

Chapitre 10.

POIDS, MASSE ET INERTIE

« Sur Mars, les poids seraient différents mais la quantité de force nécessaire pour vaincre l'inertie serait la même. » Richard P. FEYNMAN, *Le cours de physique de Feynman*, Dunod, 1979.

10.1. LE POIDS ET LA MASSE

10.1.1. RAPPELS DE MÉCANIQUE : DÉFINITIONS

10.1.1.1. Poids et masse

Tout objet est attiré vers le sol. Il est soumis à l'action de la pesanteur due à l'attraction exercée par la terre sur toutes les particules de la matière qui le compose. L'ensemble de ces forces sur un même corps s'appelle poids P du corps. La masse m est la quantité de matière composant un corps. Elle est invariable et indépendante de l'effet de la pesanteur. La masse d'une bicyclette est la même sur la lune, sur la terre ou dans l'espace, en apesanteur. Il existe une relation entre la masse et le poids : $P = m \times g$ dans laquelle g est l'intensité de la pesanteur. P s'exprime en newton (N), comme toutes les forces. La masse m s'exprime en kilogrammes (kg) et g en N/kg. La valeur de g dépend du lieu, mais reste voisine de 9,81 N/kg sur notre planète. Le poids est donc une force F_{poids} . Celle-ci s'applique au centre de gravité de l'objet, sa direction est verticale, son sens vers le bas et son intensité est égale à sa masse multipliée par l'intensité de la pesanteur.



La masse de Maurice est de 70 kg. Son poids est de 686,7 N.
La masse de sa randonneuse est de 11,5 kg, elle pèse 112,8 N.
La sacoche avant a une masse de 4,5 kg et pèse 44,15 N

On mesure les forces de pesanteur avec une bascule ou un pèse-personne. L'affichage des balances domestiques est ajusté pour tenir compte des effets de la gravité. En conséquence, ces appareils de mesure du poids donnent directement notre masse et l'expriment donc en kilogrammes. C'est ainsi que nous confondons dans la vie courante poids et masse.

10.1.1.2. Centre de masse corporel

Pour analyser facilement un phénomène mécanique, on considère que la masse entière d'un corps est située en un seul point appelé centre de masse. Le centre de masse est confondu avec le centre de gravité ou centre d'inertie. Le point d'application de la force du poids est donc, par définition, le centre de masse. Sa ligne d'action est verticale et elle se dirige vers le bas.

Le centre de masse du corps humain debout, les bras le long du corps, en équilibre, est situé au niveau de la deuxième vertèbre sacrée (environ à mi-chemin entre l'ombilic et le pubis si l'on prend des repères en avant). Il est dans un plan sagittal médian et à peu près dans un plan frontal passant par l'axe des deux hanches (figure 10.1). La verticale du centre de masse passe à l'intérieur de la surface déterminée sur le sol par les deux pieds et l'espace qui les sépare. On appelle cette surface polygone de sustentation. Le corps humain n'est pas rigide mais articulé. Le centre de masse change donc de position avec les mouvements. Il suffit de lever un bras ou d'avancer une jambe pour que se déplace le centre de masse corporel. Nous en faisons l'expérience à chaque instant en provoquant le déséquilibre nécessaire à la marche, par exemple. Ce déséquilibre est dû au déplacement du centre de masse dont la verticale tend à sortir du polygone de sustentation. Pour rattraper notre équilibre nous avançons un pied, modifiant ainsi notre surface de sustentation...

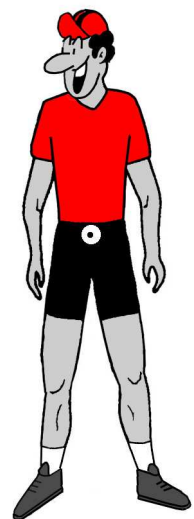


Figure 10.1. Le centre de masse du cycliste.

10.1.1.3. Centre de masse segmentaire

Chaque segment corporel possède son centre de masse. Comme chaque segment est considéré comme étant rigide, le centre de masse segmentaire est fixe à l'intérieur du segment et se déplace avec lui. Des tables anthropométriques proposent des valeurs normalisées (c'est-à-dire généralisées à l'ensemble des individus d'âges, de sexes et de poids différents) de la masse du segment et de la position du centre de masse, pour chaque segment corporel. Nous avons vu au chapitre 4 (en 4.5) ce que sont les segments corporels et comment ils se mesurent. Il est facile d'admettre le caractère rigide de segments comme la cuisse, la jambe, le bras ou l'avant-bras qui sont, en quelque sorte, définis par des os longs. Pour le tronc, le cou et la tête, la main, le pied, il s'agit d'une approximation, dont nous nous contenterons.

Le tableau ci-dessous donne les masses des différents segments, en pourcentage du poids total, d'après les travaux de Winter (voir référence en fin d'ouvrage). Nous proposons une légère rectification sur la masse, pour tenir compte du développement musculaire des cyclistes concentré sur les membres inférieurs et surtout la cuisse. Il donne également la position du centre de masse des segments par rapport aux extrémités proximales et distales, exprimée en pourcentage de la longueur du segment.

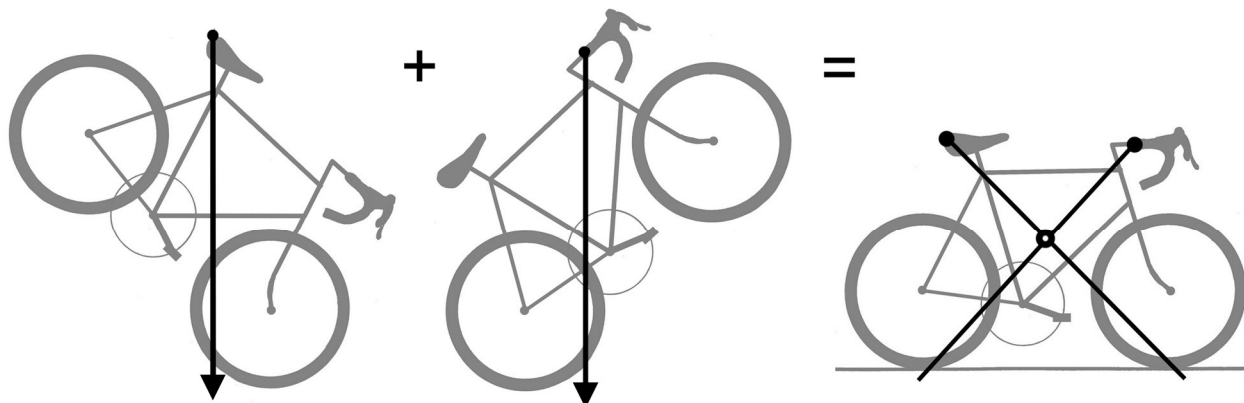
| | Masse des segments en % de la masse corporelle | | Distance du centre de masse à l'extrémité du segment en % de sa longueur | |
|----------------|---|----------|---|---------|
| | Piéton | Cycliste | Proximale | Distale |
| Tête-cou-tronc | 57,8 | 56,1 | 66 | 34 |
| Un bras | 2,8 | 2,7 | 43,6 | 56,4 |
| Un avant-bras | 1,6 | 1,55 | 43 | 57 |
| Une main | 0,65 | 0,6 | 50,6 | 49,4 |
| Une cuisse | 10 | 11 | 43,3 | 56,7 |
| Une jambe | 4,65 | 4,65 | 43,3 | 56,7 |
| Un pied | 1,45 | 1,45 | 42,9 | 57,1 |

Tableau IX : Masse des segments corporels et distance du centre de masse aux extrémités du segment.

