

LE VÉLO EN MOUVEMENT

DYNAMIQUE,
CONTRÔLE,
CONDUITE &
PERFORMANCES



«La vie, c'est comme une bicyclette, il faut avancer pour ne pas perdre l'équilibre»



ABDELAZIZ MANAR, PH.D.
MONTRÉAL, 2017

Préface	ii
Dédicace	iii
Introduction	1
Bref historique	2
Considérations dynamiques et physiques du vélo	8
Modélisation biomécanique du cycliste	25
Performances du système cycliste-vélo	46
Vélo et santé	64
Modélisation de la circulation des vélos	102
Vélo 2.0 – Le vélo du 21 ^e siècle	118
Vélo, un allié contre le réchauffement climatique	130
Conclusion	143
Références	145

Depuis plus d'un siècle, le vélo, ce mode de transport servant autant aux déplacements de loisirs qu'aux déplacements utilitaires a fait l'objet d'analyses scientifiques à plusieurs niveaux. Sa mécanique a été décortiquée, les lois physiques qui le gouvernent ont été énoncées, et l'alliance subtile du muscle et de la mécanique du vélo a été examinée. En seulement quelques clics sur Internet, on pourra découvrir d'innombrables pages sur le sujet.

Le présent ouvrage se veut un apport synthétique concernant particulièrement la dynamique du vélo, vue des angles de la cinétique, de la biomécanique et de la conduite. Le lien entre ces trois facettes est très fort et l'avantage de cet ouvrage et de présenter au lecteur une vision intégrée et une compréhension complète de la dynamique et des performances du système cycliste-vélo.

Le cycliste s'auto-utilise par sa structure musculaire pour se propulser. Il produit de la force et la démultiplie grâce à un système d'engrenage. Sa propulsion est cependant soumise à des contraintes biologiques, physiques, mécaniques et comportementales.

L'explication scientifique d'un mouvement aussi simple, telle la conduite d'un vélo, fait appel à des notions empruntées de divers champs scientifiques, tels que la physique, la mécanique, la biologie et la circulation routière. La complexité des notions utilisées est assez variable, mais celles-ci sont présentées de façon à faire bénéficier le maximum de lecteurs des concepts présentés dans cet ouvrage.

« À la mémoire de ces cyclistes, bravant l'hostilité de leur cité et qui n'ont jamais pu rentrer chez eux »



(Réf.: 1)

Dans le monde, des millions de gens utilisent le vélo quotidiennement, que ce soit par choix écologique, comme c'est souvent le cas dans les pays développés, ou par nécessité pour améliorer les conditions de vie des populations, ce qui est le cas dans plusieurs pays en développement. Le vélo est certainement le mode de déplacement le plus dominant après la marche sur de courtes distances. En 2007, la production mondiale des vélos a atteint environ 130 millions, soit plus que le double des 52 millions de voitures produites. Les qualités écologiques de la bicyclette comme moyen de transport bon marché, totalement propre et bénéfique pour la santé ne sont plus à démontrer.

Le vélo est souvent l'un des premiers cadeaux d'anniversaire que l'on reçoit. La plupart des enfants apprennent la conduite du vélo et la maîtrise du maintien d'équilibre sur deux roues en bas âge, bien sûr, après quelques douloureux échecs au début.

Malgré cette simplicité apparente, expliquer l'interaction entre le cycliste et son vélo dans un environnement de conduite donné peut s'avérer d'une complexité et d'une précision extrême. La physique a fait des pas de géant en donnant des explications définitives pour de nombreux phénomènes. Cependant, depuis 150 ans, cette simple machine n'a pas cessé de défier, voire d'embarrasser la communauté des physiciens par son mystère, principalement en ce qui a trait à sa stabilité latérale.

Les thèmes qu'explore cet ouvrage établissent des ponts entre différents domaines scientifiques afin d'expliquer la conduite du vélo et ses nombreuses facettes dynamiques. L'auteur présente brièvement l'évolution du vélo (Chapitre 1), suivie d'une analyse de ses quelques considérations dynamiques et physiques (Chapitre 2). Par la suite, l'ouvrage traite de la biomécanique du cycliste en mouvement (Chapitre 3) ainsi que de la modélisation des performances du système cycliste-vélo (Chapitre 4). Ensuite, l'auteur présente la relation entre la pratique du vélo et la santé, tout en analysant en profondeur certains éléments potentiellement nuisibles à la santé (Chapitre 5). Une facette relativement récente dans le domaine du vélo est abordée dans l'ouvrage et concerne la dynamique du vélo du point de vue de la science de la circulation (Chapitre 6). Enfin, on ne peut évidemment pas passer à côté de deux sujets d'actualité, soit l'introduction de l'intelligence dans ce mode de transport (Chapitre 7) et sa contribution dans la lutte contre les changements climatiques (Chapitre 8).

La bicyclette a une très longue histoire. Certains historiens remontent jusqu'à Léonard de Vinci. Dans les feuillets du Codex de Madrid, un genre de portfolio de ses œuvres, il existe une planche de la main de l'artiste qui décrit en détail l'invention de la chaîne à dents cubiques. Ces mêmes dents cubiques sont repérables sur un croquis de ce qui ressemble à une bicyclette datant de 1493.

Des annales d'histoire mentionnent l'apparition en 1771, dans un parc d'attractions à Paris, de ce qui est considéré comme l'ancêtre de la bicyclette, le célérifère, dérivé du latin « porteur rapide ». Cette invention a été imaginée par le Comte Mede de Sivrac. Il s'agit d'une poutre de bois portée par deux roues sur laquelle on s'assoit à califourchon. On se propulse dans une direction rectiligne en poussant sur le sol avec ses pieds. Cependant, ce fait historique ne fait pas l'unanimité chez les historiens, au point que certains affirment que ni l'engin ni le comte n'ont vraisemblablement jamais existé.



Figure 1 : Le célérifère – un jouet pour les riches! (Réf.: 2)

En 1817 apparaît la draisienne, inventée par un Allemand passionné de la mécanique, le baron Drais Von Sauerbronn. Cette invention marque réellement le début de l'histoire du vélo. La direction se fait par guidon, orientant la roue avant, et la propulsion se fait en poussant le sol avec les pieds. Incompris dans son pays, le baron Drais dépose un brevet à Paris et présente son invention dans le parc du Luxembourg, en présence du public. À la manière du cheval, la draisienne se pratique en manège. Tout ce qui suivait par la suite était une succession de grandes ou de petites améliorations à la draisienne.

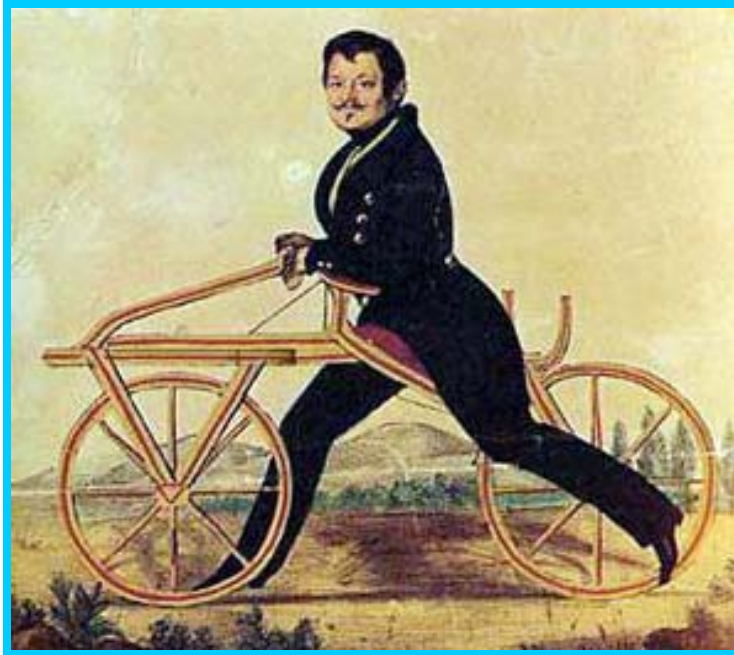


Figure 2 : La draisienne du Baron Drais von Sauerbronn, 1817 (Réf.: 3)

Un forgeron écossais nommé Kirkpatrick MacMillan souhaitait transformer la draisienne afin de se déplacer plus rapidement. En 1839, il conçoit alors un système de leviers reliés à la roue arrière de sa draisienne, qui permet un mouvement de va-et-vient avec les pieds. Ce mouvement actionnait des bielles rigides qui, fixées à la roue arrière, entraînaient la rotation de la roue. Si quelques historiens mettent aujourd'hui en doute la paternité du pédalier à Kirkpatrick MacMillan, celui-ci reste célèbre pour avoir, le premier, réalisé une propulsion musculaire sur deux roues.

En 1868, le français Pierre Michaux, serrurier de métier, ajoute à la draisienne un frein à friction actionné par une corde et surtout, une pédale à action rotative sur la roue avant, et remplace le cadre en bois par un cadre en métal. Son poids est réduit et le procédé de fabrication en série du cadre métallique permet une réduction des coûts de production. Les historiens, qu'ils soient français ou écossais, débattent encore longtemps pour identifier le réel inventeur du premier vélocipède à pédales.

Les roues demeurent en bois et entourées de fer jusqu'en 1869, où Eugène Meyer, un artisan français, inventa des roues entièrement métalliques et à rayons réglables. Le moyeu de la roue est garni de billes pour faciliter le roulement, et les rayons sont perpendiculaires au moyeu et à la jante et travaillent en compression.

Au Canada, à partir de 1868, le vélo s'est popularisé rapidement, principalement chez la classe moyenne. À cette période, plusieurs écoles de conduite du vélo ont été créées dans les grands centres urbains et des pistes circulaires pour la pratique

exclusive du vélo ont été construites. L'édition du *Toronto Globe* du 6 mars 1869 publiait un article sur « Grand's Riding Academy » où les gens pouvaient être formés pour monter le vélocipède. C'est à peu près à la même période que le vélo fait son apparition à Montréal, où la première piste cyclable fut inaugurée en 1874. En 1881, le champion du patinage artistique, Louis Rubenstein, fondait le premier club cycliste du Canada : le *Montreal Athletic Amateur Association*. De plus, en 1899, la première course internationale de cyclisme s'est déroulée à Montréal, devant 30 000 spectateurs (Réf. : 4).

En 1915, Louis Quilicot ouvre le premier magasin de vélos à Montréal, *Bicycles Quilicot* au coin des rues Rachel et De Lanaudière. Il fonde le Club Quilicot et devient entraîneur, conseiller et promoteur de plusieurs grands noms du cyclisme canadien, dont les frères Laurent et Pierre Gachon. Ce dernier est le premier Canadien à participer au tour de France en 1937.

Après une hibernation de quelques décennies du cyclisme à Montréal, comme ailleurs dans les grandes villes, causée par l'arrivée massive des automobiles et des tramways qui incarnaient le progrès et la vitesse, il a fallu attendre les années 1970 pour qu'un groupe d'activistes remettent le vélo au goût du jour. En effet, Robert Silverman, plus connu sous le nom de « Bicycle Bob », et Claire Morissette fondent, en 1975, *Le Monde à bicyclette*, un collectif d'artistes et d'activistes qui mènent des actions pour promouvoir le cyclisme à Montréal. Grâce à la mobilisation de ces pionniers et à leur persévérance, le vélo est redevenu un mode de transport à part entière. (Réf. : 5)

Le vélo a aussi constitué un impressionnant outil d'émancipation des femmes. Qu'on pense à l'activiste Tessie Reynolds qui s'est battue dans l'Angleterre victorienne pour que les femmes aient le droit de pédaler. Aux États-Unis, la militante pour les droits de la femme, Susan B. Anthony, affirme en 1896 que la bicyclette a fait plus pour l'émancipation de la femme que n'importe quelle autre chose au monde. La bicyclette a permis aux femmes d'acquérir un sentiment de liberté et d'autonomie. Les femmes ont pu sortir de leur domicile sans être accompagnées d'un chaperon et se sentaient en quelque sorte égales à l'homme, une fois sur la voie publique. La bicyclette a aussi induit un changement dans le code vestimentaire des femmes. Les jupes ont commencé à raccourcir progressivement et de nouveaux vêtements amples et confortables sont apparus. Bien que l'opinion publique maintienne que « pédaler n'est pas féminin », les femmes ont continué à s'imposer sur les voies publiques avec la complicité de cette machine.



Figure 3 : Une publicité française de 1899 montrant des habits confectionnés exclusivement pour les cyclistes des deux sexes. (Réf.: 6)

De nos jours, le vélo continue à être un instrument de libération de la femme et à défier les autorités qui s'opposent à ce que la femme prenne une place égale à celle de l'homme en public. C'est notamment le cas en Iran où, en septembre 2016, une autorité religieuse a fortement recommandé aux femmes de ne pas se déplacer en bicyclette sur les voies publiques. Un mouvement spontané à travers l'Iran s'est alors organisé pour protester contre cette recommandation, de peur qu'elle devienne une loi.



