les porte-bagages, les garde-boue...? Difficile de poser la question. Il en va de son identité même.



Maurice, ci-contre, n'est pas en train de prendre feu ou de souffrir d'un trouble de la décarboxylation oxydative de ses pyruvates. Ce qui apparaît en grisé représente les turbulences qu'il génère, estimées car il n'a pas eu les moyens d'aller faire une étude en soufflerie (NDLR : Nous n'avons trouvé aucune étude concernant les cyclotouristes).

Un de ses amis, expert travaillant dans l'industrie automobile, est formel : pour diminuer les turbulences, il faut placer les bagages derrière le cycliste, sans augmenter la surface frontale. Mais une bicyclette ainsi chargée n'est pas agréable à piloter.

C'est la sacoche de guidon qui pose le plus problème. Si on la considère comme un porte carte, il peut la remplacer par un GPS (bien profilé) et transférer son contenu sur... le porte-bagages arrière !

Et rouler avec des surbaissés avant bien profilés s'il a besoin de bagages sur une randonnée de plusieurs jours.

Les turbulences ne sont pas dues qu'à la surface frontale. Elles dépendent aussi de la forme du cycliste et de son vélo, de leurs contours qui sont particulièrement complexes. Ainsi le triathlète des figures 12.5 et 12.9 est mieux profilé pour rentrer dans l'air que le cyclotouriste de la figure 12.6 et que les coureurs des figures 12.8 et 12.10, parce qu'il a les mains très proches en avant. Rappelez-vous la position, désormais interdite, de Graham OBREE dans sa performance sur le record de l'heure... De même, si les sacoches des cyclotouristes augmentent quelquefois la surface frontale (figures 12.6, 7, 11 et 12), elles génèrent surtout des turbulences à cause de leurs formes et de leur positionnement qui est un compromis entre l'aérodynamisme, l'équilibre et la bonne répartition du poids sur la bicyclette.

On peut, ou pourrait, utiliser des accessoires profilés vers l'arrière, en aile d'avion. Cela se fait notamment sur les casques, mais la plupart des accessoires carénés ne sont pas compatibles avec les conditions d'une course cycliste en peloton, ni avec celles d'une randonnée sur plusieurs jours avec bagages.

Reprenons la position couchée sur le dos, décrite en 9.1.5.2. Elle n'est pas propice à la compétition en peloton. Elle est quelquefois utilisée par les cyclotouristes ou les randonneurs au long cours. Elle se prête aux plus efficaces des carénages pour battre des records de vitesse avec la seule énergie des muscles des membres inférieurs. C'est ainsi que Bram MOENS a parcouru, en 1997, la distance de 100 km en 1 h 23' 46", soit à 71,6 km/h et que les 80 km ont été dépassés sur une heure.

Revenons-en au cyclotouriste. Il n'est pas

## 12.2. ÉNERGIE DÉPENSÉE DANS LES FROTTEMENTS

Il est commode de distinguer deux types de frottements. Les frottements « secs » incluent la plupart des frottements cinétiques (sauf avec l'air) et les frottements avec la route. Ils produisent une force  $F_{\text{Fsecs}}$  et consomment une énergie  $E_{\text{Fsecs}}$ . Ils sont indépendants de la vitesse et quasi-constants. Les autres frottements se produisent avec l'air. Ils évoluent avec la vitesse  $v$  du fluide par rapport au cycliste. Ils produisent une force  $F_{\text{Fair}}$  et consomment une énergie  $E_{\text{Fair}}$ . L'énergie consommée dans les frottements  $E_F$  est égale à  $E_{\text{Fsecs}} + E_{\text{Fair}}$ .

### 12.2.1. RECHERCHE D'UNE RECETTE DE CALCUL

#### 12.2.1.1. La formule

Cherchons maintenant à calculer, du moins à approcher, l'énergie consommée dans les frottements. Elle est donc la somme de  $E_{\text{Fsecs}}$ , indépendante de la vitesse, et de  $E_{\text{Fair}}$ , liée à la vitesse. Parmi les frottements avec l'air, les frottements dus à la viscosité de l'air croissent proportionnellement à la vitesse et les frottements dus aux turbulences croissent avec le carré de la vitesse. On s'achemine donc vers une formule générale du type  $E_F = av^2 + bv + c$  dans laquelle  $E_F$  est la consommation d'énergie par frottement,  $v$  la vitesse de l'air par rapport au cycliste,  $av^2$  la consommation d'énergie liée aux turbulences de l'air,  $bv$  celle liée à la viscosité de l'air et  $c$  la consommation d'énergie liée aux frottements secs.