10.1.2. DÉTERMINATION DES CENTRES DE MASSE

10.1.2.1. Le centre de masse de la bicyclette

Le centre de masse d'une bicyclette dépend de la géométrie du cadre, du poids des accessoires et de l'équipement de la bicyclette. Ainsi, à cotes égales, le centre de masse d'une bicyclette de randonnée, équipée d'une sacoche de guidon, sera situé plus en avant que celui d'un vélo de course. On admettra que le centre de masse d'un vélo se situe dans son plan sagittal, ce qui n'est pas vrai puisque la bicyclette n'est pas symétrique, la transmission étant presque intégralement à droite. De plus, la partie avant (fourche, roue avant, frein, garde-boue, porte-bagages, sacoche éventuelle, potence, cintre, poignées de freins...) est mobile autour de l'axe de la direction.



Figures 10.2.1 et 2 et 10.3. Détermination du centre de masse d'une bicyclette.

La détermination du centre de masse de la bicyclette est aisée. Il suffit de la suspendre par un fil attaché à deux endroits différents, la selle et le cintre par exemple (figure 10.2.1 et 2). Le centre de masse est situé dans le plan sagittal, au croisement des deux droites verticales qui portent le fil (figure 10.3).



Sur la randonneuse de Maurice, avec une sacoche de guidon, le centre de masse se trouve à 10 cm en avant et 15 cm au dessus de l'axe de pédalier, au niveau du goulot du bidon fixé sur le tube diagonal.

Sans sacoche, il se situe nettement plus en arrière et plus bas. À l'inverse, avec une sacoche de guidon et deux saches surbaissées à l'avant, il se situe beaucoup plus en avant et plus bas qu'avec la seule sacoche de guidon.

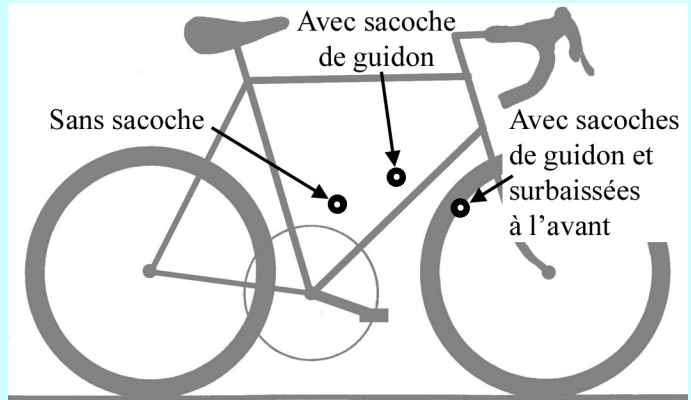


Figure 10.4. Centres de masse de la randonneuse de Maurice.

10.1.2.2. Le centre de masse du cycliste

Caractériser le centre de masse du cycliste est plus délicat. On utilise une méthode complexe que nous avons commencé à introduire en 10.1.1.3 et que nous allons illustrer maintenant. Chez un cycliste en train de pédaler, le tronc est incliné en avant, les bras et les jambes sont en avant du bassin et des hanches. Le centre de masse est donc déplacé vers l'avant par rapport à la position debout. Si le « haut » du cycliste (au-dessus des hanches) reste fixe par rapport au vélo, pour une position donnée, les différents segments du membre inférieur sont en mouvement. Leurs centres de masse se déplacent dans un plan que l'on dira parallèle au plan sagittal de la bicyclette. Pour les situer à chaque instant du pédalage, il faut faire un schéma de la position dans un plan sagittal et placer chaque centre de masse dans un système de coordonnées à deux axes. Par exemple, on peut prendre l'axe de flexion-extension de la hanche H comme point zéro, la verticale de H comme axe des ordonnées y, orienté vers le bas, et l'horizontale de H comme axe des abscisses x, orienté vers l'avant (figure 10.5).

Dans un plan parallèle au plan sagittal, le centre de masse de la cuisse se déplace sur un arc de cercle puisque la hanche est fixe. Celui de la jambe suit une courbe ovoïde de grand axe quasi vertical et celui du pied une courbe ovoïde, presque circulaire. Le centre de masse d'un seul membre inférieur décrit une courbe en forme de banane à concavité orientée en arrière et en haut (figure 10.6).

On procède de même pour l'autre membre inférieur. Le centre de masse des deux membres inférieurs est quasiment fixe dans le plan sagittal de la bicyclette. Il n'oscille que de quelques millimètres selon la phase du pédalage, à cause des mouvements des deux chevilles. Vu latéralement, on va dire qu'il se situe au « centre de la banane ».

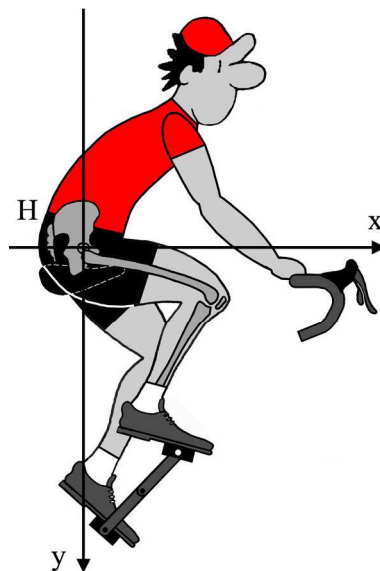


Figure 10.5. Un système de coordonnées

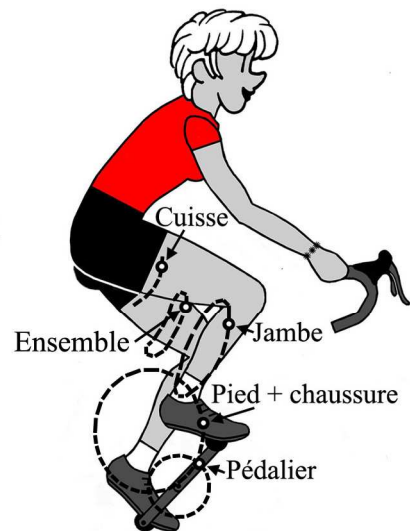


Figure 10.6. Centres de masse des 4 leviers du pédalage et de l'ensemble.



1 - Cordonnées (en mm et pédale à 90°) des centres de masse de la cuisse, de la jambe et du pied :

Cuisse : $y = 92$ et $x = 151$; Jambe : $y = 377$ et $x = 294$; Pied : $y = 629$ et $x = 279$

2 - Masses (d'après le tableau du paragraphe 10.1.1.3) :

Cuisse : 7,7 kg, jambe : 3,255 kg, pied : 1,015 kg, ensemble du membre inférieur : 11,97 kg.