Figure 4 : Une manifestation de femmes iraniennes défiant les autorités religieuses (Réf.: 7)

Dans les années 1880, les vélocipèdes ont des roues avant de plus en plus grandes pour accroître la vitesse, puisqu'un tour de pédale est égale à un tour de roue. Le vélocipède est rebaptisé *Grand Bi*. L'adoption des rayons métalliques permet

d'agrandir la roue motrice tout en gardant sa solidité et en allégeant la machine. Une grande roue avant influe aussi sur l'équilibre du cycliste. Son centre de gravité étant plus élevé, il doit se faire acrobate pour monter, descendre et tenir sur le vélo. Ainsi, les chutes étaient le quotidien des cyclistes avec le *Grand Bi*.

Le passage du vélocipède à la bicyclette à chaîne s'est fait progressivement, par tentatives successives. Au terme de plusieurs recherches, on réinvente, en 1879, la transmission par chaîne que Guilmet, un horloger français, et Meyer auraient utilisée dix ans plus tôt. L'ingénieur anglais Harry John Lawson a eu l'idée d'ajouter un système de pignons et chaîne pour relier un pédalier sous les pieds du cycliste à la roue arrière. Le mouvement du pédalier est transmis par la chaîne à la roue arrière. Les premières bicyclettes comportent encore une roue de grand diamètre à l'avant, mais celle-ci n'assure plus que la fonction de direction. Au fil du temps, sa taille va progressivement diminuer pour donner la forme actuelle de nos vélos.



Figure 5 : La bicyclette Lawson, 1879 (Réf.: 8)

En 1885, John Starley de la société *Rover* en Angleterre, conçoit la « *Rover safety bicycle* », ou bicyclette sécuritaire, avec des roues de taille raisonnable et une transmission par chaîne. Le cycliste y est installé à l'arrière, ce qui rend presque impossibles les chutes courantes à l'époque où le cycliste est catapulté par-dessus la roue avant. Un engrenage plus grand à l'avant (le plateau) qu'à l'arrière (le pignon) fait tourner la roue arrière plus vite que les pédales ne tournent, ce qui permet à cette bicyclette d'aller vite même sans une roue géante. De plus, le cadre en forme de fourche supporte la selle et relie la roue arrière et dont l'axe vertical du guidon coïncide avec celui de la fourche. Le point de gravité se trouve grandement amélioré.

Le principe de la géométrie de la bicyclette est acquis. Il n'y aura plus de changements fondamentaux de la bicyclette jusqu'à nos jours. Le vélo moderne est né !

En 1888, un vétérinaire irlandais nommé John Boyd Dunlop, dont le fils possède un tricycle, a voulu remédier au manque de sécurité et au bruit infernal occasionné à cet engin par les mauvaises routes. Il a eu l'idée d'interposer un coussin à air entre la roue et le sol. S'apercevant des potentialités industrielles de sa réalisation, il dépose un brevet d'invention en 1888 pour des bandages à base de caoutchouc qui augmentent la sécurité et le confort du cycliste. La société Dunlop est créée en 1889 pour commercialiser les pneumatiques non démontables. Deux ans plus tard, les frères Michelin, lancent le pneumatique démontable.

Les progrès ont porté désormais sur le confort, la sécurité et l'efficacité. Un grand nombre d'évolutions discrètes, mais importantes, ont été déployées depuis et touchent notamment les pneumatiques, le poids et la résistance du cadre, le système de freinage et surtout le système de changement de vitesse (dérouleur).

Actuellement sur le marché, on peut acquérir un vélo de haute performance, muni d'un cadre en carbone monobloc, des roues et d'un guidon aérodynamiques, d'un dérouleur électrique et des freins à disque et même un vélo muni d'intelligence embarquée. Évidemment, les prix sont conséquents.

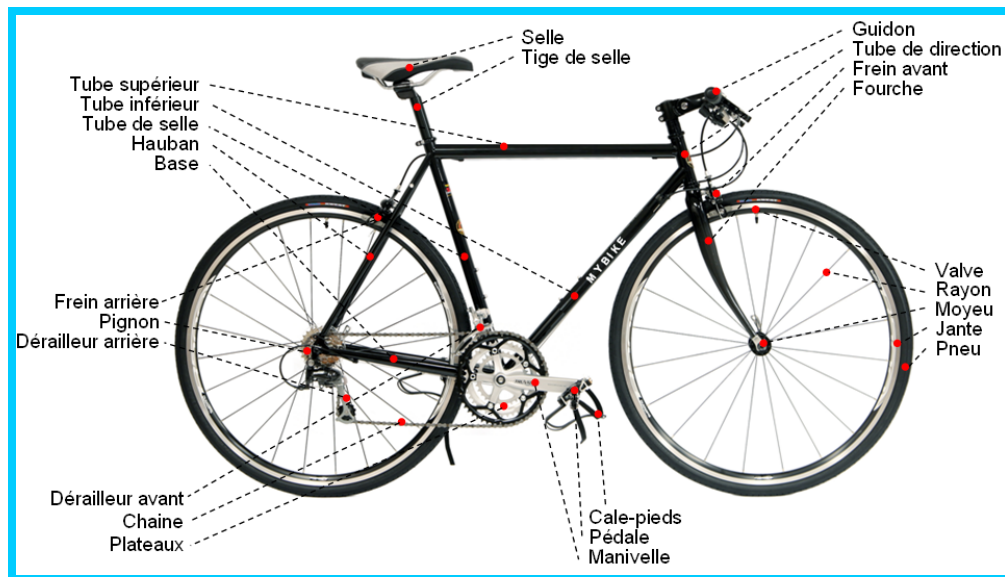


Figure 6 : L'anatomie du vélo – Une mécanique simple mais efficace

Enfin, l'invention du vélo de montagne en Californie en 1972, un vélo avec un cadre plus court et plus solide, et des roues plus petites, équipées de pneus plus larges à crampons. Ce sont des pilotes de Moto-Cross californiens qui inventent le BMX pour leurs enfants, trop jeunes pour rouler à moto. Au départ le BMX est donc une *Moto Cross (MX)* sans moteur, donc un *Bicycle MotoCross (BMX)*. Quant au vélo électrique, malgré une structure mécanique comparable au vélo normal, il fait plutôt partie de la famille des deux roues autopropulsées ou propulsées avec assistance électrique.

CONSIDÉRATIONS DYNAMIQUES ET PHYSIQUES DU VÉLO

La compréhension de deux éléments permet d'éclaircir l'impact de certaines considérations dynamiques et physiques sur la sécurité du système cycliste-vélo. Il s'agit de la stabilité latérale du vélo et du contrôle effectué par le cycliste.

Ces deux éléments sont intimement liés et sont influencés par la géométrie du vélo lui-même, d'où la nécessité d'aborder, brièvement, les caractéristiques mécaniques du vélo. Cependant, il ne faut pas perdre de vue qu'il convient de considérer surtout la géométrie dynamique d'un vélo et non sa géométrie statique. La figure 7 montre les plus importants paramètres de la géométrie d'un vélo standard.

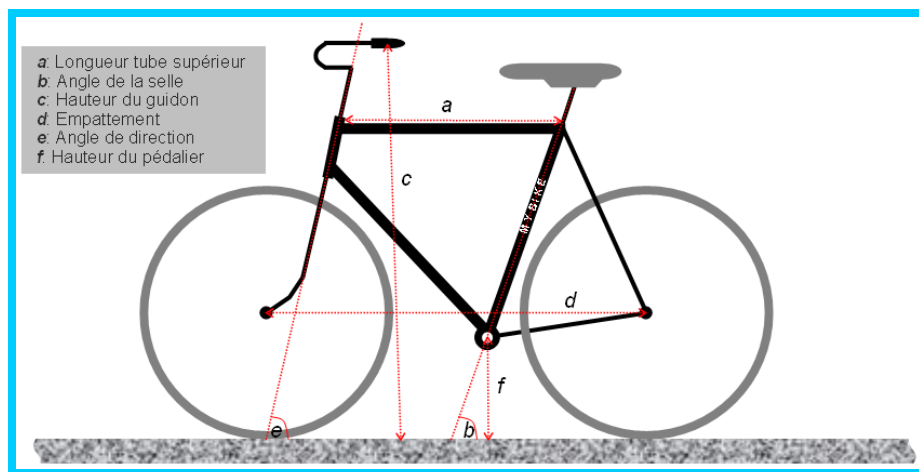


Figure 7 : Les paramètres de base de la géométrie du vélo

Quelle que soit sa conception, le vélo se caractérise par deux catégories de dimensions qui interagissent les unes avec les autres et ont une influence mutuelle.

D'abord, les dimensions qui permettent au cycliste d'avoir une bonne position sur le vélo, soit la longueur du tube supérieur (a), l'angle de la selle (b) et la hauteur du guidon (c). Ces trois dimensions combinées positionnent le cycliste sur le vélo selon des critères d'efficacité au pédalage, de confort et de maîtrise du vélo. La longueur du tube supérieur influence le centre de gravité du cycliste. Ce centre de gravité se décale vers la roue arrière si le tube est court, le guidon est relevé et la selle est basse. En revanche, si le tube est long, le guidon est bas et la selle est haute, le centre de gravité se décale alors vers l'avant. Dans ces deux cas, la répartition des masses sur les roues avant et arrière est donc différente et agit directement sur la géométrie dynamique du vélo.

Les dimensions qui déterminent le comportement du système cycliste-vélo sont l'empattement (d), l'angle de direction (e) et la hauteur du boîtier du pédalier (f). L'empattement est la distance entre les deux moyeux des roues avant et arrière. L'empattement peut légèrement varier si le vélo est muni d'amortisseurs dû à l'effet de compression de la fourche. Un empattement long induit une baisse de la maniabilité notamment en courbe, une meilleure stabilité directionnelle et un effet réduit du transfert des masses en phase de freinage. Un vélo avec un empattement long est donc généralement plus confortable et plus sécurisant, mais moins maniable et moins vif pour le cycliste. Quant à l'angle de direction, il détermine la géométrie de la partie avant du vélo. Les propriétés de maniabilité et de stabilité directionnelle du vélo en dépendent. Plus l'angle de direction est ouvert plus le cycliste a la sensation d'une meilleure stabilité au guidon même si la sensibilité aux irrégularités du sol est accrue. Dans ce cas, la maniabilité, notamment à basse vitesse, diminue drastiquement. Le dernier paramètre important est la hauteur du boîtier du pédalier (f). Elle conditionne la position du centre de gravité sur laquelle le cycliste a une grande influence, car sa masse est en général 4 à 5 fois plus importante que celle du vélo. Plus le boîtier est bas, plus le centre de gravité est bas ce qui améliore à la fois la maniabilité et la stabilité du vélo. Par contre, l'adhérence au freinage notamment sur la roue avant se détériore.

LE CENTRE DE GRAVITÉ

Défini comme le point de rencontre des forces qui permettent au système cycliste-vélo de se tenir en équilibre. Sa position a une incidence sur la capacité du vélo à négocier les virages, mais aussi à accélérer et à freiner efficacement. C'est donc un critère de performance important. La position et la distribution des masses des composants étant figées sur un vélo, c'est l'architecture du cadre, la position de l'amortisseur s'il y a lieu, et surtout, la position géométrique des points d'appui (guidon, selle et pédales) du cycliste sur le vélo qui conditionnent l'emplacement du centre de gravité du système.

Les fabricants de vélo déterminent la combinaison géométrique qui répond à l'usage souhaité du vélo. Un vélo de ville, de course, de route, hybride, de montagne ou de descente nécessite des caractéristiques mécaniques et dynamiques différentes pour optimiser sa performance. Cependant, quel que soit le type de vélo, l'ensemble des paramètres de conception se résument dans un plan tridimensionnel tel qu'illustré sur la figure 8.

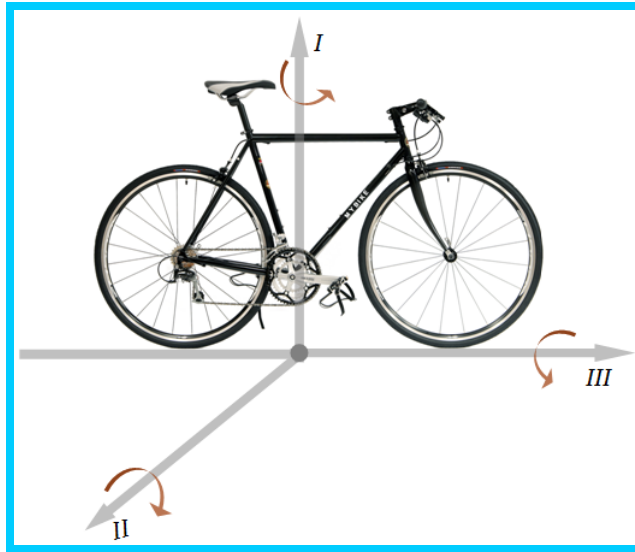


Figure 8 : Les trois axes de rotation d'un vélo

Le comportement dynamique d'un vélo dépend aussi de l'inertie du système cycliste-vélo. Ainsi, la répartition des masses par rapport au centre de gravité conditionne la capacité de l'ensemble à tourner autour d'un axe. On distingue trois mouvements de rotation générant trois moments d'inertie.

Moment de lacet (I) : influence la manœuvrabilité du vélo. Un vélo ayant un empattement court est maniable et facilite la négociation des courbes, par contre, il est difficile à maîtriser à haute vitesse. C'est l'inverse pour un vélo avec empattement long.

Moment de tangage (II) : influence les manœuvres de freinage et d'accélération. Plus le moment d'inertie en tangage est important, plus les risques de délestage de la roue arrière sont importants au freinage et inversement pendant les phases d'accélération avec la roue avant. La maîtrise du vélo est alors plus difficile. Des roues plus lourdes réduisent le moment d'inertie en tangage qui, par conséquent, influence positivement sur le comportement du vélo.