#### 12.2.1.2. Les coefficients

Il reste à trouver les valeurs des coefficients « a », « b » et « c ».

- « a » et « b » sont fonction, à un moment donné, de l'aérodynamisme du cycliste. « a » dépend de la position, de la taille, de la coupe des vêtements, des équipements du vélo (sacoques, garde-boues...). « b » dépend plus de la qualité et de la matière des vêtements et accessoires du cycliste.
- Enfin, « c » dépend de la qualité et de l'entretien des roulements de la bicyclette, du graissage de la chaîne, de la fluidité des articulations du cycliste, si l'on peut utiliser ce concept.

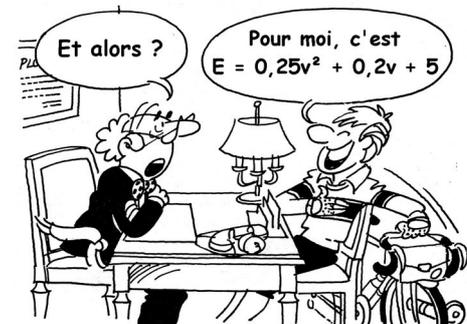


Figure 12.16. Une formule très personnalisée qui n'a " d'universel " que son architecture.

#### 12.2.1.3. Des propositions sur mesure

Par pédagogie, pour rester dans la logique de notre raisonnement, et sans prétention universelle, après recoupements et vérifications sur le terrain lors de randonnées, je vous suggère des valeurs de « a », « b » et « c » pour Maurice, Thérèse et leur fils Kevin. Notons bien qu'ils roulent sur une bicyclette traditionnelle, en position assise, sans carénage, et qu'il existe un point commun à cette famille : c'est la qualité des accessoires de leurs vélos et le parfait entretien de leur mécanique, réalisé par Maurice, bien sûr. De plus, on ne voit pas comment les frottements des articulations pourraient différer de l'un l'autre. C'est pourquoi nous avons la même valeur de « c » pour les frottements « secs ».

Selon les circonstances, votre position, les vêtements que vous portez, votre intuition (ne vous laissez pas intoxiquer par les spécialistes) il vous sera possible de retenir des valeurs différentes, si elles vous paraissent plus raisonnables. À vous d'en vérifier le bien-fondé, en utilisant les exemples proposés ci-dessous ou en vous appuyant sur d'autres expériences.

Auparavant, méditons les réflexions d'un grand savant, Claude BERNARD, dans son *Introduction à la médecine expérimentale* (1<sup>ère</sup> partie, chapitre I, paragraphe III) :

« On n'arrivera jamais à des généralisations vraiment fécondes et lumineuses sur les phénomènes vitaux, qu'autant qu'on aura expérimenté soi-même, et remué dans l'hôpital, l'amphithéâtre ou le laboratoire, le terrain fétide et palpitant de la vie ». Et sur la route de nos virées vélocipédiques, si vous permettez.

Dans les formules que nous proposons,  $E_F$  s'exprime donc en joule et  $v$  en m/s. Les coefficients ont été calculés de telle manière que l'énergie quantifiée soit l'énergie créée, ou dépensée, pour chaque mètre parcouru. La valeur de cette énergie (en joules) est, par définition, la même que celle de la force en cause (en newtons). Si on fait des calculs avec d'autres unités (kcal et km/h, par exemple), on peut passer d'une formule à l'autre en utilisant l'équation de base :  $E = F \times \text{distance}$ . Nous y reviendrons au chapitre 14 (en 14.1.3.2).



Maurice est large d'épaule. Il roule avec une randonneuse à garde-boue, avec des porte-bagages et toujours une sacoche de guidon. Il adopte le plus souvent la position mains en haut du guidon ou mains aux cocottes.

Il utilise des vêtements plutôt amples, en coton, qui procurent une bonne aération.

Pour  $E_F$  en joules et  $v$  en m/s proposons la formule :  $E_F = 0,25 v^2 + 0,2 v + 5$ .

Si l'on s'exprime en kcal et en km/h, la formule devient  $E_F = 0,0046 v^2 + 0,0135 v + 1,2$



Thérèse est fine et élancée. Elle a une randonneuse légère avec des mini garde-boue, une petite sacoche de guidon et une autre sous la selle. Elle ne rechigne pas à tenir son cintre par la partie basse. Elle s'habille bien ajustée et utilise les textiles modernes, lisses et élastiques.