2 - Calcul des coordonnées du centre de masse de l'ensemble du membre inférieur :

$$y = [(92 \times 7,7) + (377 \times 3,255) + (629 \times 1,015)] / 11,97 = 215 \text{ mm.}$$

$$x = [(151 \times 7,7) + (294 \times 3,255) + (279 \times 1,015)] / 11,97 = 201 \text{ mm.}$$

Et ainsi de suite pour la tête, le cou, le tronc, les membres supérieurs. On localise le centre de masse du cycliste en utilisant la même méthode de cheminement pas à pas. Il se trouve sur le segment reliant le centre de masse du « haut du corps » à celui des deux membres inférieurs (voir figure 10.7).

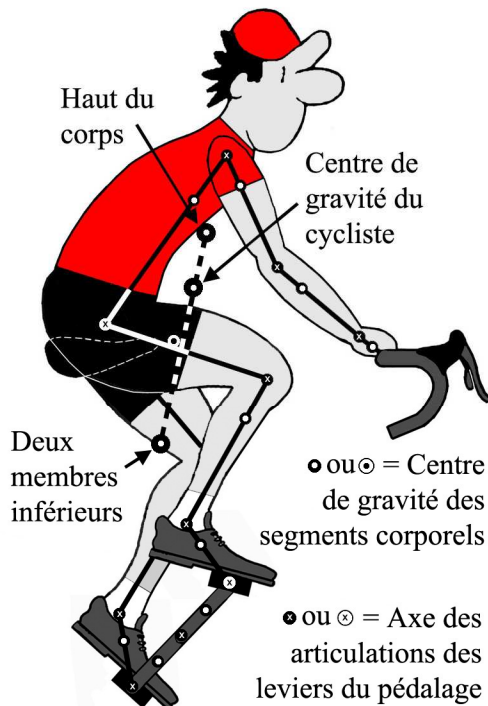


Figure 10.7. Les centres de gravité segmentaires, de chacun et des deux membres inférieurs, du « haut » du corps et du cycliste en position.

En « danseuse », le corps est redressé. Le cycliste se lève de la selle, sur les pédales. Le centre de masse se trouve alors un peu plus haut, beaucoup plus en avant et il oscille un peu, de bas en haut, à chaque demi tour de pédalier.

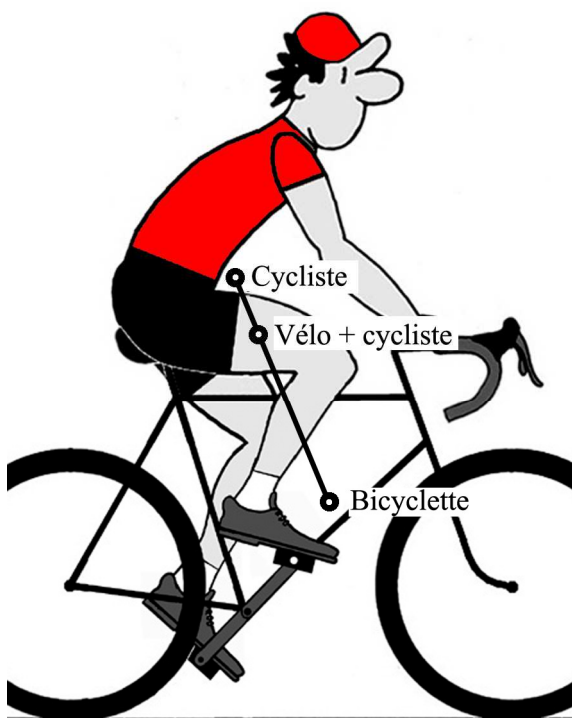


Figure 10.9. Synthèse des centres de masse.

Le centre de masse du cycliste, « mains en haut du cintre », position de référence, est situé environ 5 cm en avant et 10 cm au-dessus du bec de selle. Par rapport à la position debout, le centre de masse se trouve projeté une vingtaine de centimètres en avant et ne se situe plus dans l'enveloppe corporelle. Selon la position, le centre de gravité du cycliste se déplace. Dans la position « mains aux cocottes », très utilisée, la distance entre le bassin et les mains s'accroît et le tronc s'incline en avant. Le centre de masse est donc plus en avant et en bas. La position « mains au bas du cintre » (figure 10.8) ou celle du triathlète, accentue encore l'inclinaison du tronc et porte le centre de masse du cycliste plus bas et plus en avant que dans la position précédente.



Figure 10.8. Le centre de masse du cycliste se déplace vers l'avant et vers le bas quand il met les mains aux cocottes et encore plus quand il met les mains au bas du cintre.

10.1.2.3. Le centre de masse de l'ensemble vélo-cycliste

Le centre de masse du couple cycliste et vélo est localisé sur le segment reliant le centre de gravité du cycliste et celui de la bicyclette (figure 10.9). En position « mains en haut du cintre », avec une sacoche de guidon, il se situe environ 8 à 10 cm en avant du bec de selle, à peu près à la même hauteur. « Mains aux cocottes » ou « en bas du guidon », le centre de masse est plus en avant et plus bas, surtout si le vélo est équipé de sacoche surbaissées. Etc.

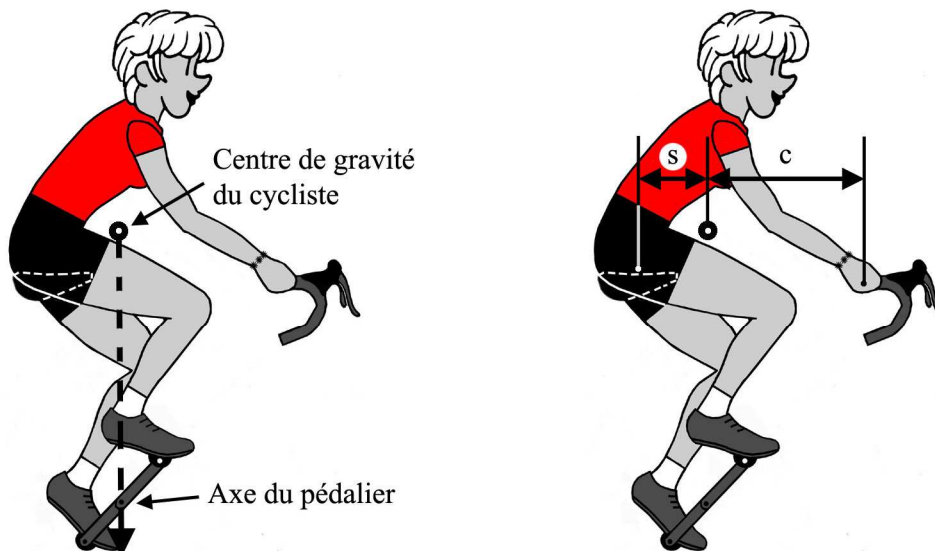
10.1.3. CENTRE DE GRAVITÉ DU CYCLISTE PAR RAPPORT AU VELO

Ce qui nous intéresse maintenant, c'est le positionnement réciproque du cyclotouriste et de sa machine. De cette relation dépend confort et plaisir du pédaleur et donc son efficacité. Ce n'est pas de bas en haut que le problème se pose. La route est en bas et le vélo est en dessous du cycliste ! Ni de gauche à droite, randonneuse et pédaleur ont le même plan sagittal, ne contestons pas cela tout de suite. La question est donc celle de la position du centre de gravité du cycliste d'avant en arrière.

