

Biomécanique

- L'équilibre -

Sources : La bicyclette de Jean-Pierre Vieren, in La Recherche, Novembre 1981, p.1204.
Pratique du cyclisme. Peter Konopka, Paris, Vigot, 1987.
L'aérodynamique des véhicules mus par la force musculaire, A. Gross, C. Kyle et D. Malevicki, Revue Pour la Science, février 1994.
La bicyclette idéale in Pour La Science, Juillet 1996.
Cyclisme sur route. R.Legeay, J.Hardy, D.Roux. Amphora, Paris, 1999.
Le mystère tient toujours debout, in Sport et Vie hors série n°6, Ed. Faton, Dijon, 1997.
L'équilibre à vélo in Pour la Science, Juillet 2003.
Cyclisme et optimisation de la performance. F.Grappe, De Boeck, Paris, 2005.
<https://www.pourlascience.fr/sd/physique/lequilibre-a-velo-7408.php>

Introduction

Le rendement mécanique du vélo avoisine les 99%. A l'indice énergétique, il se situe loin devant l'hélicoptère, l'avion, la voiture et juste derrière le train sur rail. Il se situe également loin devant l'homme en déplacement bipédique (l'oscillation verticale du tronc lui coûte beaucoup d'énergie, 0.75 calories par gramme et par kilomètre parcouru). A vélo, son rendement énergétique est multiplié par cinq (0.15 contre 0.75 cal/g.km). Sa vitesse moyenne de déplacement est multipliée par quatre. Sur une distance de 5 km, un cycliste gagne environ 45 minutes sur un marcheur à dépense énergétique équivalente.

I. L'équilibre en ligne droite

L'équilibre sur un vélo peut se définir comme une suite de déséquilibres récupérés par la technique.

Remarque : ce phénomène est du même type que celui de l'équilibre réalisé avec une baguette que l'on veut faire tenir sur le bout de l'index. Quand la baguette tombe d'un côté, on déplace l'index (donc le bas de la baguette) rapidement du même côté et l'on rétablit l'équilibre.

En fait, trois phénomènes interviennent dans l'équilibre à vélo :

- A l'arrêt ou à faible vitesse (trial), lorsque l'on tombe d'un côté, il suffit de **porter son poids du côté opposé au déséquilibre** pour se rétablir. Cette action revient à replacer le centre de gravité à la verticale du polygone de sustentation.
<https://www.youtube.com/watch?v=1WRfRQc4FvE>
- Avec la vitesse intervient aussi un **effet gyroscopique**. La force gyroscopique est l'énergie cinétique stockée par un mobile circulaire qui évolue dans un fluide. C'est une force qui s'oppose au changement de l'axe de rotation d'une pièce en mouvement. Cet effet augmente avec la vitesse de rotation des roues, mais s'il est sensible pour les motocyclistes (en raison des vitesses élevées atteintes), il intervient

peu pour le cycliste qui se déplace à faible vitesse (on a en effet montré que si on supprimait cet effet par un système de roues compensatrices tournant en sens inverse, le maintien de l'équilibre restait possible).

Démonstration de l'effet gyroscopique : <https://www.youtube.com/watch?v=5zliS7SdjRQ>

Explication de l'effet gyroscopique : https://www.youtube.com/watch?v=JZvHWqyD_zk

Remarque : on peut facilement l'identifier en tenant à bout de bras une roue de vélo en mouvement : si on essaye de l'incliner latéralement, on s'aperçoit que l'on se heurte à une résistance d'autant plus importante que la roue tourne rapidement.
Cet effet correspond aussi à la toupie qui tourne.

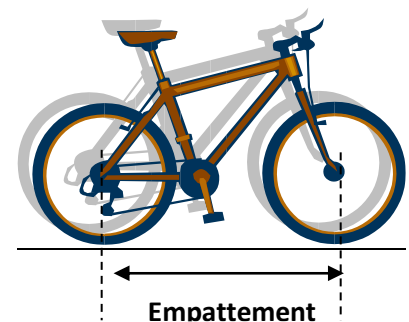
- En réalité, le principal effet stabilisateur repose sur le principe de la **force centrifuge**. Quand le cycliste se sent tomber par exemple sur la gauche, il tourne le guidon à gauche, et donc le vélo commence à amorcer une courbe à gauche. La force centrifuge s'exerce alors à droite et permet de redresser le cycliste et sa machine.