Moment de roulis (III) : influence la capacité du vélo à effectuer efficacement les virages. Plus le moment d'inertie en roulis est important, plus le changement d'angle est difficile. C'est le cas dans une succession de petits virages rapprochés par exemple.

❶ La stabilité latérale du vélo

Ayant seulement deux points de contact sur le sol, le vélo est condamné à être un véhicule instable. Cette instabilité, qui a un impact direct sur la sécurité du système cycliste-vélo a été l'élément le plus analysé par des inventeurs et des

scientifiques depuis près de 150 ans. Déjà en 1866, un Américain d'origine française, nommé Pierre Lallement a déposé le premier brevet pour un vélocipède aux États-Unis. Sur ce brevet, il donne des conseils sur le maintien de l'équilibre d'un vélocipède en mouvement : « *Si le vélocipède penche à droite, tourner le guidon vers la droite pour retrouver l'équilibre...* ».

L'explication scientifique réside dans le principe de la force centrifuge. En tournant à droite, on crée une trajectoire courbe qui engendre une force centrifuge vers la gauche, rétablissant l'équilibre du vélo et l'empêchant de pencher davantage. Réciproquement, si l'on procède à un virage à droite, on a tendance à pencher à droite pour équilibrer la force centrifuge due à la trajectoire courbe. Cette explication confirme que plus la vitesse est grande, plus il est facile à stabiliser le vélo puisque la force centrifuge en trajectoire courbe est égale à :

$$F_c = mv^2/r$$

où m est la masse;

v est la vitesse;

r le rayon de courbure de la trajectoire.

Si la vitesse est élevée, pour créer une force centrifuge donnée, on a besoin d'un rayon de courbure moins serré, et donc d'un braquage de guidon moins important.

Le cycliste agit donc directement sur le maintien d'équilibre du vélo. Or, lorsqu'on pousse avec une certaine force le vélo sans cycliste, celui-ci reste stable et peut parcourir plusieurs mètres sans chuter. Il y a donc d'autres facteurs physiques et dynamiques qui assurent la stabilité du vélo. Il existe en fait trois théories qui se sont succédé depuis les premières tentatives d'explication mathématique de la stabilité du vélo. En 1869, William Rankine, un ingénieur civil britannique a présenté son analyse de la stabilité du vélo. Sa recherche, basée sur des observations semi-quantitatives, a abouti aux premiers fondements théoriques.

Théorie I : L'effet gyroscopique

Durant plusieurs décennies, les scientifiques ont cru que la stabilité du vélo est due seulement à l'effet gyroscopique. Cet effet découle de la première loi de Newton : l'axe de rotation d'un corps tournant librement a tendance à rester fixe dans son orientation spatiale. L'effet gyroscopique se définit comme la difficulté de modifier la position ou l'orientation du plan de rotation d'une masse tournante.

L'effet gyroscopique peut être mis en évidence en tenant une roue de vélo à bout de bras. On constate qu'il est assez facile de modifier le plan de rotation de la roue quand celle-ci ne tourne pas. Mais dès qu'elle tourne, ça devient plus difficile, et plus elle tourne vite, plus c'est difficile de modifier son plan de rotation.

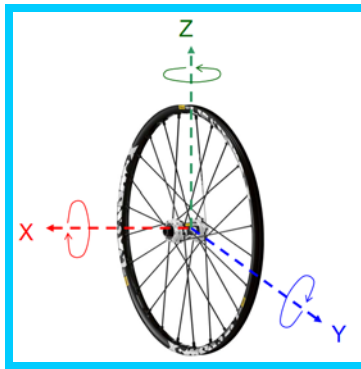


Figure 9 : L'effet gyroscopique d'une roue en rotation

Sur la figure 9, la roue est en rotation autour de l'axe X. Si la roue commence à pencher à droite, cela veut dire qu'elle essaye de tourner en plus autour de l'axe Y. D'après l'effet gyroscopique, cela va induire une rotation autour de l'axe Z. Donc, quand un vélo en mouvement penche, le couple gyroscopique, dû à la rotation simultanée du guidon et de la roue avant, tend à redresser la roue avant, et contribue donc à remettre en équilibre le vélo. Tourner autour de l'axe Z, c'est l'équivalent du mouvement de guidon pour tourner à droite.

Si on se réfère à la figure 10, on pourra calculer le couple gyroscopique sur la roue avant qui fera en sorte de stabiliser le vélo et de le redresser sans intervention du cycliste.

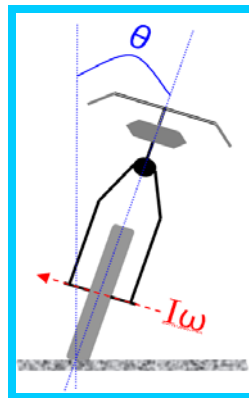


Figure 10 : Stabilisation d'un vélo en mouvement par l'effet gyroscopique

L'effet gyroscopique (Ω) est obtenu par le calcul du couple gyroscopique selon l'équation suivante:

$$\Omega = I\omega \Delta\theta/\Delta\tau$$

Où : ω est la vitesse angulaire de la roue;

I est le moment d'inertie de la roue;
 θ est l'angle d'inclinaison et
 τ est l'amplitude de l'impulsion.

On déduit de cette équation que l'effet gyroscopique des roues est proportionnel à la masse de la roue, à sa vitesse de rotation et à l'angle d'inclinaison, mais il est inversement proportionnel au temps mis pour incliner la roue. Pour calculer l'effet gyroscopique pour un vélo standard quand il s'incline, prenons l'exemple suivant :

Un cycliste qui roule à 6 m/sec (environ 22 km/h) sur un vélo standard ayant des roues de 600 mm de diamètre et une circonférence de 2 m. Ainsi, la roue fait 3 rotations par seconde soit l'équivalent d'un taux de vitesse angulaire (ω) de 20 radians par seconde. Supposons que la masse périphérique (M) de la roue est de 1,1 kg et concentrée autour de la jante ayant un rayon (R) de 300 mm. Dans ce cas, le moment d'inertie I en mouvement rectiligne est égal à $MR^2 \approx 1,0 \text{ kg/m}^2$.

Supposons que le vélo subit une force quelconque qui le fait balancer d'une part et d'autres dans une amplitude (τ) de ± 6 degrés et selon une fréquence de 1,6 balancement par seconde. La fréquence angulaire équivalente de ce balancement est égale à 10 rad/sec ($2\pi * 1,6$). En transformant l'amplitude du balancement en équivalent radiant ($6/180\pi$), on obtient la valeur de τ égale à 0,1 radian. Celle-ci permet d'obtenir la vitesse angulaire maximale du balancement ($\Delta\theta$) en la multipliant par sa fréquence soit, $10 * 0,1 = 1 \text{ rad/sec}$.

Finalement, l'effet gyroscopique, exprimé en newton-mètre (N.m), est obtenu en multipliant les trois éléments :

$$\Omega = 0,1 * 20 * 1 = 2 \text{ N. m}$$

Supposons qu'un cycliste adulte et son vélo pèsent en moyenne 90 kg. Ceci donne en unités de newton 883 N ($90 \text{ kg} * 9,81 \text{ N/kg}$). Donc, l'effet gyroscopique contribue dans cet exemple pour 2,3 mm ($2 \text{ N.m}/883 \text{ N}$) dans le redressement du vélo par rapport au centre de gravité, et ce, sans l'intervention du cycliste.

Il est évident que l'effet gyroscopique est trop faible pour avoir une influence déterminante dans la stabilité du vélo. Dans le cas d'une moto, dont la masse de la roue est très importante, l'effet gyroscopique joue réellement son rôle de stabilisateur.

Théorie II : L'effet chasse

En 1970, le chimiste anglais David E. Jones a émis des doutes sur la théorie de la stabilité gyroscopique du vélo. Pour le vérifier, il s'est mis en tête de construire des vélos impossibles à contrôler sans les mains. Il a donc construit un vélo dont l'effet gyroscopique a été annulé en plaçant une deuxième roue avant, qui tourne en sens

inverse de la première sans qu'elle touche la chaussée. Ce vélo expérimental est facile à conduire, mais en le lançant sans cycliste, le vélo tombe plus rapidement qu'un vélo standard. Jones conclut que l'effet gyroscopique stabilise un vélo sans cycliste, donc plus léger, mais cet effet n'a aucun impact quand le vélo est alourdi par un cycliste qui le monte.



Figure 11 : Vélo expérimental de David E. Jones sans effet gyroscopique (Réf.: 9)

D.E. Jones a donc porté une attention particulière à la géométrie du vélo et plus précisément à l'axe du guidon et sa relation avec le point de contact de la roue avant avec le sol. C'est ce qu'on appelle la chasse.

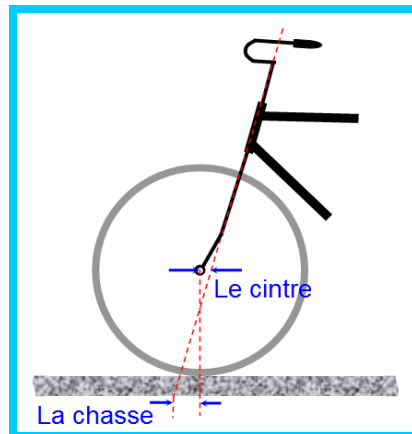


Figure 12 : Un vélo standard avec une chasse positive

La chasse correspond à l'écart qui existe entre le point de contact de la roue avant avec la chaussée et la projection de l'axe de rotation du guidon sur cette même chaussée tel qu'illustré sur la figure 12. Sur un vélo standard, la chasse est légèrement positive, c'est-à-dire que l'axe de rotation du guidon arrive en avant du point du contact du pneu avec la chaussée. Pour visualiser cet effet, il suffit de

tenir le vélo par la selle et marcher à côté. Dès que vous inclinez le vélo d'un côté, le guidon aura tendance à tourner du même côté, c'est grâce à cette chasse.

Lors du braquage, les roues tournent autour du point de direction et non pas autour du point de contact au sol, ce qui crée un couple qui dès que l'effort sur le guidon cesse, ramène les roues en ligne droite. C'est ce couple qui donne l'autostabilité de la direction.

Pour démontrer que c'était bien là un phénomène clé, D.E. Jones a construit un vélo à chasse négative tel qu'illustré sur la figure 13 (a). Il s'est avéré qu'il est pratiquement impossible de diriger le vélo dans la bonne direction avec ou sans cycliste.

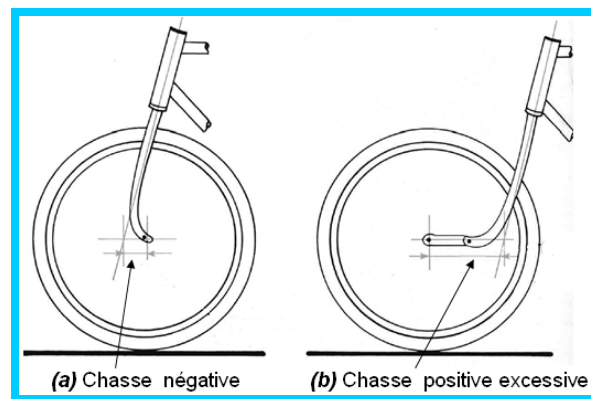


Figure 13 : Vélo avec chasse non standard (Réf.: 9)

Avec une chasse négative, l'axe de la fourche touche le sol derrière le point de contact du pneu. Le guidon tourne à gauche quand on incline le cadre vers la droite, et vice-versa, ce qui abaisse le centre de gravité de l'ensemble et le déséquilibre. En mouvement, une inclinaison vers la gauche va se traduire par un virage à droite et la force centrifuge amplifie la chute ce qui rend un tel vélo à peu près impossible à contrôler.

D.E. Jones conclut donc que c'est la géométrie du cadre et le sens du couple pesanteur/force de réaction du pneu agissant sur l'axe de la fourche qui conditionnent la stabilité de la bicyclette. Cependant, D.E. Jones n'a pas développé un raisonnement mathématique pour supporter sa théorie.

Il a même expérimenté le contraire, c'est-à-dire un vélo à chasse positive excessive, donc très stable, comme on peut le voir sur la figure 13 (b). Le vélo devient tellement stable qu'il manque de maniabilité. D'ailleurs, la plupart des vélos aujourd'hui ont une chasse positive, mais proche de zéro pour être à la fois stables, mais maniables et réactifs.

Théorie III : Une théorie de plus en 2011

Environ 150 ans après les premiers essais d'explication de la stabilité latérale du vélo, des chercheurs de l'Université de Technologie de Delft aux Pays-Bas en collaboration avec des chercheurs de l'Université Cornell aux États-Unis, ont décidé de revisiter les critères de stabilité basés sur les deux théories précédentes. Cette démarche fait suite à la découverte d'interprétations erronées des pionniers de la physique du vélo au XIXe siècle, ainsi qu'à des calculs fondés sur des hypothèses incorrectes au XXe siècle.