Dans le pédalage *stricto sensu*, intéressant les seuls membres inférieurs, il est essentiel d'avoir une bonne longueur des manivelles, une bonne distance entre l'axe du pédalier et l'axe de flexion extension de la hanche, une réelle fixité du bassin. Ces conditions remplies, peu importe si l'on pédale sur le dos, la tête en bas, les jambes en l'air ou à plat ventre... Mais le cycliste n'est pas que fesses, cuisses ou jambes. Au-dessus de son bassin, il digère, respire, goûte, sent, écoute, regarde où il va, s'émeut du paysage, parle aux oiseaux... Il assume sa condition de bipède vertical et se déplace grâce à ses deux membres, justement nommés inférieurs. Il maîtrise ainsi la relation avec son environnement. Bref, le cycliste pédale le plus souvent avec la tête en haut, le cœur au milieu et les pieds en bas, sur les pédales. Il a le nez et les yeux en avant et les fesses en arrière. Il pédale assis. Posé sur sa selle, les mains au guidon, il a fixé son bassin.

La bonne répartition du poids du cycliste se définit logiquement par rapport à l'axe du pédalier (figure 10.10). Assis sur la selle, les mains tenant la partie haute du guidon, le bon équilibre de base est trouvé quand le centre de gravité du cycliste est à l'aplomb de l'axe de pédalier. Le confort est alors maximum et la liberté de mouvement du tronc, de la tête, des bras et des mains est préservée. Sous réserve d'une distance adéquate entre la selle et le guidon, il est facile de se lever sur les pédales pour se mettre en danseuse. Ou de faire porter son poids légèrement en arrière pour lâcher le guidon d'une main et prendre un biscuit dans la sacoche ou dans la poche du maillot.

On peut analyser et régler sa position en utilisant la méthode exposée plus haut. Mais c'est long et, de toutes manières, les mesures des différents segments sont difficiles à faire. On évaluera donc la position du centre de gravité corporel par rapport à l'axe du pédalier d'une manière simple : en roulant les manivelles bien horizontales, décoller à peine les fesses de la selle. Tenir la partie haute du guidon entre le pouce et l'index, comme avec des pincettes. La position est bonne s'il y a équilibre. Une position trop en arrière oblige à se rasseoir et une position trop en avant fait plonger vers le cintre. On reverra cela en 15.5.2.2.



Figures 10.10 et 10.11. La répartition du poids du cycliste sur le vélo : la verticale du centre de gravité doit passer par l'axe de pédalier. Il est facile de voir que l'essentiel du poids porte sur la selle.

La répartition du poids du pédaleur entre la selle et le guidon est fonction de la position du cycliste (et donc de la position de son centre de gravité), de la distance des ischions (s comme selle) et des mains (c comme cintre ou cocottes) à la verticale du centre de gravité. Le poids « arrière » repose, en effet, sur la selle au niveau des ischions, c'est-à-dire environ 20 mm en arrière du milieu de la selle (figure 10.11) Le poids avant repose soit en haut du cintre, sur sa partie horizontale, soit sur les cocottes, soit sur la partie basse du cintre.

Poids sur la selle = Poids du cycliste $\times c / (s + c)$

Poids sur le guidon = Poids du cycliste $\times s / (c + s)$.

En prenant l'exemple de la position de Maurice, voici comment se répartit son poids entre la selle et le cintre.

| | % sur la selle | % sur le cintre |
|----------------|----------------|-----------------|
| Haut du cintre | 68 | 32 |
| Cocottes | 69 | 31 |
| Bas du cintre | 67 | 33 |

Cela confirme ce que nous ressentons sur nos montures. La position mains aux cocottes soulage un peu les bras. Celle au bas du cintre accentue au contraire leur travail. Dans les deux positions, « mains aux cocottes » et « mains au bas du cintre », la verticale du centre de gravité du cycliste passe en avant de l'axe de pédalier et le centre de gravité du couple vélo-cycliste, que nous allons étudier ci-dessous, se déplace lui aussi en avant. En attendant, rappelons que l'inclinaison du tube de selle, le réglage de la position de la selle d'avant en arrière, la longueur du cadre, la longueur de la potence et la hauteur du cintre conditionnent la position du centre de gravité du cycliste. Nous y reviendrons au chapitre 15.

10.1.4. CENTRE DE GRAVITÉ DU COUPLE VÉLO-CYCLISTE PAR RAPPORT AU PLAN SAGITTAL

Nous admettons généralement que le centre de gravité G du cycliste et de son vélo est situé dans le plan sagittal de la bicyclette. La réalité est un peu plus compliquée et variable pour des raisons mécaniques et anatomiques. Sur le vélo, la transmission est située à droite. Le pédaleur est rarement symétrique, plus musclé à droite s'il est droitier... Le centre de gravité de l'ensemble est alors un peu à droite du plan sagittal du vélo (figure 10.12).

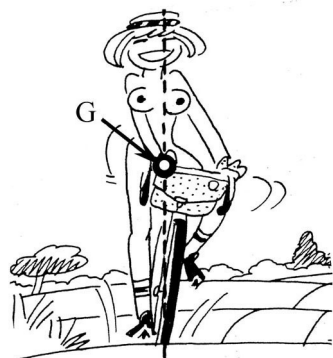


Figure 10.12. Le centre de masse G du cycliste et de son vélo reste proche de la verticale du segment joignant les deux points de contact des roues avec le sol.

Lors d'un mouvement rectiligne, il se situe dans le plan vertical passant par les deux points de contact de la bicyclette avec le sol, et vélo et cycliste sont très légèrement inclinés vers la gauche. Cela n'a aucune influence sur le pédalage. Mais si l'on roule avec des sacs latéraux, fixés à l'avant ou à l'arrière, il faut veiller à bien équilibrer leur poids de chaque côté pour ne pas provoquer une inclinaison et un tirage du vélo du côté le plus chargé.

En danseuse, le vélo oscille d'un côté à l'autre du plan vertical. Le centre de gravité du cycliste oscille lui aussi, dans le sens inverse, pour rétablir l'équilibre. En position assise, le vélo ne bouge pratiquement pas si le pédalage est de bonne qualité. Mais comme l'effort est alternatif et asymétrique, il y a quand même un très léger basculement à chaque tour de pédale. On le constate en regardant la boîte de pédalier qui oscille de part et d'autre du tube horizontal du cadre.

10.1.5. CENTRE DE GRAVITÉ DU COUPLE VÉLO-CYCLISTE PAR RAPPORT AU PLAN FRONTAL - RÉPARTITION DU POIDS SUR LES DEUX ROUES

La position du centre de gravité, d'avant en arrière, fixe la répartition du poids entre les deux roues et détermine donc leur adhérence (voir au chapitre 12 sur les frottements). Rappelons juste que l'adhérence des roues est due à des frottements entre le pneu et le revêtement de la route et que ces frottements sont liés à la matière et à la texture de l'enveloppe et du sol, mais aussi au poids du couple vélo-cycliste.