Pour  $E_F$  en joules et  $v$  en m/s proposons la formule :  $E_F = 0,22 v^2 + 0,19 v + 5$ .

Si l'on s'exprime en kcal et en km/h, la formule devient  $E_F = 0,0041 v^2 + 0,0117 v + 1,2$ .



Sur sa bicyclette de course, Kevin est parfaitement profilé. C'est un beau garçon, mince et élégant. Son vélo est dépouillé et sa position inclinée en avant avec un guidon à 9 cm en dessous de la selle. Il adopte la tenue vestimentaire des coureurs avec collant et maillot moulant.

Pour  $E_F$  en joules et  $v$  en m/s proposons la formule :  $E_F = 0,20 v^2 + 0,18 v + 5$ .

Si l'on s'exprime en kcal et en km/h, la formule devient  $E_F = 0,0037 v^2 + 0,0105 v + 1,2$ .

#### 12.2.1.4. La vitesse relative de l'air

Dans la formule  $E_F = av^2 + bv + c$ , le symbole  $v$  représente la vitesse relative de l'air. Contre le vent,  $v$  est égal à la somme des vitesses du cycliste et du vent, si celui-ci est de face. Si le vent n'est pas tout à fait de face, sa vitesse par rapport à la trajectoire du cycliste dépend de sa direction. Nommons  $\alpha$  l'angle de cette direction avec celle suivie par le cycliste. La vitesse « efficace » du vent est égale à sa vitesse réelle multipliée par le cosinus de  $\alpha$ . Ainsi, avec un vent de  $\frac{3}{4}$  face, la vitesse « efficace » du vent (celle qui freine notre progression) est égale à 0,7 fois sa vitesse réelle. Avec un vent à  $60^\circ$ , elle est diminuée de moitié et avec un vent perpendiculaire à sa trajectoire, le cycliste n'est pas freiné. Mais il devra maintenir son équilibre !

Avec le vent dans le dos, la vitesse du vent se soustrait à celle du cycliste. Quand la vitesse relative est négative, le vent provoque une poussée qui peut devenir suffisante pour faire avancer le cycliste sans le moindre coup de pédale. Admettons que l'aérodynamisme soit identique « devant et derrière », ce qui n'est probablement pas le cas. On peut dire que la force de poussée du vent est suffisante pour faire avancer le cycliste quand le différentiel de vitesse entre le vent et le cycliste provoque une force supérieure à celle de la résistance due aux seuls frottements « secs » (le coefficient  $c$ ).

La formule s'écrit alors :  $E_F = c - (av^2 + bv)$ .

La figure 12.17 montre la variation des frottements en fonction de la vitesse relative de l'air, d'après la formule proposée pour Maurice. La zone inférieure, en rouge, correspond aux frottements secs ( $c$ ). La zone intermédiaire, en gris clair, représente les frottements dus à la viscosité de l'air ( $bv$ ). La zone supérieure, en blanc, correspond aux frottements dus aux turbulences ( $av^2$ ). Il est clair que l'importance des frottements avec l'air augmente avec la vitesse, nous allons l'illustrer concrètement ci-dessous.

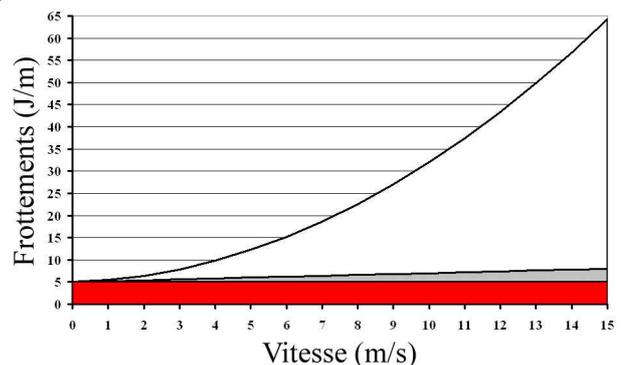


Figure 12.17. Variation des frottements en fonction de la vitesse. L'ennemi n° 1 du cycliste ce sont les turbulences.

### 12.2.2. SITUATIONS CONCRÈTES

#### 12.2.2.1. Frottements avec l'air sur le plat, quand il n'y a pas de vent

Les frottements jouent le seul rôle dans la dépense énergétique. Il n'y a pas de variation de l'énergie potentielle. On voit bien qu'il y a intérêt à peaufiner son aérodynamisme si l'on veut rouler vite, même sans vent.