Comme on l'a vu plus haut, selon les deux théories précédentes, quand un vélo en mouvement penche d'un côté, le couple gyroscopique, dû à la rotation simultanée du guidon et de la roue avant, tend à redresser la roue avant, et contribue donc à rééquilibrer le vélo. Par ailleurs, l'effet de chasse tend aussi à redresser la roue avant quand l'intersection de l'axe du guidon avec le sol est en avant du point de contact de la roue avec le sol. L'idée que la collaboration entre ces deux couples mécaniques suffit dans tous les cas à redresser le vélo n'est que partiellement vraie ou, si l'on préfère, partiellement fausse.

Les chercheurs ont alors modélisé une géométrie minimaliste d'un vélo et ils ont développé de nouvelles équations du mouvement et de nouveaux critères de stabilité. Ils ont par la suite construit un semblant de vélo stable dépourvu de l'effet gyroscopique et de l'effet chasse, appelé TMS pour *Two Mass Skate, bicycle* pour vérifier cette nouvelle théorie (figure 14). Le TMS a de petites roues et des roues en contre rotation, ce qui signifie qu'il n'y a pas d'effet gyroscopique et une chasse négative, et pourtant, le vélo reste stable.



Figure 14 : TMS – Un semblant de vélo expérimental (Réf.: 10)

Partant de cette même et vieille observation : un vélo reste stable au-delà d'une certaine vitesse en le lançant pour lui donner de la vitesse. Même en lui donnant un coup de pouce sur le côté, le vélo ne se renverse pas. Le modèle mathématique développé, avec environ 25 paramètres physiques, est en mesure de prédire très

précisément si, et à quelles vitesses, une conception particulière de la bicyclette serait stable.

En fait, la nouvelle théorie démontre que la distribution de la masse est également importante pour la stabilité, en particulier l'emplacement du centre de la masse du mécanisme de direction de la bicyclette. Pour qu'un vélo soit stable, le mécanisme de direction doit être instable, si le vélo tombe, la direction devrait tomber encore plus rapidement.

La configuration du vélo joue donc un rôle crucial. Selon les chercheurs, la stabilité est multifactorielle. Des configurations différentes conduisent à des équilibres dynamiques différents. Trois idées se dégagent : c'est la force centrifuge due à la courbe suivie par la roue avant qui redresse le vélo ; la trajectoire d'un vélo stable doit se courber spontanément dès qu'il penche ; et enfin, ce comportement se manifeste au-delà d'un certain seuil de vitesse, soit 11 kilomètres par heure pour les vélos usuels.

À quand la prochaine théorie ?

🚲 Le contrôle du vélo par le cycliste

Le maintien d'équilibre par le cycliste est facile à expliquer sans recours à des notions physiques complexes. Cependant, dans un premier temps, il faut comprendre les forces qui s'exercent sur le système cycliste-vélo.

Dans le cas où la vitesse serait égale à 0, c'est-à-dire en arrêt, les deux forces extérieures qui s'appliquent sur ce système sont le poids total du cycliste et de son vélo et la réaction du sol sur le vélo.

Le poids total est caractérisé par sa direction verticale passant par le centre de gravité du système et dirigé vers le centre de la Terre. La valeur du poids (P sur la figure 15) est égale à la masse multipliée par l'intensité du champ de pesanteur, exprimé en newton (N).

Par exemple, si la masse du système (cycliste + vélo) est de 90 kg, et sachant que l'intensité du champ de pesanteur est de 9,81 N/kg, alors, la valeur de P sera de 883 N.

Quant à la réaction du sol, elle est caractérisée par sa direction verticale, dirigée vers le haut, et s'appliquant sur les points de contact entre les pneus et le sol. La réaction du sol se répartit en deux apports (R_1 et R_2) dont la somme est égale à la valeur de P .

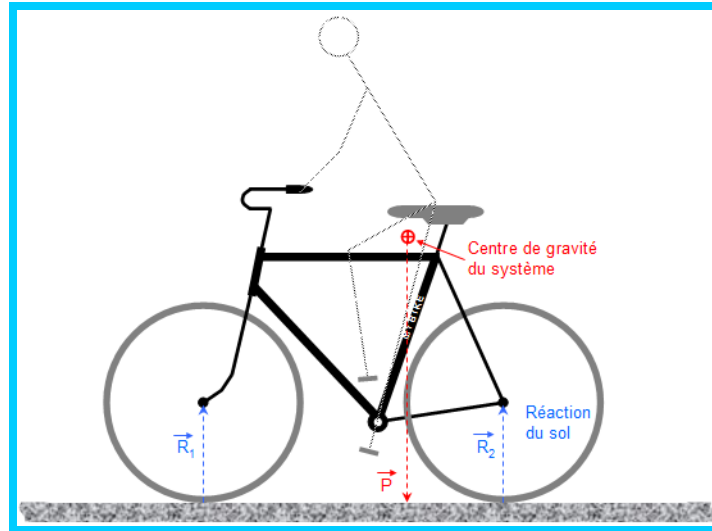


Figure 15 : Les forces s'appliquant sur un vélo stationnaire

Dès qu'il commence à rouler, le cycliste, par son effort sur la pédale crée un déséquilibre, qu'il doit corriger instantanément. Ce déséquilibre résulte du déplacement du centre de la gravité à chaque coup de pédale. Un perpétuel cycle de déséquilibre/rééquilibrage est ainsi créé durant le parcours du cycliste. Ce cycle se fait d'une manière quasiment automatique et inconsciemment. Avec l'expérience du cycliste, l'amplitude du déséquilibre est de plus en plus petite contrairement à celle d'un débutant.

On distingue quatre régions de stabilité ou d'instabilité du système cycliste-vélo en mouvement. Ces régions sont différenciées selon la position du centre de gravité du système par rapport au centre de pression du système (points de contact des pneus avec le sol). Quand le système est parfaitement en ligne droite, la position de ces deux centres est parfaitement alignée. À la suite de l'introduction d'une perturbation, lorsqu'on amorce un virage par exemple, les deux centres commencent à se décaler. Plus ce décalage est amplifié, plus l'instabilité du système est importante. La figure 16 illustre les quatre régions d'instabilité du système cycliste-vélo :

- 1- Conduite normale : le centre de gravité et le centre de pression fluctuent minimalement, le cycliste est en parfait contrôle.
- 2- Marge sécuritaire : le cycliste se sent à l'aise et il est capable de retrouver aisément son équilibre.
- 3- Marge de stabilité : le système est physiquement stable, mais le cycliste ne se sent pas en sécurité.
- 4- Région instable : le système est instable et le retour vers la stabilité est impossible. La chute est inévitable.

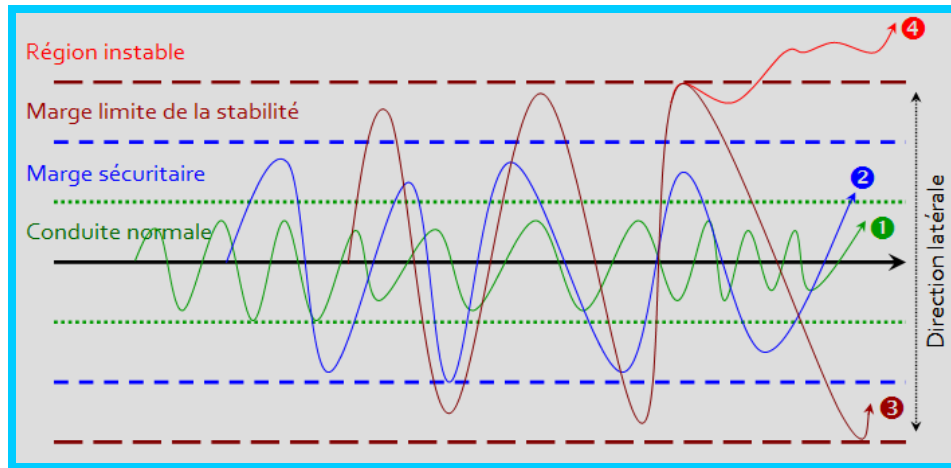


Figure 16 : Les différentes marges de stabilité du système cycliste-vélo (Réf.: 11)

Au plan biologique, l'être humain dispose d'un mécanisme très complexe qui lui permet de garder son équilibre. L'oreille interne ou labyrinthe contient les organes qui donnent le sens de l'équilibre, coordonnent les mouvements de la tête et des yeux et les ajustements de la posture du corps. Les récepteurs de l'équilibre ou récepteurs vestibulaires informent en permanence le cerveau sur la position exacte de la tête et sur ses déplacements par rapport au vecteur gravitaire. Les mouvements de la tête font bouger les liquides contenus dans l'oreille interne activant ainsi les récepteurs de l'équilibre et simulent le système nerveux qui à son tour commande les ajustements corporels requis pour maintenir l'équilibre.

Le contrôle de la bicyclette peut être vu comme un système de contrôle à rétroaction. La figure 17 illustre selon un schéma simplifié ce contrôle en boucle.

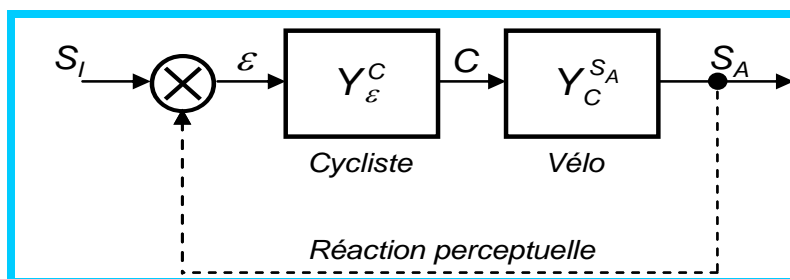


Figure 17 : Système de contrôle de la stabilité du vélo par le cycliste

Étant donnée une situation initiale (S_I), le cycliste évalue son déséquilibre (ε) selon les stimuli vestibulaires, proprioception et visuel. Dans le cas où il y aurait effectivement un déséquilibre, le cycliste agit pour le corriger par une fonction de transfert (Y_ε^C). Cette action produit un effet C , qui agit à son tour sur le vélo dont la réaction est donnée par la fonction de transfert ($Y_C^{S_A}$). Finalement, la résultante totale corrige le positionnement du système cycliste-vélo et le ramène à une

situation stable (S_A). Ce cycle est ainsi reproduit autant de fois que le cycliste est en mouvement, et ce, de façon quasi automatique.

Le contrôle en ligne droite

Comme on l'a vu précédemment, le vélo ayant seulement deux points d'appui doit toujours être sous le contrôle du cycliste. Le pédalage contribue aussi au déséquilibre du système en ligne droite en faisant décaler son centre de gravité à chaque coup de pédale.

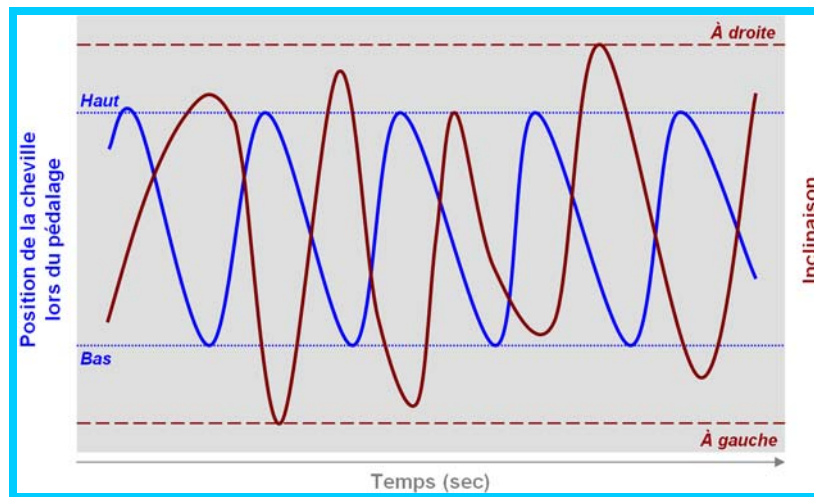


Figure 18 : Relation entre le mouvement de la cheville et l'inclinaison du système cycliste-vélo (Réf.: 12)

Le déphasage entre les deux courbes de la figure 18, illustre le déséquilibre généré à chaque coup de pédale. Ainsi, quand la cheville droite du cycliste est en haut, ce qui correspond à l'amorce du coup de pédale, une force est exercée sur le côté droit du système cycliste-vélo ce qui le fait incliner du côté droit quand la cheville droite atteint son niveau le plus bas. L'inclinaison atteint son maximum à la fin du coup de pédale. Le même cycle est répété cette fois-ci pour la cheville gauche, ce qui fait incliner le système vers la gauche. Quant au degré d'inclinaison, il dépend de la force appliquée à chaque coup de pédale.

Sur la figure suivante, l'effet du balancement est bien mis en évidence en faisant rouler un vélo à basse vitesse, sur un long papier blanc. On peut distinguer la trajectoire droite de la roue arrière et la trajectoire zigzagante de la roue avant. On peut aussi constater que la roue arrière parcourt une moins grande distance que la roue avant.



Figure 19 : Démonstration du balancement du vélo en passant sur un tapis de papier blanc

Pour maintenir son équilibre, le cycliste agit autant sur le positionnement de son corps que sur le guidon. À des vitesses peu élevées, le cycliste agit sur le guidon avec des amplitudes élevées, son buste est pratiquement rigide, mais une rotation latérale significative des genoux lui permet de maintenir son équilibre.

À des vitesses plus élevées, le cycliste a de moins en moins recours à la manipulation du guidon et la rotation latérale des genoux est moins forte. Cependant, une légère gesticulation du buste, qui entraîne un léger déport du centre de gravité du système contribue à son rééquilibrage. Donc, avec l'augmentation de la vitesse, les corrections du déséquilibre diminuent.