L'équilibre sur un vélo (c'est pas sorcier) : <https://www.youtube.com/watch?v=wechtq95lqM>

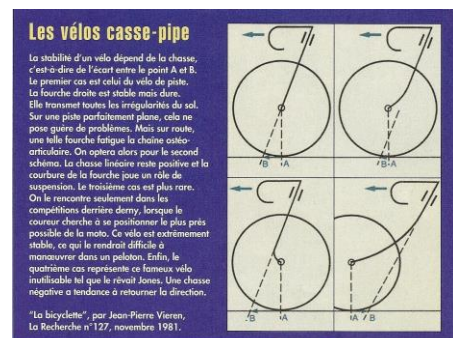
Remarque : ce principe est vérifié par le simple fait qu'il est quasiment impossible de rouler sur un vélo dont le guidon est bloqué.
On constate facilement ce rééquilibrage en regardant les traces laissées par un vélo sur du sable ou de la terre : il ne s'agit pas de lignes droites mais de courbes entrelacées. C'est aussi pourquoi il est presque impossible de rouler sur une ligne droite ou un rail.

Plusieurs facteurs agissent pour rendre + ou - facile l'équilibre du couple homme-machine :

- L'empattement : il désigne la distance entre l'axe des deux roues. Plus cette distance est importante, plus la stabilité et le confort sont grands. Mais plus l'empattement est court, plus le vélo est rigide (moins confortable), nerveux et précis.



- La chasse : elle désigne la distance entre la projection de l'axe de direction sur le sol et le point de contact du pneu au sol. Elle est positive si cette projection précède le point de contact du pneu au sol, nulle si cette projection passe par le point de contact, et négative si elle se situe derrière. La stabilité du couple homme-machine suppose une chasse positive, et plus celle-ci est importante, plus l'équilibre est facilité (une fourche droite augmente la chasse positive, mais elle est plus « dure » et diminue le confort, pouvant même fatiguer la chaîne ostéo-articulaire).



- La hauteur du centre de gravité au-dessus du polygone de sustentation : plus cette distance est faible, et plus l'équilibre est facilité, et inversement. Ce paramètre n'est pas vraiment décisif, même si le cycliste, le vététiste ou le pilote de BMX peuvent adopter une posture parallèle au cadre avant un virage par exemple ou dans des situations d'équilibre précaire.

Définitions : Le polygone de sustentation est le plus petit polygone reliant l'ensemble des points par lequel un corps repose sur un plan horizontal. Plus simplement, il s'agit de la surface entre les points d'appui.

Le centre de gravité est le point d'application de la résultante des forces de pesanteur qui s'exercent sur l'ensemble des particules composant un corps.
Plus simplement, le centre de gravité (G) est le point où la masse totale du corps peut être appliquée.

- Le contact des pneus sur le sol : plus la surface de contact avec le sol est importante, et plus l'équilibre est facilité, car on observe une augmentation de l'adhérence avec le sol.
Mais si la pression est très faible, l'équilibre devient instable, notamment en courbe, en raison de la déformation du pneu.
La surface de contact au sol dépend de la largeur et de la pression des pneumatiques (ainsi en VTT, la largeur des pneus est plus importante que sur la route), ainsi que de la nature du terrain (des routes sans aspérités offrent un meilleur contact que des routes gravillonnées ou pire, que des chemins caillouteux), de l'équipement du vélo en une ou plusieurs suspension(s) (VTT), et de la technique du pilote (choix des trajectoires, évitements d'obstacles, postures spécifiques, notamment en cyclo-cross, en VTT, et en BMX).
- La largeur du cintre : Un cintre large favorise la maniabilité, la stabilité en descente et l'équilibre en danseuse sur le vélo. C'est la raison pour laquelle les cintres de VTT sont beaucoup plus larges que les cintres de route.
- Les conditions extérieures : la pluie, la neige, le verglas, le vent perturbent l'équilibre du cycliste et peuvent le déstabiliser. De nombreuses chutes en compétition sont liées à des conditions extérieures défavorables à l'équilibre.

II. L'équilibre en virage

Dans les virages, le cycliste et sa machine sont soumis à une force qui tend à les tirer vers l'extérieur de la courbe : c'est **la force centrifuge**. C'est la raison pour laquelle si le virage est abordé trop rapidement, le coureur peut facilement sortir de la route, surtout si le rayon de la courbe est petit et/ou si la vitesse est élevée (la force centrifuge augmente avec le carré de la vitesse).

Tout corps qui tourne autour d'un axe exerce sur son support une force centrifuge neutralisée par la réaction du support (force centripète). La force centrifuge est la force qui tend à éloigner le corps de l'axe de rotation.

$$\text{Elle est égale à : } F_z = m \times \omega^2 / r$$

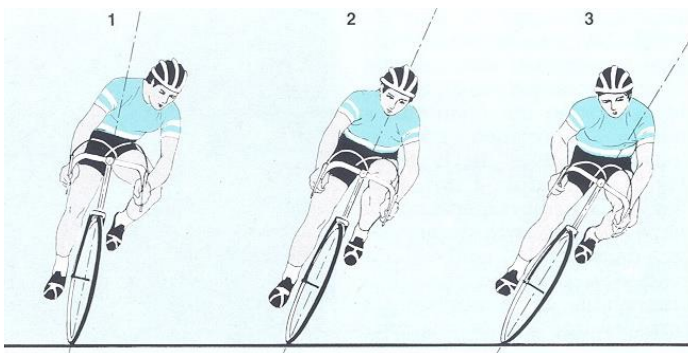
avec m = la masse en kg

r = le rayon du virage en m (de la courbe)