Dans un mouvement rectiligne, l'application au sol du poids du cycliste et de son vélo, à partir du centre de gravité, se fait entre les deux points de contact des roues avec le sol, à une distance a de la roue arrière et une distance b de la roue avant (figure 10.13).

Poids roue avant = Poids total $\times a / (a + b)$

Poids roue arrière = Poids total $\times b / (a + b)$

Le tableau ci-dessous montre la répartition du poids (en %) du couple vélo-cycliste sur la roue arrière, selon la position du pédaleur et le chargement de la bicyclette.

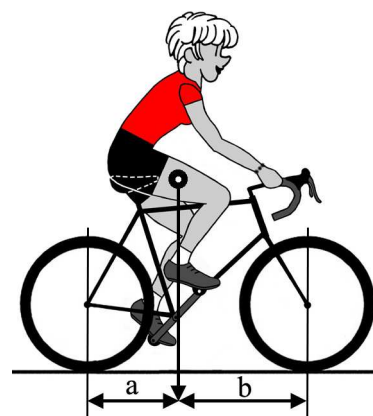


Figure 10.13. Répartition du poids sur les deux roues.

| | % du poids sur la roue arrière | | |
|-------------------------|--------------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| | Sans sacoche | Avec sacoche de guidon | Sacoche de guidon + surbaissées avant |
| Mains en haut du cintre | 58 | 55 | 48 |
| Mains aux cocottes | 56 | 54 | 47 |
| Mains en bas du cintre | 55 | 53 | 46 |
| Danseuse | 48 | 46 | 41 |
| Montée de 10 % | 65 | 62 | 55 |
| Descente de 10 % | 50 | 48 | 42 |

Tableau X : Répartition du poids sur les roues de la randonneuse de Maurice en fonction de la position et de la pente.

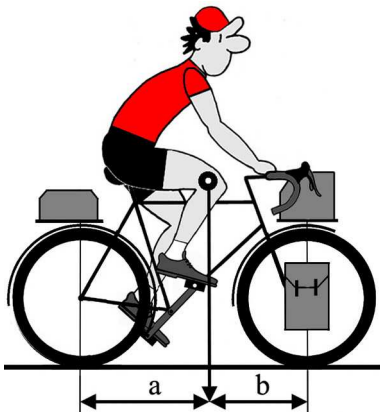


Figure 10.14. Répartition du poids sur les deux roues avec des bagages.

La différence de répartition du poids entre l'avant et l'arrière est finalement faible et s'inverse même en cas de sacs surbaissés à l'avant (figure 10.14). Dans ce dernier cas, un randonneur peut avoir intérêt à mettre une petite partie de ses bagages sur l'arrière de sa bicyclette pour mieux équilibrer les deux roues.

Nous avons tous expérimenté le dérapage de la roue arrière en montant en danseuse une route humide ou gravillonnée. Dans cette position, malgré la pente, le centre de gravité est porté en avant, diminuant ainsi l'adhérence de la roue arrière. Ce phénomène est accentué par un pédalage moins souple et plus heurté, avec de multiples accélérations successives. Heureusement, la montée augmente le poids sur la roue arrière en déplaçant vers l'arrière l'application au sol de la force de gravité (figure 10.15). C'est une bonne chose pour l'adhérence de la roue motrice. À l'inverse, la descente augmente le poids sur la roue avant. C'est donc bien elle qui aura la meilleure adhérence pour le freinage.

Au total, meilleure adhérence de la roue motrice et bonne répartition du poids sur les deux roues lors du freinage sont les arguments qui incitent à placer le centre de gravité de l'ensemble vélo-cycliste en arrière du milieu du segment joignant les deux points de contact des roues avec le sol ($a < b$). Avec les conséquences que cela implique sur la géométrie du cadre et sur la position du pédaleur.

10.1.6. CENTRE DE GRAVITÉ DU COUPLE VÉLO-CYCLISTE PAR RAPPORT AU PLAN HORIZONTAL (BAS OU HAUT)

La position en hauteur du centre de gravité n'a pas l'importance qu'on lui attribue généralement pour la stabilité du vélo, qui est dynamique et non statique. C'est ainsi que Carlo BOURLET affirme que " *les machines les plus stables, les plus sûres et les plus faciles à diriger sont celles qui sont courtes et hautes* ". Dans sa logique, cela tient au fait que plus le centre de gravité est haut, plus l'application au sol de la force de gravité « sort vite » du polygone de sustentation du vélo, si l'on peut dire, et plus la correction avec le guidon intervient tôt.



Figure 10.15. Répartition du poids sur les deux roues en fonction de la pente (ici 10 %). Figures 10.16 et 10.17. Mise en évidence du risque de lever la roue avant (accélération) ou de passer par dessus (freinage) dans des pentes à 17 %.

Mais à l'inverse, plus le centre de gravité est bas, moins l'application au sol de la force de gravité est éloignée du « polygone de sustentation du vélo » et donc moins le moment de la force qui tend à déséquilibrer le cycliste est important. Ainsi, en danseuse, le vélo est plus stable et plus facile à manœuvrer si le centre de gravité est bas. Cet effet « culbuto » est évident avec des sacoches surbaissées.

Un argument majeur plaide en faveur d'un centre de gravité bas, c'est l'amélioration de la sécurité du freinage. En effet, si le centre de gravité est bas, notamment par rapport à l'axe des roues, le risque de passer par-dessus le guidon lors d'un freinage est limité. La chute ne se produit que si la droite portant la résultante de la force de gravité (verticale) et de la force due à la libération de l'énergie cinétique (parallèle à la direction du mouvement) passe au-dessus de l'axe de la roue avant. C'est pour cette raison que les anciens bicyclettes, à grande roue motrice avant, ont été abandonnés au profit de notre bicyclette à roue motrice arrière. Les chutes en avant y étaient trop fréquentes.

Les cyclistes roulant en VTT savent ce que cela veut dire, eux qui ont une boîte de pédalier surélevée, des roues plus petites et s'aventurent souvent sur des chemins raides. Pour les mêmes motifs, un centre de gravité bas limite le risque de voir la roue avant se lever lors d'une accélération en montée.

10.2. L'INERTIE

La réflexion sur l'inertie se fait en référence à la première loi d'Isaac NEWTON, dite « sur l'inertie ». Concrètement, l'inertie est « la résistance des objets pesant au mouvement qui leur est imposé » (Le Robert).

10.2.1. LE MOMENT D'INERTIE

La masse représente la résistance ou l'inertie au mouvement linéaire. Plus la masse d'un objet est importante, plus il est difficile de le déplacer, c'est un constat que nous faisons à chaque heure de la journée. Le moment d'inertie I est la résistance à la mise en rotation, ou à la modification du mouvement de rotation, d'un corps solide autour d'un axe de rotation. Cette résistance varie selon la masse m mais aussi selon la forme, la distribution de la matière et l'axe de rotation. Ces trois derniers facteurs sont rassemblés dans la notion de « rayon de giration k » sur laquelle nous allons revenir ci-dessous.