Si l'on considère que durant la conduite d'un vélo en ligne droite, les principaux mouvements sont le pédalage, le braquage du guidon, la rotation latérale des genoux et l'inclinaison du buste. La figure 20 montre comment la variation relative en pourcentage des quatre mouvements possibles varie avec la vitesse. Il est clair qu'à partir d'une vitesse de 10 km/h, le seul mouvement pratiquement actif est le pédalage. En deçà de cette vitesse, le mouvement de braquage du guidon d'un côté vers l'autre est plus actif alors que le pourcentage du mouvement par le pédalage baisse. Aussi, avec la baisse de la vitesse, le mouvement latéral des genoux est plus significatif bien que son pourcentage dépasse à peine les 5 %. En ce qui concerne l'inclinaison du buste, il est pratiquement stable avec une légère augmentation de son pourcentage à des vitesses élevées.

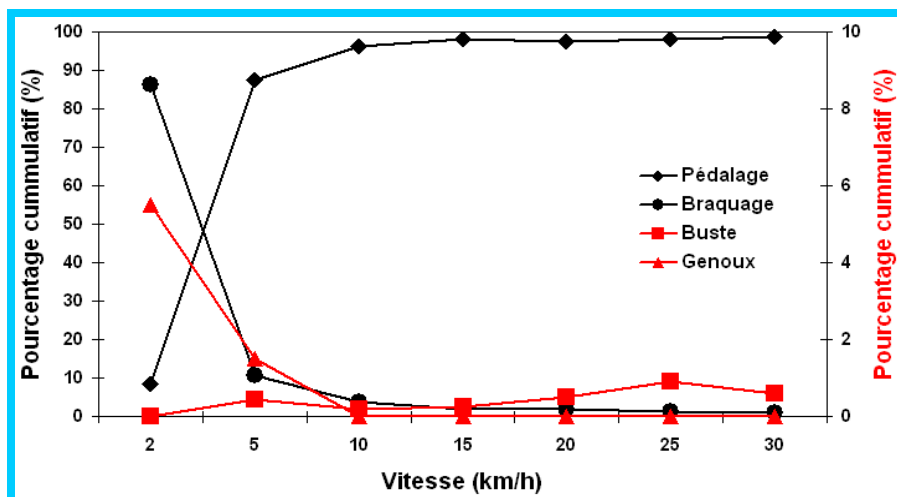


Figure 20 : La variation relative des quatre mouvements en fonction de la vitesse. Les lignes en noir sont sur une échelle de 100 % et les lignes rouges sont sur une échelle de 10 %. À chaque vitesse, la somme des pourcentages des quatre mouvements est égale à 100 % (Réf. : 13)

Le contrôle dans le virage

En amorçant un virage, par exemple, à droite, le cycliste quitte sa trajectoire rectiligne pour rentrer dans une trajectoire courbe. À ce moment, la force centrifuge va tirer le système cycliste-vélo vers la gauche. Cette force centrifuge peut présenter près du tiers de la masse corporelle du cycliste et dépend directement de la vitesse du vélo et du rayon de la courbe. La force centrifuge est générée en portant le centre de gravité du côté de la direction souhaitée, en se penchant donc vers l'intérieur du virage. Quant au cycliste, il va compenser en s'inclinant vers la droite. Donc, le cycliste est tiré vers le bas par son poids et vers la gauche par la force centrifuge. La résultante est une force qui tire vers le bas et à gauche. Il suffit de s'incliner pour s'aligner avec cette force résultante. De ce fait, la force totale s'appuiera sur les pneus et ne tendra pas à renverser le vélo. Dès que la force centrifuge est supprimée, la trajectoire redevient rectiligne, tangente à la courbe suivie auparavant. 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.

La relation qui donne la force centrifuge, dans laquelle m est la masse du système cycliste-vélo, v est la vitesse et r est le rayon de la courbe est :

$$C_{\text{centrifuge}} = m v^2 / r$$

Plus la courbe est serrée (r petit) ou plus la vitesse est grande, plus la force requise pour modifier la trajectoire du cycliste est grande, plus il doit s'incliner avec son vélo vers l'intérieur du virage. Par contre, si le rayon de la courbe est grand et la

vitesse est faible, l'inclinaison du système cycliste-vélo est minime. Cette équation implique que le braquage du guidon et l'inclinaison du système cycliste-vélo sont couplés, c'est-à-dire que l'un vient nécessairement avec l'autre.

La figure 21-a montre, sur un plan (2-dimensions), un cycliste effectuant un virage à droite le long d'une courbe ayant un rayon r . Le cycliste s'incline par rapport à son axe vertical par θ degrés afin de générer la force nécessaire pour entrer dans un mouvement circulaire. R représente la réaction du sol, elle est constituée de deux composantes :

- la composante verticale $R \cos\theta$ qui équilibre le poids mg du système cycliste-vélo,
- la composante horizontale $R \sin\theta = m v^2/r$ qui génère la force centrifuge requise pour le mouvement circulaire.

La figure 21-b montre le même cycliste qui change de direction selon un angle Φ et dont le centre de gravité se situe à mi-chemin entre les deux roues. Dans un mouvement rectiligne, les points de contact des pneus avant et arrière ainsi que le centre de gravité suivaient la même trajectoire droite. Une fois le virage amorcé, ce sont désormais trois trajectoires en courbes et parallèles que le système cycliste-vélo génère. Cependant, au moment même de l'amorce du virage, alors que la fourche et la roue avant entrent dans une trajectoire courbe, le cadre et la roue arrière ont tendance à continuer sur leurs trajectoires droites. Ces mouvements paradoxaux sont instantanément neutralisés par le déplacement du centre de gravité initié par le cycliste afin de garder son équilibre.

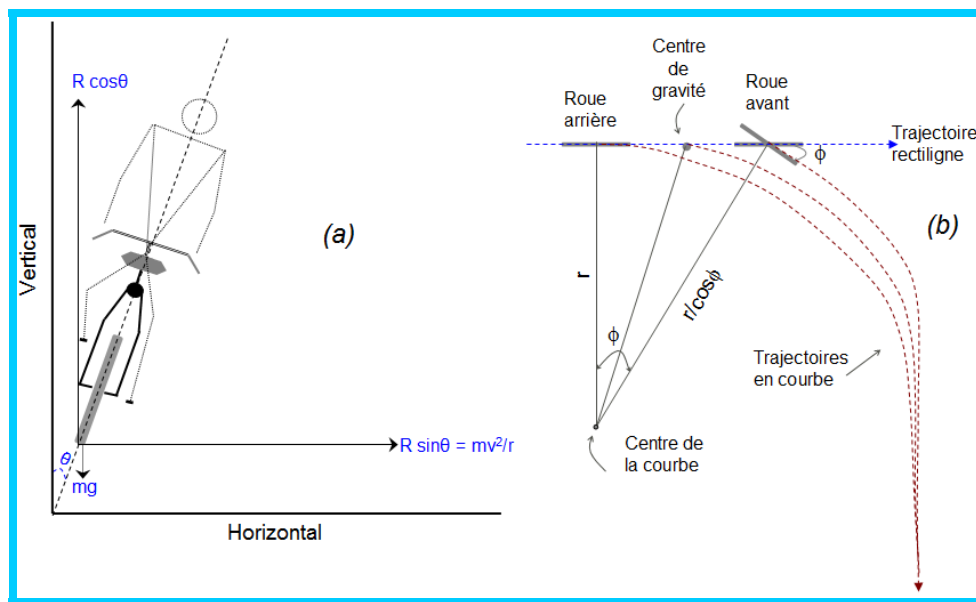


Figure 21 : (a) Vue arrière d'un cycliste en inclinaison durant son virage à droite
(b) Vue aérienne des trajectoires d'un cycliste en virage à droite

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

- La stabilité gyroscopique contribue au maintien de la verticalité du cycliste, mais s'oppose aux changements de direction.
- 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.
- L'effet gyroscopique est paradoxal, il réduit l'effet de l'action sur le guidon, mais amplifie le déplacement du centre de gravité.
- La position du centre de gravité est décisive. C'est d'elle que dépendent l'équilibre général et la négociation correcte et sécuritaire des virages.

MODÉLISATION BIOMÉCANIQUE DU CYCLISTE

Le cycliste fait tourner les pédales qui entraînent une rotation de la roue par l'intermédiaire d'une chaîne. L'énergie musculaire, associée au système cardiovasculaire joue le rôle du moteur du corps humain. L'énergie musculaire est majoritairement fournie par les membres inférieurs avec une participation des muscles stabilisateurs du bassin.

Pour comprendre et décortiquer toute la mécanique derrière cette simple opération de pédalage, il faut recourir à la biomécanique. Par définition, la biomécanique est une science interdisciplinaire qui étudie le mouvement du corps humain dans des situations précises afin d'en déterminer les implications musculaires et articulaires. Elle évolue à la frontière entre la biologie et la mécanique en s'appropriant les connaissances d'un grand nombre d'autres disciplines scientifiques. Le corps humain est un système articulé dont les énergies musculaires sont les moteurs internes qui permettent le mouvement. Cette structure est dirigée hiérarchiquement par le cerveau et le système nerveux.

Pour donner au lecteur une vue d'ensemble, le présent chapitre présente une analyse du pédalage, des muscles et des articulations sollicités, de la puissance produite ainsi que de l'énergie de l'effort de pédalage.

① Le pédalage

L'homme est conçu pour marcher, non pour pédaler, alors le pédalage n'est pas un geste naturel comme la marche. Il requiert des capacités de concentration et de coordination pour être le plus efficace possible dans le transfert d'énergie entre le corps et le vélo. Le pédalage est un mouvement circulaire complexe, alternant sur chacun des membres inférieurs une phase de pression et une phase de traction entrecoupées de deux points morts, hauts et bas.

Durant le pédalage, le cycliste possède des appuis au niveau de 3 zones : la selle, le guidon et les pédales. Ces zones de contact constituent des appuis au sens de la mécanique, c'est-à-dire là où s'opèrent les forces de réaction. L'équilibre entre ces trois zones permet d'optimiser les efforts du cycliste et de garantir son confort.

En position assise, le bassin est le point d'appui fixe d'où part le travail des cuisses et des muscles fessiers qui appuient sur les jambes comme des pivots. Le haut du corps se pose sur le guidon par les mains et travaille peu. En revanche, les muscles abdominaux et dorsaux sont essentiels pour maintenir ce point d'appui. Plus les muscles qui tiennent les hanches sont forts et plus il est aisé de pédaler. Les pédales, la zone d'appui la plus active, captent la plus grande partie des efforts.

La force exercée sur ces trois zones d'appui est toujours positive, c'est-à-dire qu'elle est toujours orientée du haut vers le bas. Cependant, ces forces ne sont pas constantes et un jeu de bascule des forces entre les trois zones s'opère en fonction des efforts générés par le cycliste.

Les forces verticales exercées sur la selle tendent à diminuer avec l'augmentation de la puissance. Cela indique que plus l'effort requis est grand, plus la quantité de masses corporelles mises en jeu dans la propulsion augmente. L'action du poids induit par les masses corporelles situées au-dessus des hanches est compensée par la réaction de la selle ce qui ne peut en aucun cas agir sur la propulsion. Ainsi, plus la puissance augmente, plus les forces issues du haut du corps sont reportées vers les pédales et le guidon.

La force exercée sur le guidon en position assise crée un soulèvement du corps qui ne permet pas de développer des forces propulsives. L'effort sur le guidon a lieu lorsqu'une pédale est en fin de phase descendante et que l'autre pédale est en fin de retour arrière.

Considérant que simultanément, les efforts sur la selle diminuent avec l'augmentation de la puissance, les efforts sur le guidon sont donc reportés vers les pédales. Les masses corporelles non supportées par la selle sont directement impliquées dans le mouvement de pédalage ce qui augmente la valeur des forces appliquées sur les pédales. Le constat est donc :

- L'augmentation de la puissance crée un allègement de plus en plus important au niveau de la selle au profit principalement des pédales.
- L'appui sur le guidon joue un rôle essentiel dans la stabilisation du mouvement. L'implication des membres supérieurs dans la création de forces propulsives est quasiment nulle.

Le pédalage : un cycle en quatre phases

Durant le pédalage, les membres inférieurs et le pédalier peuvent s'apparenter à un système de manivelle. De ce fait, une révolution complète de la pédale est découpée en quatre phases ; deux phases propulsives ou motrices et deux phases de transition.

Comme schématisé sur la figure 22, les phases propulsives sont alternées par des phases de transition suivant le sens horaire. La première phase propulsive principale (appelée aussi poussée) s'étend de 70° à 290° . Grâce à la gravité, la majorité des efforts appliqués par le cycliste sont facilités durant cette phase. Les efforts sont dirigés de haut en bas ce qui donne à cette première phase un rôle principal dans la propulsion.

À la fin de cette première phase, la pédale rentre dans la phase de transition située en bas. Cette phase s'étend entre 290° et 250° et elle est située autour du point mort bas (PMB). Cette phase, dont la direction est de l'avant vers l'arrière, contribue minimalement à l'effort propulsif et sa durée est très courte dans le cycle.