Selon la vitesse, la consommation d'énergie par frottement  $E_F$  est de :

- à 15 km/h : 10,2 J/m, dont 50 % avec l'air
- à 25 km/h : 18,4 J/m, dont les 3/4 avec l'air
- à 40 km/h : 38,1 J/m, dont les 9/10 avec l'air.

### 12.2.2.2. Frottements avec l'air en terrain vallonné ou montagneux, un jour sans vent

La vitesse diminue dans les montées et les frottements avec l'air peuvent devenir quasi négligeables par rapport aux frottements internes et avec la route et surtout par rapport au travail effectué pour vaincre la gravité.



Dans la montée du Ventoux en 2 h 30, la vitesse de Maurice est de 8 km/h, soit 2,22 m/s. Les frottements sont égaux à 6,7 J/mètre parcouru, dont le 1/4 pour les frottements avec l'air.

À l'inverse, la vitesse augmente dans les descentes et, avec elle, les frottements avec l'air. Ils absorbent l'énergie du cycliste et de son vélo ( $E_{PG} + E_K$ ), qu'ils transforment en chaleur. Ce sont ces frottements, et ceux des freins, qui limitent la vitesse du cycliste. Si la route est droite, sans freiner, la vitesse maximale est atteinte quand le débit de l'énergie consommée dans les frottements est égal à la variation de l'énergie potentielle gravitationnelle. C'est-à-dire quand la force d'avancement liée au poids est égale à la force de résistance due aux frottements. Regardons cela dans un Ventoux sans virages !

			
Vitesse limite (km/h)	56,1	50,9	58,1
Temps de descente	21 mn et 23 s	23 mn et 35 s	20 mn et 39 s

« Mieux profilée » que son mari mais plus légère, Thérèse descendrait moins vite. Bien que plus léger, Kevin irait plus vite que son père, grâce à son meilleur aérodynamisme.

### 12.2.2.3 Frottements avec l'air quand il y a du vent



De Caen à la mer, un jour de vent de face à 30 km/h. Maurice roule à 15 km/h.  $V = 45$  km/h et  $E_F = 47$  joules au mètre parcouru, soit une puissance développée de 196 watts. C'est trop. Maurice change de braquet, roule à 12 km/h et ne débite plus que 137 watts.

La lutte contre le vent est un des efforts les plus importants qu'un cycliste doit fournir. Maurice a donc bien fait d'utiliser un plus petit braquet et de rouler moins vite. Ceci est aussi vrai en montagne. Reprenons l'exemple de la montée du Ventoux qui mérite bien son nom car il y a souvent du vent, très sensible dans les derniers kilomètres. Par rapport à la progression du cycliste, le vent change de sens à chaque virage. De face la montée devient très difficile, de dos c'est un moment de répit avant le prochain virage.



Montée du Ventoux en 2 h 30, vitesse maintenue jusqu'au bout à 8 km/h, soit 2,22 m/s. Dans les derniers kilomètres, le vent souffle à 30 km/h. Vent de face, Maurice consomme, à cause des frottements, 35 J/m auxquels il faut ajouter 68,9 J/m pour lutter contre la pesanteur, soit un total de 104 J/m et une puissance développée de 231 w. Vent dans le dos, il est poussé par le vent qui lui fait économiser 5,6 J/m. Au total il consomme 68,9 moins 5,6 = 63,3 J/m, ce qui correspond à une puissance de 141 w. On verra au chapitre suivant (en 13.2.7) que dans le premier cas, vent dans le nez, Maurice est presque à fond, et que dans le deuxième il roule tout à fait à l'aise.

Le vent dans le dos peut même provoquer une poussée suffisante pour faire avancer le cycliste. En admettant que le cycliste soit profilé de la même manière devant et derrière, ce cas de figure intervient quand la vitesse relative du vent est négative et quand  $av^2 + bv > c$  (voir en 12.2.1.4).



Chez Maurice,  $0,25 v^2 + 0,2 v > 5$  à partir d'une vitesse relative de l'air d'environ  $- 15$  km/h. Une fois lancé, avec un vent de 45 km/h dans le dos, Maurice peut, en théorie, rouler à 30 km/h.