La formule qui donne le moment d'inertie est :

$$I = m \times k^2.$$

Le rayon de giration (en mètre) y est élevé au carré. Le moment d'inertie s'exprime en kgm^2 .

Illustrons ce que recouvrent le concept de moment d'inertie et l'idée de rayon de giration, en nous livrant à une petite série d'exercices :

- 1) Faisons un mouvement de flexion-extension du coude, d'abord à vide, puis en tenant une roue de bicyclette. La masse de la roue accentue la résistance au mouvement angulaire du coude. Comme pour le mouvement linéaire, la masse contribue à l'inertie du mouvement angulaire.
- 2) Faisons ensuite le même mouvement, d'abord en tenant la roue pendante, puis en la tenant horizontale, à peu près dans le plan de l'avant-bras. L'inertie est plus faible en tenant la roue pendante. La forme de la roue et la distribution de sa masse influencent l'inertie angulaire.

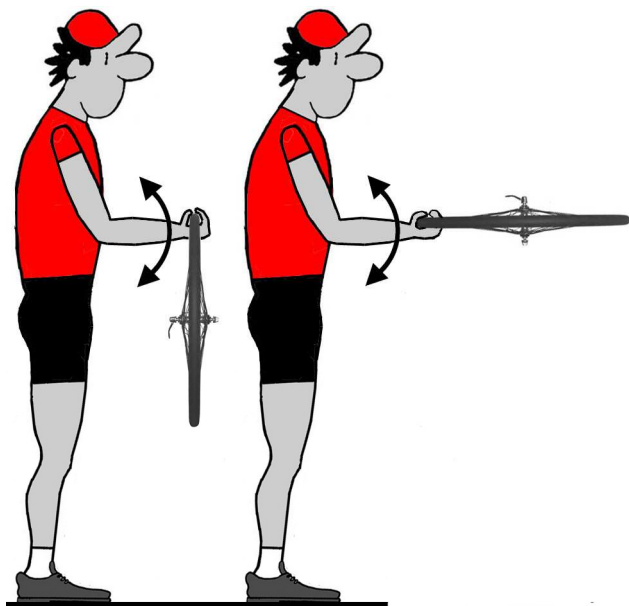


Figure 10.18. Mise en évidence de l'influence de la forme de la roue et de la distribution de sa masse.

10.2.2. LE RAYON DE GIRATION

Le rayon de giration n'a rien à voir avec la distance d'une extrémité d'un segment corporel au centre de masse (voir en 10.1.1.3). La position du centre de masse correspond au point d'équilibre de l'objet. Le rayon de giration correspond à la distance entre l'axe de rotation et l'endroit où toute la masse de l'objet pourrait se situer autour de cet axe, comme pour l'enveloppe.

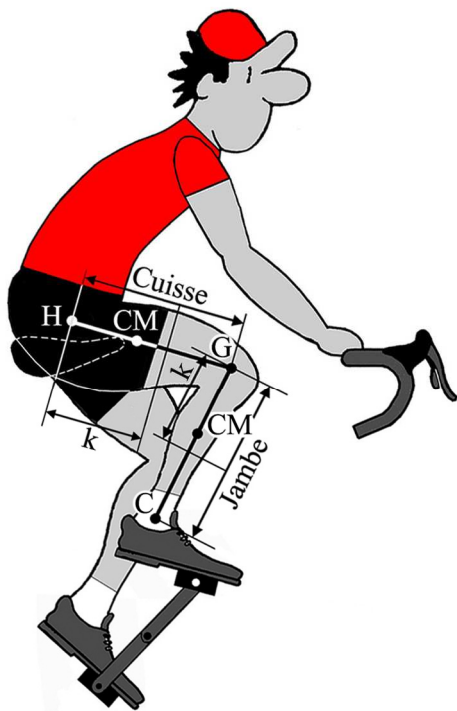


Figure 10.19. Position des centres de masse (CM) et rayons de giration (k) de la cuisse et de la jambe.

Le rayon de giration est difficile à calculer en « mécanique humaine ». Mais, comme nous l'avons vu en 10.1.1.3, des tables permettent de l'estimer pour les différents segments corporels. Celles que nous reproduisons ci-dessous ont été établies également d'après les travaux de Winter.

Prenons l'exemple de la cuisse du cycliste. Le rayon de giration est plus grand quand il est calculé par rapport à l'extrémité proximale (la hanche) et surtout distale (le genou) que par rapport au centre de masse (CM). Cela vient du fait que la masse est mieux distribuée autour du centre de masse qu'autour des deux autres points de la cuisse. La répartition de la masse de la cuisse est plus éloignée de la hanche ou du genou que du centre de masse. La cuisse est plus grosse près de la hanche que près du genou. C'est pourquoi le rayon de giration de la cuisse pour une rotation autour de la hanche est moins important que pour une rotation autour du genou. Les mêmes remarques s'appliquent à la jambe du cycliste.

Reprenons l'exemple d'une roue de vélo. Le centre de masse de la roue se situe sur l'axe du moyeu. Au milieu de cet axe pour la roue avant, décalé vers la droite pour la roue arrière, à cause de la roue libre. Au moins pour la roue avant, l'essentiel de la masse est en périphérie (jante, écrous de rayons, chambre à air, pneu) et celle-ci est distribuée uniformément autour du moyeu, quasiment le long de la jante. Le rayon de giration correspond presque au rayon de la roue.

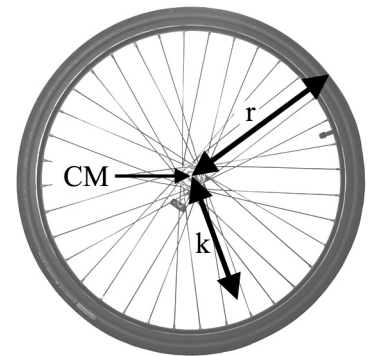


Figure 10.20. Centre de masse, rayon et rayon de giration d'une roue de vélo.

| Axe : | Longueur du rayon de giration selon l'axe de rotation en % de la longueur du segment corporel | | |
|------------------|--|------------------------|----------------------|
| | centre de masse | articulation proximale | articulation distale |
| Tronc-tête-cou | 5,03 | 83 | 60,7 |
| Bras | 32,2 | 54,2 | 64,5 |
| Avant-bras | 30,3 | 52,6 | 64,7 |
| Main | 29,7 | 58,7 | 57,7 |
| Cuisse | 32,3 | 54 | 65,3 |
| Jambe | 30,2 | 52,8 | 64,3 |
| Pied | 47,5 | 69 | 69 |
| Membre inférieur | 32,6 | 56 | 65 |

Tableau XI : Longueur du rayon de giration selon le segment corporel et selon l'axe de mouvement.

10.2.3. EXEMPLES CONCERNANT MAURICE ET SON VÉLO

Nous avons maintenant tous les éléments nous permettant de calculer les moments d'inertie de notre cycliste cobaye. Le poids de Maurice est donné au chapitre 1 (en 1.4.1) et la longueur de ses segments du membre inférieur au chapitre 4 (en 4.5). La masse des segments corporels est calculée à partir du poids total en appliquant les pourcentages proposés en 10.1.1.3. Le rayon de giration est déterminé grâce au tableau XI du paragraphe 10.2.2 ci-dessus.