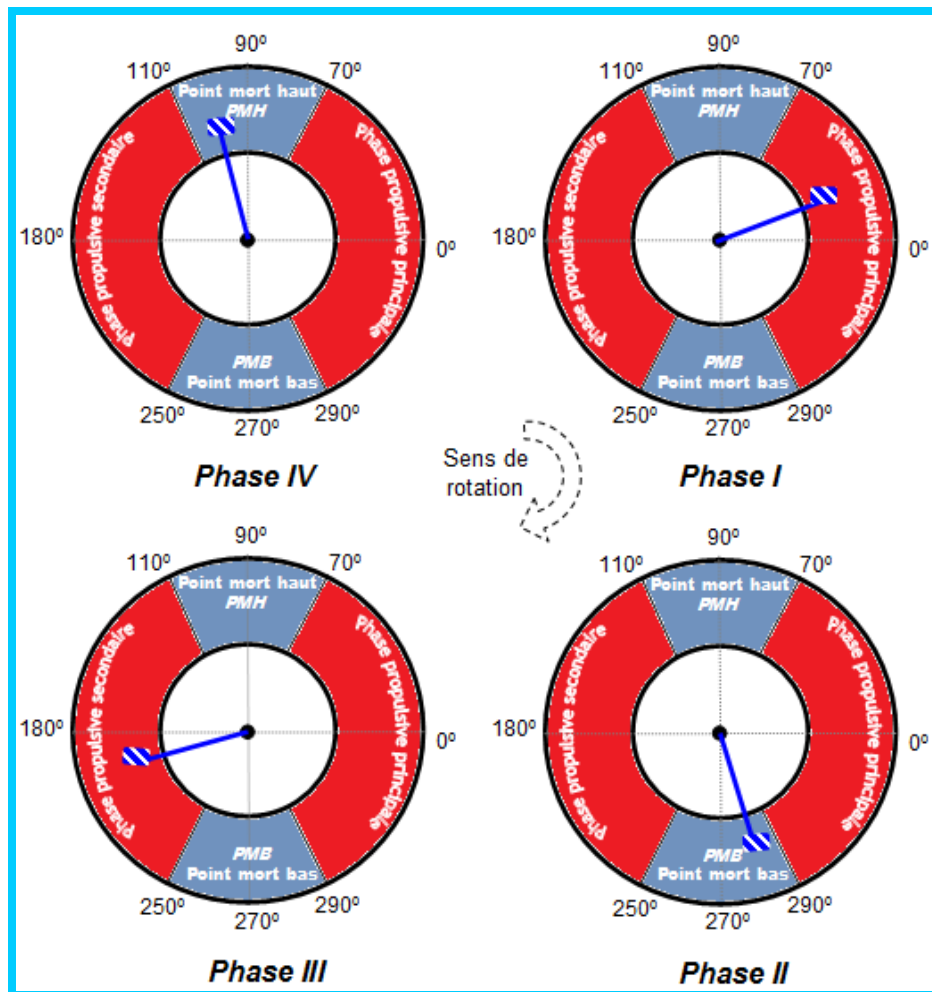


Figure 22 : Les quatre phases composant un cycle de pédalage – Illustration de la pédale droite (Réf.: 14)

La troisième phase, appelée phase propulsive secondaire (appelée aussi traction), dont la direction est du bas vers le haut, ne peut contribuer à l'effort propulsif que par l'utilisation d'un système de fixation du pied à la pédale comme des pédales à cales. Cette phase s'étend entre 250° et 110° du cycle et elle se produit lors du retour arrière de la pédale. Certains cyclistes utilisent cette phase pour compenser le poids de leurs propres membres alors que d'autres ne font que laisser reposer leur membre inférieur sur la pédale. Dans ce dernier cas, cela crée des forces sur la pédale qui freinent la remontée de celle-ci. Le retour arrière est aussi facilité par

l'augmentation de l'effort en poussée sur la pédale opposée qui doit compenser la passivité en traction du premier membre.

Finalement, pour compléter le cycle, la pédale rentre dans la phase de transition située en haut. Cette phase s'étend entre 110° et 70° et elle est située autour du point mort haut (PMH). Cette phase, dont la direction est de l'arrière vers l'avant a un rôle semblable à celui de la phase de transition située en bas, soit la création de forces horizontales pour permettre la continuité de la rotation de la pédale.

Vu que la paire des pédales est montée sur un axe de 180° , les phases de la pédale droite sont parfaitement asymétriques à celles de la pédale gauche.

② Les articulations et les muscles sollicités lors du pédalage

Le pédalage est dû à la succession de deux mouvements des membres inférieurs, l'extension et la flexion. Malgré les apparences, il s'agit d'un système mécanique complexe, fonctionnant dans un même plan, avec quatre leviers de longueurs inégales et avec cinq points d'articulation, dont deux fixes et trois mobiles, autour d'axes perpendiculaires au plan de mouvement. Les quatre leviers sont la cuisse, la jambe, l'ensemble pied-pédale et la manivelle. Comme illustré sur la figure 23, les deux points fixes sont l'articulation de la hanche (1) et l'axe du pédalier (4). Les trois points mobiles sont les articulations du genou (2) et de la cheville (3) et l'axe de la pédale (5).

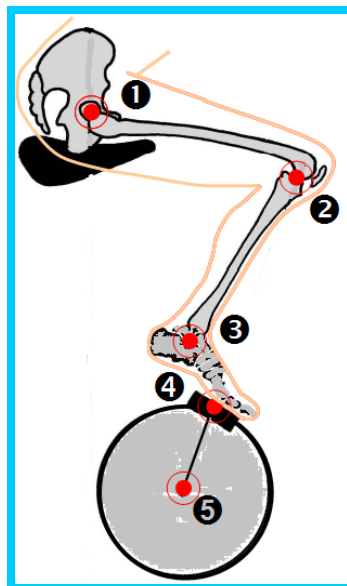


Figure 23 : Les cinq articulations actives du couple membre inférieur/pédale
(Réf.: 14)

Quant aux muscles sollicités, il y a environ onze muscles ou groupes de muscles qui participent non seulement au pédalage, mais aussi au maintien du vélo à une certaine vitesse et à un bon équilibre. On distingue deux catégories de muscle : les muscles de la partie inférieure du corps, jusqu'aux hanches, qui servent surtout au pédalage, et les muscles de la partie supérieure du corps, le tronc, qui sont surtout utilisés pour le maintien du guidon et le pédalage en position debout. On peut cependant identifier six muscles ou groupes de muscles inférieurs qui sont les plus déterminants dans le pédalage:

- A- le grand fessier qui est un extenseur de la hanche ;
- B- les quadriceps qui sont des extenseurs du genou et fléchisseur de la hanche ;
- C- les jumeaux du triceps sural qui sont des extenseurs de la cheville et fléchisseurs du genou ;
- D- le jambier antérieur qui est fléchisseur de la cheville ;
- E- le ischio-jambier, composé du biceps fémoral et du semi-membraneux qui sont des fléchisseurs du genou et extenseurs de la hanche et. ;
- F- le psoas iliaque qui est un fléchisseur de hanche.

Si l'on se réfère aux quatre phases de pédalage de la figure 22, on peut, selon des déductions anatomiques, associer à chaque phase les muscles ou les groupes de muscles les plus sollicités (A à F).

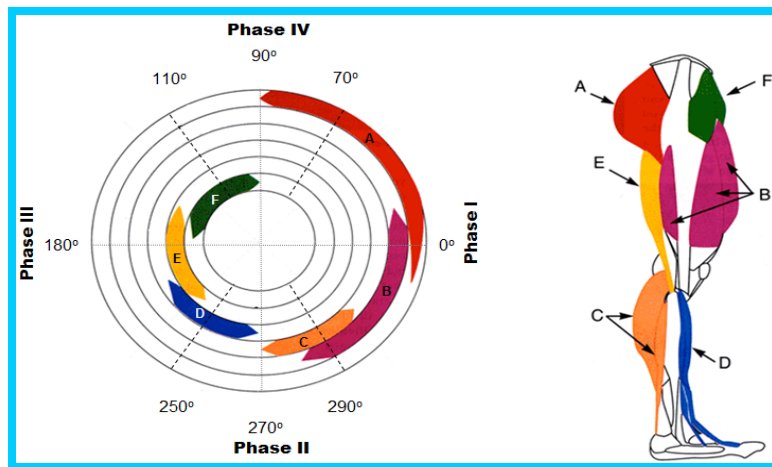


Figure 24 : Les muscles en activité durant les quatre phases de pédalage (Réf.: 15)

Durant la phase I, où la puissance musculaire est à son maximum, c'est d'abord le quadriceps qui entre en jeu par sa contraction, il est épaulé par le grand fessier et le triceps qui vient aider le quadriceps dans son extension. S'ajoute à ces efforts musculaires, le poids du membre inférieur qui, grâce à l'effet gravitationnel, fait descendre la pédale. Cependant, le poids de l'autre membre peut freiner le mouvement, s'il y a un défaut de coordination entre les deux membres. Durant cette phase, le bassin doit être soutenu par des abdominaux et le carré des lombes

solides, afin d'éviter que l'extension de la hanche et du genou entraîne une surélévation de l'hémi-bassin au lieu de la descente de la pédale. C'est une phase où les articulations de la hanche et du genou sont en extension alors que l'articulation de la cheville est maintenue à la position isométrique.

La phase II coïncide avec la fin de l'extension de la hanche, le début de la flexion du genou et la flexion plantaire de la cheville. On observe donc, une continuité de l'action des quadriceps et une prise de relais du couple triceps sural et jambier antérieur. Ce couple est prépondérant pour conserver l'énergie cinétique accumulée lors de la phase précédente. L'efficacité de ces mouvements ne peut être optimale que si la pédale est munie d'un cale-pied.

Durant la phase III, le pied fait un mouvement du bas vers le haut pour remonter la pédale. On observe durant cette phase, la contraction du biceps fémoral qui fait fléchir le genou et du psoas qui fait fléchir la hanche. Au niveau de la cheville, les extenseurs de pied vont contribuer au tirage vers le haut de la pédale. C'est la phase la moins instinctive du pédalage. C'est une phase de relâchement et de récupération pour le quadriceps et le triceps. L'appui sur la selle constitue le point fixe du mouvement. Sans cale-pied, il est impossible de rentabiliser cette phase.

Finalement, la phase IV qui complète le cycle de pédalage permet de remettre le membre inférieur en position de propulsion. Durant cette phase, le genou amorce son extension alors que la hanche et la cheville terminent leur mouvement de flexion. À la fin de la phase, le groupe musculaire particulièrement puissant dominé par les quadriceps et le triceps sont mis sous tension en préparation pour la phase suivante (phase I). Notons que c'est la seule phase où interviennent les releveurs du pied.

Le cycle de pédalage permet, pour chaque muscle ou groupe musculaire, l'alternance de phases d'activité et de récupération. Plus les mouvements du cycliste sont coordonnés, plus il pourra bénéficier de ces phases de récupération. La première phase est certainement la phase principale où la quasi-totalité de la puissance est générée, du moins pour un cycliste moyen. Les trois autres phases ont des rôles importants mais leur efficacité dépend de l'expérience du cycliste et de la présence ou non d'un cale-pied.

Aussi, il ne faut pas perdre de vue que le pédalage se fait avec les deux membres inférieurs. Pour les phases de transition, relativement courtes, alors qu'un membre est en flexion totale l'autre est en extension complète. On peut à la limite les considérer comme indépendantes. Cependant, pour les phases propulsives, il y a une véritable complémentarité des deux membres inférieurs. Si le membre en flexion repose passivement sur la pédale, alors il se crée un couple moteur résistant lors de la phase de remontée de la pédale contre laquelle le membre qui pousse en phase de descente doit lutter. En d'autres termes, un travail supplémentaire est réalisé par le membre qui pousse sur la pédale, ce qui représente une perte

d'énergie considérable vu le poids d'un membre inférieur. C'est le cas de la majorité des cyclistes non sportifs. Pour les spécialistes de l'activité, la coordination des quatre phases leur permet d'accroître l'efficacité du geste de pédalage, c'est-à-dire son rendement. La puissance générée est donc la somme de la puissance des phases propulsives (poussée et traction) des deux membres inférieurs. Contrairement à ce qu'on peut croire, le geste de pédalage n'est pas naturel, mais un geste complexe, qui peut faire l'objet d'une optimisation par l'apprentissage et l'entraînement.

③ La puissance musculaire produite lors du pédalage

Les muscles sont extensibles, élastiques, excitables et contractiles. Des propriétés qui conditionnent leur fonctionnement et leur efficacité biomécanique. Le muscle est constitué de milliers de cellules de forme allongée, appelées fibres musculaires. Ces fibres sont regroupées en faisceaux, tel un câble d'acier qui contient plusieurs centaines de fils. Si l'on observe une fibre musculaire au microscope, on verra des filaments minuscules, dans lesquels prennent naissance les contractions musculaires. Dans chaque fibre loge deux protéines, l'actine et la myosine, qui ont la propriété de pouvoir se contracter et se relâcher.

En se contractant ou se relâchant, elles glissent les unes sur les autres et font ainsi bouger le muscle. Pour entreprendre cette action, les fibres musculaires ont besoin d'une « bougie d'allumage », il s'agit de l'adénosine triphosphate, qu'on appelle communément l'ATP.