#### 12.2.2.4. De l'intérêt de rouler à l'abri

On peut réduire l'effort lié aux montées en étant léger : vélo léger, pas de surpoids chez le cycliste, bagages réduits au strict minimum... On peut également réduire les frottements, en étant aérodynamique, comme dans un contre la montre par exemple, ou en roulant à l'abri d'une voiture, d'une moto, d'un autre cycliste ou bien, encore mieux, blotti au milieu d'un peloton. Les coureurs qui roulent vite, à des moyennes souvent supérieures à 40 km/h, savent très bien cela. Les cyclotouristes aussi le savent, surtout quand il y a du vent, mais ce n'est qu'un problème secondaire pour eux et cela ne les empêche pas de rouler seuls quand ils le désirent.



+



Maurice roule en compagnie de Kevin, à 20 km/h, le long du canal de Caen à la mer, face à un petit vent de 10-20 km/h.

Lorsque Maurice mène, sa fréquence cardiaque atteint 130 bpm. Dès qu'il se met bien à l'abri dans la roue de Kevin, celle-ci baisse de 15 bpm.

On verra (en 13.2.3.1) que ces fréquences cardiaques correspondent à des puissances de 160 et 125 w. Le fait de se mettre à l'abri derrière Kevin, fait économiser à Maurice environ 1/5 de la puissance qu'il développe en roulant seul face au vent.

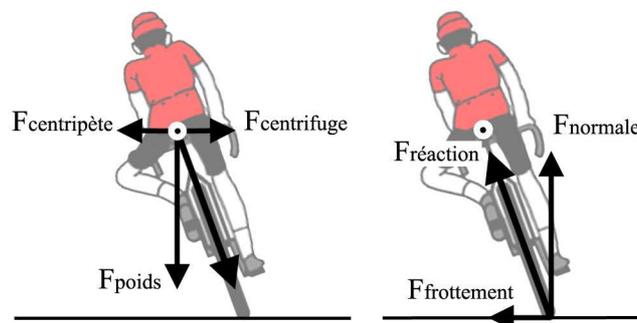
## 12.3. TENIR LA ROUTE ET FREINER

Dans une descente, comme celle du Ventoux vers Bédoin, il y a des virages, des voitures, d'autres cyclistes. Les coups de freins sont fréquents. Pour tenir la route, ne pas glisser dessus, le cycliste utilise le frottement statique de ses pneus avec le revêtement de la route, en espérant ne pas en arriver à un frottement cinétique. Pour le freinage, il s'agit, au contraire, d'un frottement cinétique qui se transforme en frottement statique.

### 12.3.1. LA TENUE DE ROUTE

#### 12.3.1.1. Tenue de route dans un virage sur un revêtement horizontal

Nous avons vu, au chapitre 10 (en 10.3), comment on prend un virage en jouant sur la position du centre de gravité. Nous allons maintenant aborder un deuxième aspect de la prise d'un virage : la tenue de route. La force centripète, qui permet le virage, lutte contre une force qui tend à remettre le cycliste dans une trajectoire rectiligne, que l'on appelle force « centrifuge ». Rappelons que cette force centripète est proportionnelle à la masse du cycliste et de sa bicyclette, au carré de sa vitesse et inversement proportionnelle au rayon de la courbure suivie.



Figures 12.18 et 12.19. Les forces qui s'exercent sur le cycliste, sur la route et sur les pneumatiques de la bicyclette.

Examinons les choses dans un plan orthogonal à la trajectoire, incluant le centre de gravité du couple vélocycliste : La somme de la force centrifuge et de la force du poids s'applique à ce centre de gravité. Elle est portée par une droite inscrite dans le plan sagittal du cycliste, qui coupe le segment joignant les deux points de contact des roues avec le sol. Elle est dirigée vers le sol. La route réagit, par l'intermédiaire des deux