Cuisse / axe de flexion-extension de la hanche :

- Longueur de la cuisse : 0,44 m
- Rayon de giration : $0,44 \times 0,54 = 0,24$ m
- Masse de la cuisse : $70 \times 0,11 = 7,7$ kg
- Moment d'inertie : $7,7 \times 0,24^2 = 0,435$ kgm².

Jambe / axe de flexion extension du genou :

- Longueur de la jambe : 0,40 m
- Rayon de giration : $0,40 \times 0,528 = 0,21$ m
- Masse de la jambe : 3,255 kg
- Moment d'inertie : 0,145 kgm².



Roue avant / axe de rotation :

- Masse : 1,13 kg (dont 0,855 kg pour jante, chambre à air, pneu ; 0,12 kg pour moyeu et 0,155 kg pour rayons et écrous).
- Rayon : 0,315 m.
- Rayon de giration estimé à 0,27 m.
- Moment d'inertie : $1,13 \times 0,27^2 = 0,082$ kgm².

Roue arrière / axe de rotation :

- Masse : 1,62 kg (dont 0,49 kg pour la roue libre et les pignons).
- Rayon de giration estimé à 0,24 m (masse de la roue libre, proche de l'axe de rotation).
- Moment d'inertie : 0,093 kgm².

Ensemble pédalier + pédales / axe de pédalier :

- Masse : 1,14 kg (axe + trois plateaux + visserie + manivelles + pédales).
- Rayon de giration estimé à 0,13 m.
- Moment d'inertie : 0,019 kgm².

10.3. ÉQUILIBRE ET DIRECTION D'UNE BICYCLETTE

Par quel miracle le cycliste, qui n'a que deux roues, ne tombe pas ?

Comment peut-il se diriger, avec autant de précision, vers le but qu'il s'est fixé ?

C'est ce que nous allons voir maintenant.

10.3.1. LE POIDS ET LA RÉACTION DE LA ROUTE

Le poids de l'ensemble vélo + cycliste s'applique sur la route aux deux points de contact entre les deux pneus et la route. Il est réparti entre les deux roues comme nous l'avons vu aux paragraphes 10.1.5, en fonction de la position du centre de gravité du couple vélo-cycliste. La route exerce, ainsi que l'énonce la troisième loi d'Izaak NEWTON, une force de réaction sur chacune des roues, égale au poids en grandeur, sur la même ligne mais en direction opposée. La direction du poids est toujours verticale, par définition, et donc la direction de la réaction de la route liée au poids (figure 10.21).

Nous admettrons dans un premier temps, pour simplifier, qu'il n'y a qu'un seul point de contact avec la route et que la vitesse du cycliste est uniforme. Il est alors possible d'analyser la force du poids et celle de réaction de la route dans un plan orthogonal à la trajectoire du cycliste, passant par le centre de gravité du pédaleur et de son vélo.

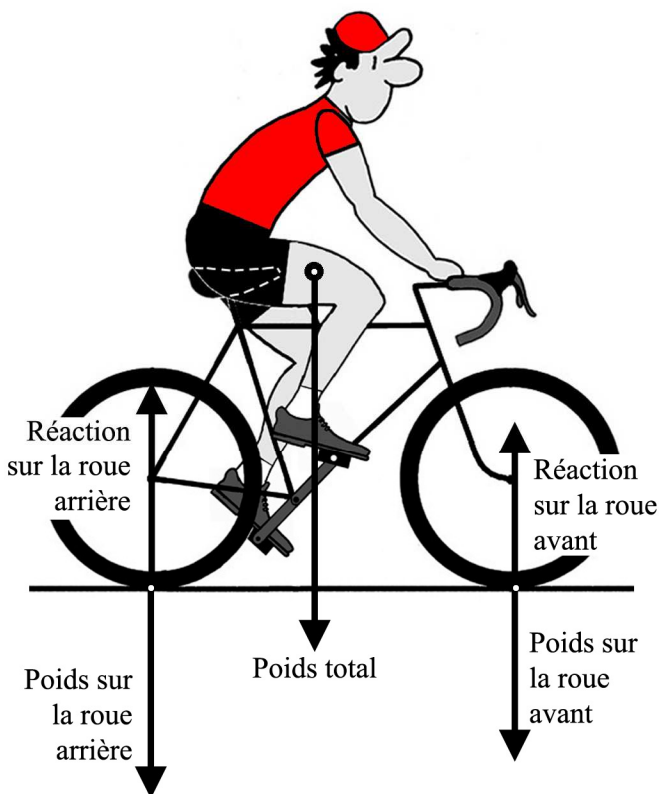


Figure 10.21. C'est la troisième loi d'Izaak Newton qui s'applique sur les deux roues et la route est très "réactive". On en verra l'intérêt au chapitre 12.

Cela sera suffisant pour commencer à appréhender le problème des virages. Nous reviendrons sur ce sujet, à propos des frottements, au chapitre 12 (en 12.3).

10.3.2. PRENDRE UN VIRAGE

Pour prendre un virage, il suffit de quitter la trajectoire rectiligne imposée par la première loi sur l'inertie d'Isaac Newton. Pour cela il faut produire une force, que l'on appelle centripète parce qu'elle tend vers le centre de la trajectoire courbe désirée. À bicyclette, la force centripète est générée en portant le centre de gravité du côté vers lequel on veut aller, en se penchant donc vers l'intérieur du virage.

Voici la relation qui donne la force centripète, dans laquelle m est la masse du couple vélo-cycliste, v la vitesse et r le rayon de la courbure suivie :

$$F_{\text{centripète}} = m \times v^2 / r$$

Plus la courbe est serrée (r petit) ou plus la vitesse est grande, plus la force requise pour « détourner » le cycliste de son trajet rectiligne est grande, plus il doit s'incliner avec sa monture vers l'intérieur du virage. Nous l'avons tous constaté. Dès que la force centripète est supprimée, le mouvement redevient rectiligne, tangent à la courbe auparavant suivie. Le cycliste se redresse avec son vélo et ramène le centre de gravité dans le plan vertical passant par les points d'appui des deux roues. Nous verrons au chapitre 12 comment les frottements nous empêchent de tomber dans les virages.

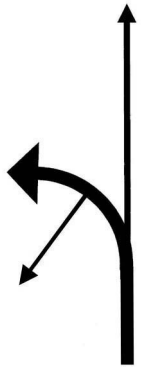


Figure 10.22.
1ère loi d'Isaac Newton.
Tourner c'est quitter une trajectoire rectiligne.

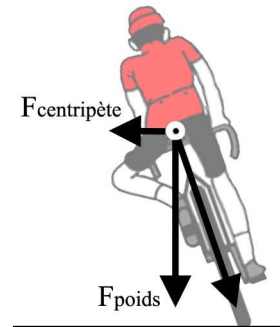


Figure 10.23.
La force centripète

10.3.3. L'ÉQUILIBRE DU CYCLISTE

L'être humain debout reste en équilibre (ne tombe pas) ou ne se met pas en mouvement tant que la verticale de son centre de masse ne sort pas de l'aire de sustentation définie par ses deux pieds. Il est plus difficile de maintenir l'équilibre sur un seul pied et plus facile si les pieds sont un peu écartés. Le mécanisme qui permet de garder son équilibre est très complexe. L'homme dispose, dans le vestibule de chaque oreille, d'un récepteur sensible aux mouvements et à la position de la tête dans l'espace : le labyrinthe. Sous la régulation du système nerveux, sa stimulation provoque une série de mécanismes agissant dans le même sens ou en sens opposé, et dont l'ensemble forme cette fonction que l'on appelle équilibre.