ω = la vitesse dans la virage en rad/s (la vitesse angulaire)

Quelques solutions pour conserver son équilibre dans les virages :

- Diminuer la vitesse. En raison d'une tendance au dérapage, le freinage doit surtout avoir lieu avant le virage, pas ou peu pendant. Il faut freiner de manière équilibrée sur les deux freins, et le plus tard possible (pour ne pas perdre de vitesse en compétition).
- Choisir la trajectoire qui augmente le rayon de la courbe (de type extérieur – intérieur – extérieur (si route protégée et visibilité suffisante)) : regard vers l'avant pour identifier le point de corde et le point de braquage.
<https://www.luc-cheilan.com/2017/02/15/les-trajectoires-en-cyclisme-sur-route/>
- Braquer en douceur vers le point de corde.
- Placer plus de poids sur la roue arrière, en se déplaçant vers l'arrière de la selle.
- Baisser le centre de gravité en plaçant les mains au creux du cintre (route) permet d'augmenter la stabilité.
- Regard vers l'avant et pas sur la roue avant.
- Il est possible de contrer la tendance à sortir de la courbe en s'inclinant en conséquence vers l'intérieur du virage pour que la résultante du poids et de la force centrifuge soit dans le plan du vélo (en montant le genou intérieur afin d'éviter le contact de la manivelle sur le sol). Dans cette configuration, aucun effet de levier ne s'exerce et l'inclinaison reste constante.
- Pieds à l'extérieur de la courbe bien en appui sur la pédale en bas.
- En VTT ou en cyclo-cross, sur des virages serrés, on peut enlever le pied côté virage.
- En VTT pour les virages très serrés, il est possible de provoquer un dérapage (ou un décalage) volontaire de façon à replacer le vélo dans l'axe du déplacement.



Position du coureur dans les virages. Il y a trois façons de contrer la force centrifuge :

1. le corps s'incline à l'intérieur de la courbe, mais le vélo est moins incliné.
2. Le coureur et son vélo sont inclinés dans le virage, selon le même axe.
3. Le vélo est plus incliné que le coureur.

(d'après Pratique du cyclisme. Peter Konopka, Paris, Vigot, 1987).

Pour en savoir plus : <http://www.ffc-bfc.fr/uploads/elfinder/SECTEUR-TECHNIQUE/conseils-techniques/1111825547.pdf>

III. Applications pédagogiques

Le travail autour de l'équilibre suppose une grande **quantité de répétitions en conditions variables** :

- travail à différentes allures, et notamment à vitesse réduite, voire à l'arrêt (course de lenteur, jeu du carré magique) ;

- travail en variant les trajectoires, en diversifiant les types de virages ;
- travail avec contournement et évitement d'obstacles variés (parcours gymkhana) ;
- travail de type trial avec obstacles à franchir ;
- travail en ligne droite sur un espace de plus en plus réduit en largeur ;
- travail en dévers montant ou descendant (en cyclo-cross et en vélo tout terrain) ;
- travail avec courbes à négocier : changer les conditions d'approche du virage (plots pour « ouvrir » ou « resserrer » le virage → modification du freinage, changement du point de braquage et du point de corde) ;
- travail en enlevant un ou plusieurs appuis du vélo ;
- travail en ramassant des objets ou en touchant des repères ;
- travail spécifique du freinage : ne pas freiner avant zone de freinage + s'arrêter à un point précis, etc.
- travail de wheeling ;
- exercices avec déprivation sensorielle (trial).
- ...etc.

Tuto sur l'équilibre à VTT : <https://www.youtube.com/watch?v=iFNLssDTixs>

Jeux d'adresse et d'équilibre école de vélo : <https://www.youtube.com/watch?v=vJP0mboloto>

Bibliographie complémentaire

- Daniel Kirshner. [Some nonexplanations of bicycle stability](#). American Journal of Physics, 48(1), 1980.
- David Gordon Wilson, [Bicycling Science](#). MIT press, 3th (April 1, 2004).
- Jones, David E. H.; The Stability Of The Bicycle; Physics Today, April 1970, 34-40.
- Lowell, J. and H.D. McKell; The Stability of Bicycles; Am J Physics, Dec 1982, 1106-1112.
- Kvale, Chris and John Corbett; A Fresh Look At Steering Geometry; Cycling U.S.A., Feb 1981.
- J. Fajansa, [Steering in bicycles and motorcycles](#), in American Journal of Physics 68, p 654, 2000.
- J. Liesegang and A.R. Lee, [Dynamics of a Bicycle, Non-Gyroscopic Aspects](#), American Journal of Physics, pp. 130-132.