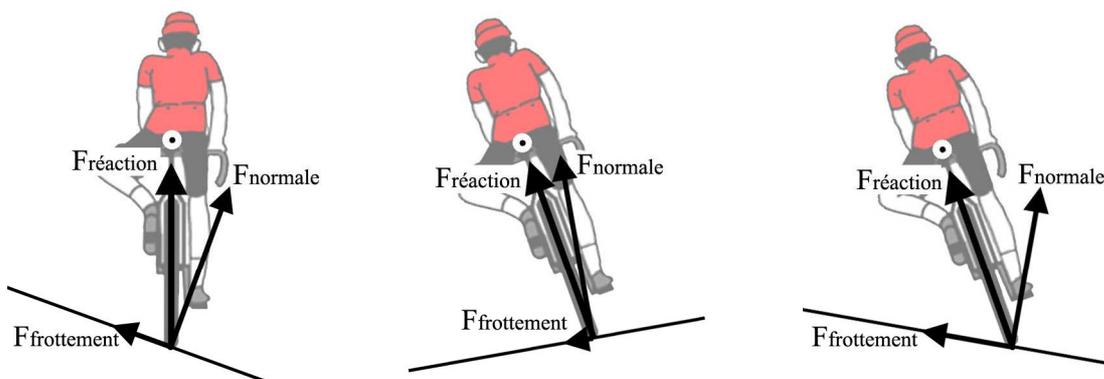
roues, par une force de même intensité et de même direction mais de sens inverse. Cette force de réaction de la route peut se décomposer en deux forces. La première est perpendiculaire à la route, c'est la force normale  $F_N$  que nous avons vue en 12.1.1.2. Comme la route est horizontale,  $F_N$  est verticale, égale mais de sens opposé au poids. La deuxième est horizontale, parallèle à la route, dirigée vers l'intérieur du virage. Elle est égale et parallèle à la force « centrifuge » mais de sens opposé. Elle est donc égale et parallèle à la force centripète et de même sens. C'est elle qui, grâce au frottement statique, s'oppose au glissement des pneus.

### 12.3.1.2. Tenue de route sur un revêtement qui n'est pas horizontal

La surface de la route n'est pas toujours horizontale. Elle peut être en dévers, comme sur les bords d'une route bombée. On trouve ce genre de situation dans la pratique du vélo tout terrain lorsque l'on roule à flanc de pente. Elle peut être aussi relevée, dans un virage sur un anneau de course sur piste, par exemple.

Si le cycliste roule en ligne droite, il évolue dans un plan vertical. La réaction de la route est verticale, égale et opposée à son poids. Elle se décompose en une force normale et une autre parallèle à la surface de la route, qui empêche les roues de glisser dans le sens de la pente. Dans un virage, les effets de la pente de la route et de l'inclinaison du cycliste se cumulent ou s'atténuent selon les cas.

La force de frottement diminue si le virage est relevé. De tels virages sont plus faciles à négocier. À l'inverse, si la route est en dévers (extérieur d'un virage sur une route bombée) le frottement est majoré et donc le risque de dérapage des roues devient plus important.



Figures 12.20, 12.21 et 12.22. De l'importance de relever les virages.

A gauche, le cycliste roule tout droit sur une route en dévers. Au milieu il tourne à gauche sur une route relevée. A droite il tourne à gauche sur une route en dévers. La réaction de la route est dirigée vers le centre de gravité du cycliste. La force normale est perpendiculaire à la route et la force de frottement parallèle. Cette dernière est plus faible quand le virage est relevé. Elle est très élevée dans les virages en dévers qui sont donc dangereux.

### 12.3.1.3. Tenue de route en fonction des pneus, des roues et du poids

Rappelons que la tenue de route dépend de la qualité des frottements statiques des pneus avec la route. Elle varie donc selon l'état des matériaux en contact. Elle est indépendante de la taille de la surface de contact. Elle n'est pas meilleure avec des pneus de 700, de 650 ou de 26 pouces, avec des pneus de faible section ou des gros boudins. Par contre, la tenue de route augmente avec la force de réaction de la route. Elle est donc liée au poids du cycliste et du vélo. Cela s'applique aussi au freinage que nous allons étudier tout de suite.

## 12.3.2. FREINER

### 12.3.2.1. Théorie

Pour freiner on provoque un frottement cinétique des patins de freins sur les jantes de la roue, ou sur les disques en cas de freins à disques. Les patins sont actionnés à partir des leviers de freins. Ils créent ainsi une force de freinage tangente à la circonférence de la roue, égale et opposée à la force créée par la libération de l'énergie cinétique.

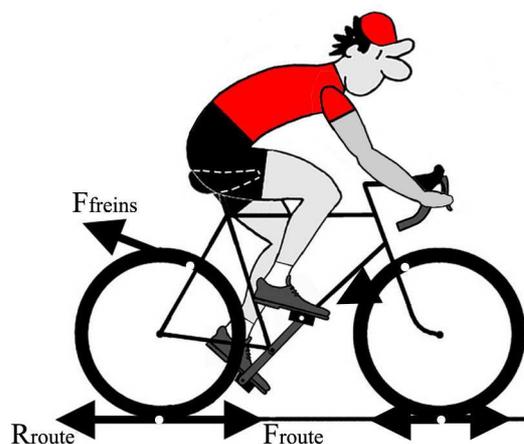


Figure 12.23. Un frottement utile : les freins

Cette force de freinage va s'appliquer sur la route à son point de contact avec le pneu, dans le sens du déplacement. La réaction de la route, de sens opposé, va donc freiner l'avancée du cycliste. C'est exactement l'inverse de la propulsion du vélo, que nous verrons au chapitre 14 (en 14.1.3). Tout l'art du freinage est d'éviter que ce frottement devienne statique et bloque la roue.