L'ATP est une molécule qui reçoit l'énergie provenant de la dégradation des molécules de lipides, protéines et glucides et qui transmet cette énergie aux fonctions cellulaires. Le muscle a des réserves d'ATP qui lui permettent de fonctionner pendant quelques secondes. Ensuite, le muscle doit régénérer de l'ATP pour continuer à se contracter lors d'un exercice physique.

Le muscle transforme donc une énergie chimique en énergie mécanique. Environ 20 % de l'énergie chimique est transformée en énergie mécanique et le reste est dissipé en forme de chaleur. Cette énergie mécanique se matérialise en puissance, qui prend sa source dans les processus chimiques bioénergétiques de production d'énergie et dans les aptitudes biomécaniques et gestuelles qui permettent de transférer l'énergie chimique en énergie de mouvement. Pour mieux comprendre la mécanique de production de la puissance, il faut distinguer la force musculaire, le travail musculaire et la puissance musculaire. Ces trois éléments sont interreliés.

La force musculaire

La force d'un muscle dépend du nombre de ses fibres et elle est proportionnelle à la surface de sa section fonctionnelle et elle peut varier de 5 à 10 kg par cm². Mais la

force effectivement produite par le muscle dépend du nombre de fibres mobilisées. Il y a sommation des contractions de chaque unité motrice, dans le temps par stimulations itératives des fibres et dans l'espace, par mobilisation simultanée des fibres. La force contractile d'un muscle est également proportionnelle à la longueur des fibres au début de la contraction. Plus le muscle est allongé au préalable, plus la contraction est efficace.

L'efficacité biomécanique des muscles dépend de quatre facteurs mécaniques. À savoir l'étirement préalable, l'étendue de leur course, la force qu'ils peuvent développer et le moment de leur force par rapport à l'articulation mobilisée.

- Un muscle étiré au préalable a une contraction plus efficace, tant à cause du mécanisme intime de la contraction musculaire qu'en raison de l'élasticité musculaire. Cette règle ne s'applique que dans une certaine limite, car l'extensibilité des muscles n'est pas infinie.
- La course d'un muscle est la différence de longueur entre son raccourcissement maximum et son étirement maximum. Cette course est, par principe pour les muscles mono-articulaires, adaptée aux mouvements de l'articulation desservie. Dans le cas des muscles poly-articulaires, elle est en général insuffisante pour satisfaire la somme des besoins de deux articulations mitoyennes. Un entraînement poussé peut ainsi modifier leurs aptitudes, notamment leur capacité de course. Chez les cyclistes, les mouvements du pédalage se déroulent donc avec des amplitudes de course relativement modérées. Les muscles des trois articulations (hanche, genou et cheville) se raccourcissent en n'utilisant qu'un tiers, environ, de leur potentiel. Ceci coïncide avec les amplitudes articulaires constatées pendant le pédalage, par rapport aux possibilités des articulations.
- La force développée est proportionnelle au nombre de fibres musculaires du muscle mobilisé. Plus le muscle est volumineux, plus il est fort. Par exemple, le grand fessier, avec une surface d'environ 60 cm², est le muscle individuel le plus fort du corps. Le quadriceps avec une surface d'environ 150 cm², constitue l'ensemble musculaire le plus fort du corps. L'ensemble du quadriceps est pendant le pédalage 1,6 fois plus puissant que le grand fessier alors que sa surface est 2,5 fois plus étendue.
- Le moment d'une force est le produit de cette force par la distance à son point d'appui, mesurée perpendiculairement à la direction de la force. Cette distance est le bras de levier. Pour un muscle agissant sur une articulation, le moment est égal au produit de sa force par la distance de la direction de cette force à l'axe du mouvement de l'articulation. Plus le moment est important, plus l'efficacité mécanique du mouvement est grande. Pour cela, il faut que le point d'application de la force soit le plus éloigné possible de

l'axe de l'articulation. C'est, par exemple, un des rôles que joue la rotule. Autrement dit, il faut augmenter l'angle de la force par rapport à l'axe du segment osseux qu'elle mobilise. La contraction du muscle réalise cela par augmentation de son volume transversal. L'augmentation de la masse musculaire par l'entraînement a le même effet. Plus le muscle est gros, plus il est puissant, plus il est en bonnes conditions pour exercer sa force.

Si l'on se réfère aux quatre phases qui composent un cycle de pédalage (figure 22), on peut déterminer les forces appliquées sur la pédale tout le long de la rotation de celle-ci. La partie gauche de la figure 25 illustre la force appliquée sur la pédale exprimée en unité de Newton à différents angles de la manivelle. La partie droite de la figure illustre l'emplacement de la pédale à trois points déterminants durant le cycle de pédalage. Selon les conditions physiques et le niveau d'entraînement des cyclistes, chacun peut avoir des niveaux de forces différents mais l'allure des courbes est assez standard.

La force totale, courbe en rouge, est la sommation des forces propulsives (courbe en bleu), et des forces non-propulsives (courbe en vert). La force atteint son maximum au point A qui correspond à environ 340 degrés de la rotation de la pédale soit au moment où la pédale dépasse sa position horizontale. Le poids combiné à la poussée du membre inférieur génère cette force maximale. Le point B correspond à la force minimale durant le cycle du pédalage et se situe dans une fourchette allant de 260 à 90 degrés. Dans cette fourchette, les forces propulsives sont négatives et correspondent à une force anti-propulsive, c'est-à-dire que l'effort sur la pédale freine la rotation de la manivelle. Au point C, la force appliquée sur la pédale commence à croître et permet au cycliste d'amorcer la poussée pour atteindre à nouveau le point A. Ainsi, le cycle de la distribution des forces lors d'un coup de pédale est complété.

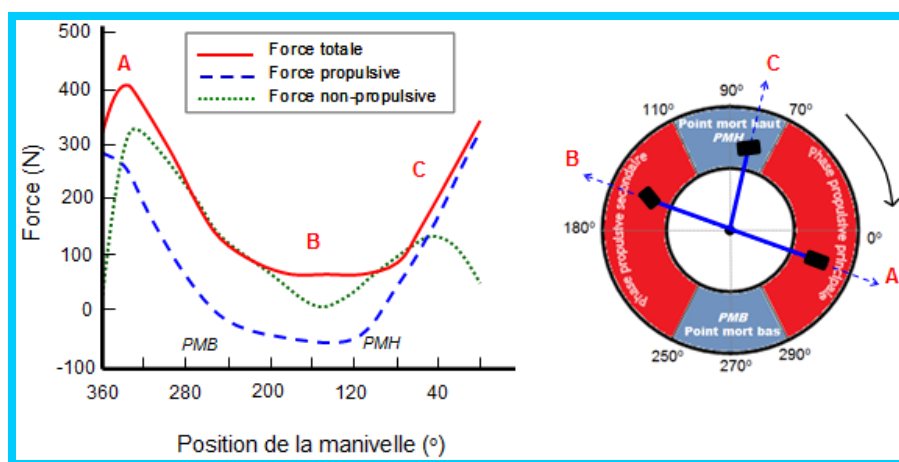


Figure 25 : La force appliquée sur la pédale durant sa rotation (Réf. : 16)

Après un effort soutenu et intense durant un certain temps, le cycliste peut avoir la sensation de lourdeur et de fatigue extrême qui provient d'une accumulation d'acide lactique dans les muscles sollicités. Cette accumulation dans le tissu musculaire contribue à une production accrue d'ions d'hydrogène qui finit par affecter la performance du muscle.

En effet, lorsqu'un muscle est soumis à un effort intense, la contraction en vient à limiter la circulation sanguine vers celui-ci. Privé de l'oxygène que véhicule le sang, le muscle continue à consommer le sucre qui lui reste. Cette consommation produit alors de l'acide lactique, réputé pour perturber la contraction musculaire et causer des crampes.

Pour poursuivre l'exercice physique lorsque les muscles actifs sont saturés d'acide lactique, il faudra réduire l'intensité de l'effort pour que le muscle se délie et permette au sang d'y circuler de nouveau. En contact avec l'oxygène, l'acide lactique sera alors transformé en dioxyde de carbone et en eau. Ainsi recyclé, l'acide lactique sera en partie converti en énergie puisqu'il entre dans la production de nouvelles molécules d'ATP.

Ceci explique donc la décroissance de la force dans le temps, tel qu'illustré sur la figure 26. Ainsi, au début d'un exercice physique, un individu dispose d'une force maximale qui décroît très rapidement, durant un laps de temps court après un effort intense et soutenu. C'est le cas, notamment, dans une course de 100 mètres. Par la suite, pour maintenir l'effort, l'individu réduit l'intensité de l'effort et entre dans une phase d'endurance moyenne, par exemple une course à vélo d'une durée de 10 à 30 minutes à intensité moyenne à élevée ou d'endurance longue durée, c'est le cas notamment d'une course à vélo de quelques heures à intensité moyenne à faible. Dans les courses de vélo à haut niveau, un athlète peut maintenir une intensité moyenne jusqu'à 6 heures et terminer la course avec une force explosive à l'arrivée.

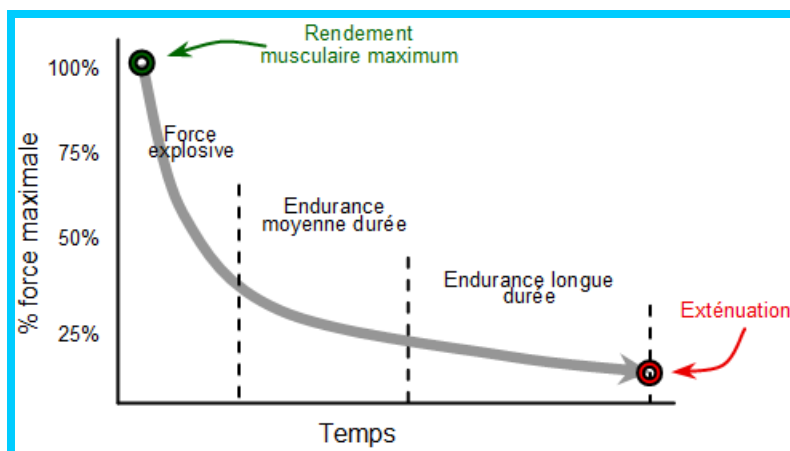


Figure 26 : Évolution du profil physiologique.

Le travail musculaire

Le travail est la variation de l'énergie d'un système due à l'application d'une force, agissant sur une distance. En mécanique, il s'agit donc d'un mouvement s'exerçant contre une résistance, que celle-ci soit la pesanteur, un frottement ou l'inertie. Mathématiquement, le travail (W) est le produit d'une force (F) par un déplacement (d) :

$$W = F * d$$

L'unité de travail est le newton-mètre (N.m) ou le joule (J) qui correspond à une force de 1 newton déplaçant un corps de 1 mètre. On utilise fréquemment une autre unité, la calorie. Une calorie est égale à 4,186 joules et 1 kilocalorie est donc égale à 4 186 joules.

Lors d'une contraction isotonique ou cinétique, le travail musculaire est bien le produit de la force musculaire par la longueur du raccourcissement du muscle. Lors d'une contraction isométrique ou statique, le déplacement étant nul, il n'y a pas de travail au sens physique. Mais en physiologie humaine, le muscle travaille, car il est bien sous tension et dépense de l'énergie. Ce travail est appelé travail statique.

Dans le cas le plus simple, par exemple, le mouvement autour d'une seule articulation, l'effet de cette force externe est fonction de l'importance de son intensité par rapport à la force interne que peuvent produire les muscles eux-mêmes. Il en résulte un des trois cas suivants:

- Lorsque la force interne développée par le muscle est supérieure à la force externe sous forme de résistance, la force musculaire peut mobiliser les pièces osseuses sur lesquelles sont attachés les tendons et il y a rapprochement des segments autour d'une articulation donnée. Ainsi, le muscle se contracte tout en se raccourcissant. Il s'agit d'une contraction concentrique et le travail correspondant est le travail dynamique concentrique.
- Lorsque la force interne et la force externe sont d'intensité égale, le muscle ne peut se raccourcir malgré une contraction d'intensité maximale. On parle de contraction isométrique, qui n'implique pas de variation de la longueur du muscle. Il s'agit notamment du travail statique utilisé dans le maintien postural.
- Lorsque la force interne est inférieure à la force externe, la première ne peut s'opposer à la seconde, et ce malgré le fait que le muscle est contracté de façon maximale. Le muscle va alors être contracté tout en étant allongé. On

qualifie cette contraction d'excentrique, et le travail musculaire correspondant est le travail dynamique excentrique.

La puissance musculaire

La puissance P s'exprime en watt (w) ou en joule pour un intervalle de temps. Un watt est l'équivalent d'une dépense énergétique d'un joule / seconde. La puissance est un travail musculaire effectué par intervalle de temps, c'est-à-dire une force qui s'exerce sur une distance, pendant un temps donné, soit à une certaine vitesse. On peut donc l'exprimer comme suit :

Puisque le travail (W) est défini par $F * d$

$$P = W / \Delta t = F * d / \Delta t = F * v$$

Donc

$$P \text{ (en watt)} = \text{Force (en newton)} * \text{vitesse (en m/sec)}$$

En cyclisme, la puissance est la résultante du couple de force appliqué sur les pédales, multipliée par la fréquence de pédalage. La puissance est donc l'association de la force et de la vitesse.

Exemple 1 : un cycliste qui parcourt une distance donnée en 80 secondes tout en dépensant 12 000 joules, aura développé une puissance de 12 000 joules / 80 secondes, soit 150 watts. Si la même distance est parcourue en 30 secondes, le cycliste aura développé une puissance de 400 watts.