À vélo il n'y a pas d'aire de sustentation, au sens strict, mais deux points de contact des roues avec le sol. Et pourtant le cycliste ne tombe pas. L'équilibre du cycliste est, en grande partie, dû au mouvement. À la fin du XIXe siècle, Carlo BOURLET a énoncé les choses ainsi, à propos du cycliste : son équilibre est maintenu en jouant à la fois sur le déplacement latéral du centre de gravité et sur l'organe de direction du vélo, le guidon. Tout se passe comme si le cycliste était en permanence en train de tomber d'un côté ou de l'autre, la projection sur le sol du centre de gravité étant le plus souvent de part et d'autre du « segment de sustentation ».

“Pour se relever, on tourne la roue avant du côté de la chute. La machine se redresse et, lorsqu'elle est relevée, on ramène la roue avant en place”. À l'inverse, pour effectuer un virage, “il faut tourner le guidon du côté du virage et faire pencher la machine du même côté, d'un angle convenable”.

Cette description de Carlo BOURLET ne fait qu'illustrer le mécanisme général de l'équilibre, mis en action par les stimulations du labyrinthe. Mais sur une bicyclette, il y a autre chose. À cette gymnastique, s'ajoute l'effet gyroscopique des roues, que nous allons voir maintenant

10.3.4. STABILITÉ ET EFFET GYROSCOPIQUE

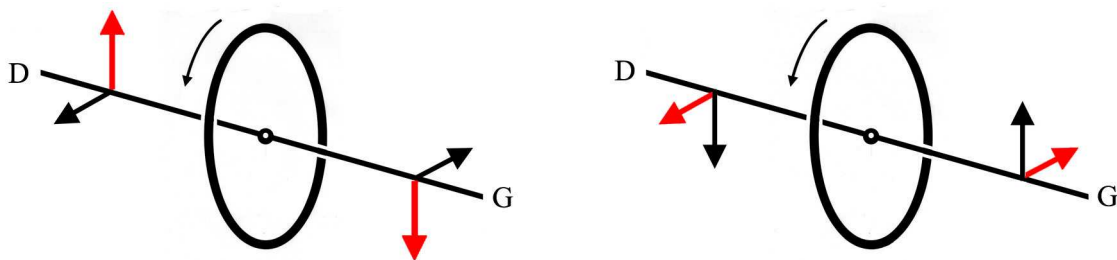
10.3.4.1. La stabilité gyroscopique

L'axe de rotation d'un corps tournant librement a tendance à rester fixe dans son orientation spatiale. C'est ce qu'on appelle la stabilité gyroscopique. Elle est utilisée pour guider les missiles, les avions de ligne, les sous-marins... et les vélos. Elle permet de maintenir l'aplomb vertical de notre bicyclette, grâce à la rotation (si elle est suffisamment rapide) des deux roues.

Prenons une roue de notre vélo en la tenant des deux mains par l'axe de son moyeu. Faisons la tourner rapidement. On sent immédiatement une espèce de raideur qui tend à s'opposer à toute tentative de modification du plan de la roue. La stabilité gyroscopique est une conséquence de la première loi de l'inertie d'ISAAC NEWTON : Tout point d'un corps en rotation tend à prendre une trajectoire tangente au cercle de rotation suivi, dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation, donc à ne pas s'écarter de ce plan.

10.3.4.2. L'effet gyroscopique

Si l'on cherche à agir sur la roue en rotation, avec une certaine force, des effets étranges se produisent. Testez-les sur une roue en rotation rapide que vous tenez à deux mains, devant vous, dans un plan vertical. Essayez, tout d'abord, de porter le haut de la roue vers la gauche. La main gauche s'abaisse et la droite s'élève (flèches rouges). Conséquence : c'est l'avant de la roue qui tourne vers la gauche (flèches noires). Tentez, maintenant, de tourner l'avant de la roue vers la gauche. La main droite s'avance et la gauche recule (flèches rouges). Conséquence : le bas de la roue part vers la gauche et le haut vers la droite (flèches noires).



Figures 10.24 et 10.25. Mise en évidence de l'effet gyroscopique en deux expériences. On comprend alors mieux le comportement de la bicyclette et particulièrement de la roue avant. De quoi modifier sa technique de virage !

Dans ces deux exemples, par rapport à ce que vous vouliez faire, l'effet produit s'est décalé d'un quart de tour, dans le sens de la rotation de la roue autour de son axe. L'effet gyroscopique, que nous venons d'illustrer sur une roue de vélo, ne tient pas du miracle. S'il est difficile à comprendre par un raisonnement mécanique, en s'appuyant sur l'expérience, il est beaucoup plus facile d'accès par une démarche mathématique. Que ceux qui ont la bosse, et que ça intéresse, se reportent au « cours de physique » de Richard P. FEYNMAN.

10.3.5. LA CONDUITE DE LA BICYCLETTE

Nous avons maintenant assez d'éléments pour énoncer les règles de la conduite de la bicyclette. En inclinant la bicyclette vers la gauche, nous faisons tourner la roue avant vers la gauche, et donc le guidon. Pour prendre un virage, nous provoquons cet effet par le déplacement du centre de gravité vers l'intérieur de la courbe. Nous utilisons, d'une part, l'effet gyroscopique, et créons, d'autre part, la force centripète nécessaire à l'infléchissement de la trajectoire. Par contre, en tournant d'abord le guidon vers la gauche, nous inclinons le plan de la roue, et donc de la bicyclette, vers la droite. Si nous voulons réellement tourner à gauche, nous devons déplacer notre centre de gravité vers la gauche.

Au total, quatre effets « dynamiques » se combinent dans l'équilibre et la direction de la bicyclette, avec des conséquences contradictoires ou synergiques :

1. La stabilité gyroscopique contribue au maintien de la verticalité du cycliste, mais s'oppose aux changements de direction.
2. L'action sur le guidon est accessoire par rapport à la direction, mais elle est essentielle pour l'ajustement permanent de la trajectoire et de l'équilibre.
3. L'effet gyroscopique est paradoxal, « disqualifiant » l'action sur le guidon, « valorisant » les déplacements du centre de gravité.
4. La position du centre de gravité est donc primordiale. C'est d'elle que dépendent l'équilibre général et la négociation correcte des virages. Sa gestion relève d'une science très intime, mettant en jeu toute la sensibilité et la maîtrise de l'appareil neuromusculaire du cycliste.

Tout cela est bien complexe. Et encore, faudrait-il parler des effets « statiques » : l'architecture du cadre, l'angle de la douille de direction, le cintre de la fourche, la chasse... Mais l'essentiel est probablement dit.