### 12.3.2.2. Quantification des frottements dus au freinage

Faisons la part des frottements liés à l'air et de ceux qui sont dus au freinage. On peut avoir facilement une idée de la dépense liée à chaque coup de frein par la variation d'énergie cinétique. Celle-ci variant avec le carré de la vitesse, plus la vitesse est élevée, plus les variations sont fortes.



Pour Maurice et sa randonneuse (70 + 16 kg), à chaque action sur les freins pour diminuer la vitesse de 10 km/h, la variation de  $E_K$  est de :

- 1.659 joules entre 30 et 20 km/h
- 2.323 joules entre 40 et 30 km/h
- 2.986 joules entre 50 et 40 km/h
- 3.649 joules entre 60 et 50 km/h. etc...

À partir de ces chiffres, on peut tenter une estimation de la valeur des coups de freins « moyens » de Maurice, dans une descente, en terme d'énergie dépensée :



Du sommet du Ventoux à Bédoin, le « coup de frein moyen » permet de passer de 60 à 40 km/h et consomme 6.635 J. Pour créer cette énergie, Maurice avait dû grimper 7,9 m de dénivelée. Dans la descente vers Sault, plus tranquille, le coup de frein moyen permet de passer de 50 à 30 km/h et consomme 5.309 J, soit l'énergie potentielle gravitationnelle créée par 6,3 m d'escalade.

Et à partir de la dépense ainsi estimée, on peut se livrer à l'analyse de toute une descente :



Du Ventoux à Bédoin en 30 minutes = 40 km/h.  
 $E_{PG}$  disponible : 1.378.540 J.  
 $E_{frottements} = 38,1 \text{ J/m}$ , soit au total = 761.728 joules.  
 Il ne reste plus que 616.812 J.

$616.812/6.635 = 93$  coups de freins

Même descente en 24 minutes = 50 km/h de moyenne.  
 $E_{PG}$  disponible : 1.378.540 J.  
 $E_{frottements} = 56 \text{ J/m}$ , soit 1.120.062 joules.  
 Il ne reste plus que 258.478 joules pour freiner.

$258.478/6.635 = 39$  coups de frein.  
 Maurice va vite parce qu'il freine peu !

Descente sur Sault (Fontaine Bayard) en 42 mn = 35 km/h.  
 $E_{PG}$  disponible : 1.025.047 J.  
 $E_{frottements} = 30,6 \text{ J/m}$ , 749.084 joules.  
 Il ne reste plus que 275.963 joules pour freiner.

$275.963/5.309 = 52$  coups de freins.

## 12.3.3. LA PERTE D'ADHÉRENCE D'UNE ROUE

### 12.3.3.1. Analyse des causes de glissement

Lorsque deux surfaces tendent à glisser mais ne se déplacent pas, à cause du frottement, on dit qu'il y a adhérence. Mais au bout de l'adhérence il y a le glissement, ou le dérapage, dès que l'on dépasse la force de frottement statique maximale  $F_{FSmax}$ .

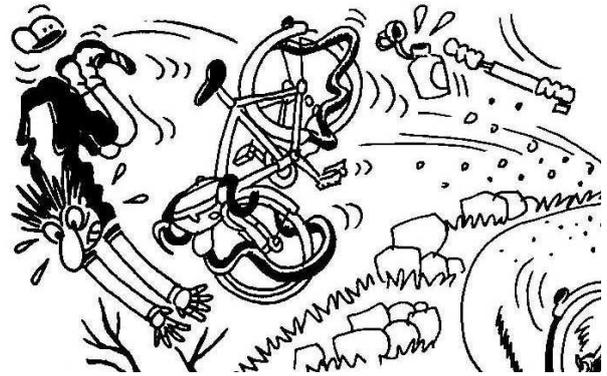
Considérons maintenant les deux roues d'une manière indépendante. Les constats que nous venons de faire s'appliquent à chaque roue et l'on pourrait décomposer la force de réaction de la route sur les deux roues, dans un plan orthogonal à la trajectoire de chaque roue. Au moins sur un terrain plat, la force de réaction de la route est portée par une droite passant par le moyeu de la roue.

Le dérapage d'une seule roue est dû à une mauvaise répartition du poids entre les deux roues, un mauvais dosage du freinage et donc à un blocage de ladite roue.

Tout le monde a remarqué que la roue arrière dérapait souvent la première. Tant mieux, car un dérapage de la roue avant est plus difficile à contrôler, et c'est peut-être l'explication.

Il y a au moins trois raisons au dérapage d'une seule roue et plus particulièrement de la roue arrière :

1 - Un freinage trop puissant porte trop en avant l'application au sol de la force de gravité, par libération excessive d'énergie cinétique. L'arrière s'allège, son adhérence diminue et la roue glisse. *A contrario*, l'avant s'alourdit, l'adhérence de la roue directrice augmente et, si la roue arrière part latéralement, le vélo pivote autour de l'axe de direction. Il est parfois possible d'éviter la chute en contre-braquant, c'est-à-dire en faisant une manœuvre avec le guidon pour diminuer la force centripète. Si cela ne suffit pas, c'est la culbute. Le remède est préventif. Il faut ralentir assez tôt pour pouvoir freiner plus doucement et rester dans les limites de l'adhérence de chaque roue.



2 - Deuxième explication, liée à un freinage trop puissant. Un excès de frottement des freins sur la jante, provoque le blocage d'une roue qui se met à glisser. Trop d'énergie cinétique libérée, adhérence de la roue débordée ! Et là aussi, la roue arrière part souvent la première, car ce que l'on craint en freinant, plus ou moins consciemment, c'est de bloquer la roue avant ou de passer par-dessus. Pas de bloquer la roue arrière. Il n'est pas facile d'avoir la main juste, à la fois pondérée et décidée, sur la poignée du frein avant. C'est pourtant la clé d'un bon freinage puisque c'est sur l'avant que l'adhérence est presque toujours la meilleure.

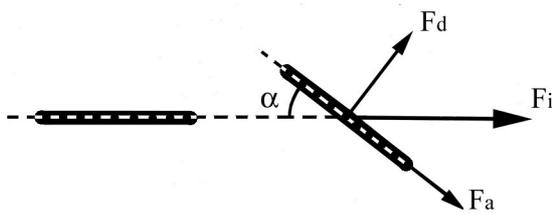


Figure 12.21. Les forces qui s'exercent sur la roue avant.

3 - Une troisième explication est proposée par Claude RAFFENNE : « ... La roue avant est directrice. En tournant le guidon, on lui fait donc prendre un certain angle  $\alpha$  avec la trajectoire du vélo. La force d'inertie  $F_i$  (due à l'énergie cinétique) est, bien sûr, dans le sens d'avancement dudit vélo. Elle se décompose en une force  $F_a$  qui est dans l'axe d'avancement de la roue avant, et une force  $F_d$  qui s'ajoutera alors à la force de frottement. Si celle-ci est déjà à la limite, il y aura dérapage de la roue avant, d'autant plus vite que  $\alpha$  est plus grand... »

### 12.3.3.2. Plaidoyer pour une égalité des roues

Le glissement d'une roue, s'il n'est pas maîtrisé, est le plus souvent dû à une erreur de pilotage. Que ce soit lors d'un freinage en ligne droite ou lors d'un virage, avec ou sans freinage, il y a soit excès de vitesse, soit maladresse. Quelquefois, la cause d'un dérapage n'est pas liée à la conduite. Le pneu est mal gonflé ou trop lisse pour une route trop glissante. La responsabilité du pilote reste entière, qui aurait dû mettre la bonne pression, changer de pneu, adapter son allure à l'état de la chaussée.

Pour une tenue de route optimale, il faut apprendre à répartir le freinage sur les deux roues, à avoir une adhérence égale, pour supprimer le risque de voir une roue glisser trop tôt, avant l'autre. C'est la seule manière de reculer les limites du dérapage. La meilleure façon de ralentir ou d'arrêter une bicyclette est d'actionner les deux freins de sorte que les deux roues soient sur le point de se bloquer mais tournent encore. On peut le faire à la main, ça fait partie de l'apprentissage et de la technique cycliste. Des freins antibloquages (ABS) assistés par ordinateur pourraient être une bonne solution. On n'y est pas encore sur les bicyclettes !