Exemple 2 : un cycliste qui applique une force de 75 newtons sur la pédale et que la vitesse de développement est de 2 mètres par seconde, la puissance générée par le pédalage est de 75 Newtons multipliés par 2 m/sec, soit 150 watts.

Il existe en effet en cyclisme un rapport entre la force et la vitesse : plus la fréquence de pédalage est importante, moins on applique de force pour entretenir le mouvement. Concrètement, la vitesse est représentée par la fréquence de pédalage et la force est représentée par le développement, c'est-à-dire, la distance parcourue par le vélo à chaque coup de pédale. La puissance représente donc l'effort fourni par le cycliste pour réaliser la vitesse de déplacement.

Cela ne veut toutefois pas dire que deux coureurs, roulant à la même vitesse, développent la même puissance, car ils ont des paramètres individuels différents comme l'aérodynamisme et surtout le poids. Ces paramètres influent sur la force à développer pour se déplacer. En effet, le cycliste le plus lourd devra appuyer plus sur les pédales pour rouler à la même vitesse que son compagnon plus léger. En réalité, plus que la puissance développée, c'est le rapport poids/puissance qui est le plus important.

La puissance est la quantité de travail délivrée par unité de temps. À force égale et à déplacement égal, la puissance délivrée est d'autant plus grande que le mouvement est plus rapide. C'est ce que recherchent les sportifs, soit de développer une puissance maximale. Cela se traduit chez les cyclistes par la recherche d'une grande vitesse de rotation du pédalier. Le mécanisme de la contraction musculaire impose une relation entre la force développée par le muscle et la vitesse d'exécution du mouvement. Plus la force à appliquer est grande, plus le mouvement est lent. Tout se passe comme si les réactions chimiques qui libèrent l'énergie à l'intérieur du muscle se déroulaient à une vitesse constante. L'allure à laquelle est libérée l'énergie nécessaire au mouvement est uniforme. Il faut moins de temps pour soulever un objet léger que pour soulever un objet lourd. Il y a donc chez le cycliste une recherche du meilleur compromis entre la force à appliquer sur la pédale et la fréquence de pédalage. Les braquets, c'est-à-dire la combinaison des dimensions du plateau et du pignon, permettent de tirer le meilleur avantage possible de la relation entre la force et la rapidité et donc, de produire la puissance nécessaire. La figure 27 illustre les deux relations typiques entre, d'un côté, la force et la vitesse et d'un autre côté, la puissance et la vitesse. Les données sont exprimées en pourcentage des valeurs maximales théoriques.

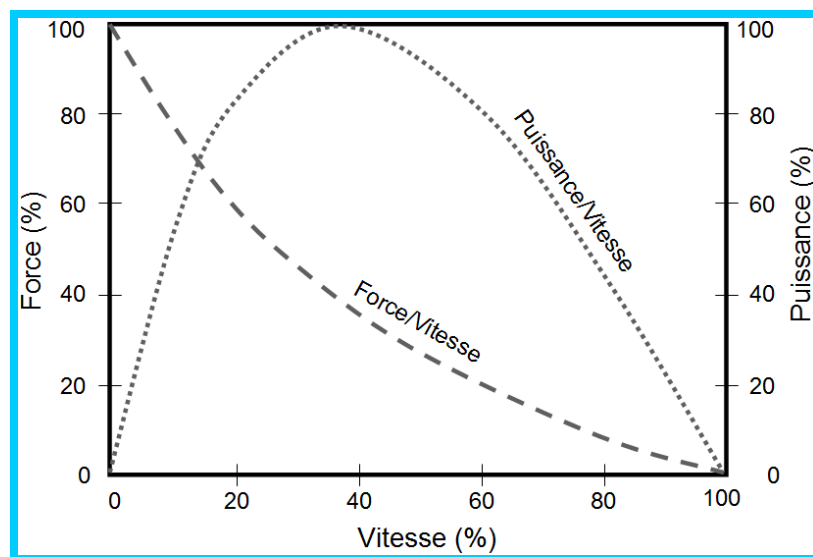


Figure 27 : Les relations typiques Puissance/Vitesse et Force/Vitesse lors du pédalage (Réf.: 17)

La figure montre clairement que la force diminue avec l'augmentation de la vitesse de pédalage. À une vitesse nulle, la force est à son maximum et représente indirectement la force maximale isométrique. La vitesse atteint son maximum lorsque les résistances qui s'opposent au pédalage sont nulles. Donc, la force est inversement proportionnelle à la vitesse de raccourcissement des fibres musculaires.

Quant à la courbe de la puissance, elle est obtenue en multipliant les coordonnées de chacun des points de la courbe Force-Vitesse. La puissance est donc nulle quand la force est maximale, car il n'y a aucun déplacement. Par la suite, la puissance augmente progressivement pour atteindre un maximum lorsque la vitesse de pédalage est optimale, soit à environ 40 % de la vitesse maximale. Au-delà de cette vitesse optimale, la puissance décroît pour atteindre une valeur nulle quand la vitesse est maximale alors que la force est nulle.

Dans des conditions idéales, la puissance développée par un cycliste moyen peut varier entre 100 watts, soit l'équivalent d'une vitesse de 23 km/h et 250 watts, pour une vitesse de 31 km/h. Par ailleurs, un cycliste élite peut produire jusqu'à 5 watts pour chaque kilogramme de sa masse pendant une heure. Par exemple, un cycliste pesant 75 kg et qui peut maintenir une puissance de pédalage de 375 watts durant une heure est considéré un cycliste de la catégorie élite.

En se déplaçant à vélo, la puissance à développer est directement influencée par les forces à vaincre. Ces forces externes sont principalement, le poids du cycliste lui-même et de son vélo, la résistance créée par le vent, la résistance créée par la friction avec la chaussée et la résistance créée par le dénivellement de la chaussée. Ces éléments seront traités plus en détail dans le chapitre 4.

④ L'énergie de l'effort du pédalage

Tout exercice physique demande une dépense d'énergie. Cette énergie s'exprime en unité de joules. Comme on l'a vu précédemment, un joule est défini comme étant le travail d'une force motrice d'un newton dont le point d'application se déplace d'un mètre dans la direction de la force :

$$1 J = 1 N.m = 1 kg * (m/sec)^2$$

L'expression du joule est donc le kilogramme mètre carré par seconde au carré. Il est facile de retrouver ce résultat à partir de la formule de calcul de l'énergie:

$$E = 1/2 m v^2$$

E étant en joules (J), m en kilogrammes (kg) et v en mètres par seconde (m/sec).

Cette énergie est appelée énergie cinétique, elle représente l'énergie consommée pour créer un mouvement et déplacer une masse à une certaine vitesse.

Prenons le cas d'un cycliste qui pèse 70 kg et son vélo qui a une masse de 15 kg. Le système a donc une masse totale (m) de 85 kg. Ce système cycliste-vélo est considéré comme un tout, puisque les deux composantes se déplacent à la même vitesse. Supposant que le cycliste se déplace à vitesse constante, c'est-à-dire sans accélération, et parcourt une distance de 10 km en 12 minutes. Sa vitesse moyenne

est alors de 13,88 m/sec, soit le ratio de la distance parcourue en mètres (10 000 m) par le temps du parcours en secondes (720 secs).

Le cycliste a dépensé durant cette randonnée une énergie équivalente à :

$$\frac{1}{2} * 85 \text{ kg} * 13,88^2 \text{ (m/sec)} = 8 \text{ 187,8 J (ou 8,19 kJ)}$$

Cette énergie peut aussi être exprimée en calorie qui vaut 4,186 joules. Donc, ce même cycliste aurait dépensé 1 956 calories (8 187,8/4,186).

Or, le corps humain ayant un rendement mécanique d'environ 20%, ce n'est pas 8 187,8 J (ou 1 956 calories) qu'il faudra absorber pour compenser l'effort fourni durant la randonnée, mais 5 fois plus.

La production énergétique

Comme on l'a vu précédemment, l'adénosine triphosphate (ATP) est un acide aminé à haut potentiel énergétique qui, après avoir capté l'énergie libérée par la dégradation des glucides tirés des aliments ingérés, la libère sous l'effet d'enzymes, selon les besoins de l'organisme. Cet ATP est l'élément indispensable à la contraction musculaire et constitue en quelque sorte le réservoir d'énergie cellulaire, dans lequel la cellule puise son énergie pour réaliser l'ensemble de ses activités. Cependant, les muscles renferment une faible réserve d'ATP; c'est ce qui permet d'agir promptement et avec force, par exemple monter rapidement quelques marches d'escalier. Mais, cette réserve naturelle est limitée et se consomme en quelques secondes après un effort maximal. Il faut donc remplir le réservoir d'ATP au fur et à mesure qu'il se vide. Trois processus interviennent pour assurer en permanence la re-fabrication de l'ATP, soient un processus anaérobie alactique, un processus anaérobie lactique et un processus aérobie.

L'anaérobie alactique : ce processus correspond au mécanisme de synthèse de l'ATP à partir de la dégradation d'une molécule de créatine phosphorylée riche en énergie (CP) qui est présente en petite quantité dans les cellules musculaires au repos. Ce processus, qu'on nommera ATP-CP, n'a pas besoin d'apport en oxygène et ne produit pas de quantité significative d'acide lactique. Grâce à sa présence dans les cellules musculaires, un effort intense peut être prolongé jusqu'à 15 secondes.

L'anaérobie lactique : une fois l'ATP-CP est épuisé, la synthèse de l'ATP se fait via la dégradation du glucose qui représente 99 % du sucre qui circule dans le sang. Ce processus est appelé « glycolyse », qu'on nommera ici ATP-G, se produit sans apport d'oxygène mais génère de l'acide lactique en quantité significative. Ce processus peut assurer des efforts de puissance intense jusqu'à 45 secondes, cependant le processus va continuer la synthèse de l'ATP-G durant 2 ou 3 minutes.

C'est en fait l'accumulation de l'acide lactique dans les muscles qui réduit l'efficacité du travail musculaire en bloquant les contractions musculaires. C'est ce qu'on appelle simplement la fatigue musculaire.

L'aérobic : Au-delà de cette durée d'effort intense, une troisième source intervient où les muscles pourront maintenir un effort moindre, mais soutenu, en produisant de l'ATP en mode aérobie, c'est-à-dire avec l'apport de l'oxygène. Ce processus permet une production efficace de grandes quantités d'ATP, résultante de la dégradation des glucides et des lipides en présence de l'oxygène. Cette oxydation, ne produit que des déchets faciles à éliminer, soient l'eau et le gaz carbonique, évacués en produisant de la chaleur. La limite de production de ce processus est fonction de la capacité de l'organisme à prélever, transporter et distribuer l'oxygène aux muscles. Dans le domaine sportif, cette limite est définie par la VO_2Max , c'est-à-dire la consommation maximale d'oxygène pour un individu. Plus cette limite est élevée et plus l'individu peut la maintenir longtemps, plus la production de l'ATP sera efficace, c'est le cas notamment des cyclistes élites d'endurance.

LE DOPAGE

Le dopage est une pratique qui consiste à utiliser des moyens artificiels, tels que des substances ou des techniques médicales illégales pour améliorer les performances d'un athlète. Un exercice de longue durée est en relation directe avec l'aptitude maximale à consommer de l'oxygène (VO_2Max), c'est-à-dire la capacité du sportif à utiliser l'oxygène. L'utilisation d'oxygène s'effectue sans production d'acide lactique qui est une molécule qui fatigue le sportif, est responsable de crampes et de tétanisation. Le débit d'oxygène mis à la disposition des tissus dépend à la fois des valeurs maximales du débit cardiaque et de la différence artérioveineuse des gaz du sang. Or la VO_2Max diminue quand la concentration de l'oxygène artériel (CaO_2) est réduite par l'hypoxie, par le blocage d'une partie de l'hémoglobine, par le monoxyde de carbone, ou par la diminution du volume sanguin. En revanche, elle augmente après autotransfusion sanguine ou quand la pression de l'oxygène diminue. Ainsi l'amélioration de la performance aérobie procède d'un double effet, à la fois sur le système de transport de l'oxygène et sur le potentiel oxydatif cellulaire. C'est le premier aspect qui est le plus souvent exploité dans les cas de dopage. La prise de substances interdites n'est pas anodine. À court ou à long terme, elle peut entraîner des problèmes graves de santé. Les produits dopants perturbent les équilibres physiologiques naturels, notamment hormonaux et amoindrissent les réactions de défense (Réf. : 18).

La figure 28-a illustre l'enchaînement des processus de refabrication de l'ATP en fonction de l'effort requis par l'exercice. Ainsi, pour un effort explosif, par exemple une course d'accélération de vélo en salle, c'est le processus anaérobie alactique qui prime. Pour un effort de résistance, le cas notamment de la course à vélo en

équipe, ce sera le processus anaérobie lactique qui générera la plus grande quantité d'ATP. Finalement, pour un effort d'endurance, cas notamment d'une randonnée de plusieurs dizaines de kilomètres, ce sera le processus aérobie qui sera responsable de produire l'énergie requise. Quant à la figure 28-b, elle illustre l'apport en énergie aux muscles par chacun des trois processus. Chaque processus peut être vu comme un réservoir où se fabrique l'ATP selon une capacité et une puissance qui leur sont propres.

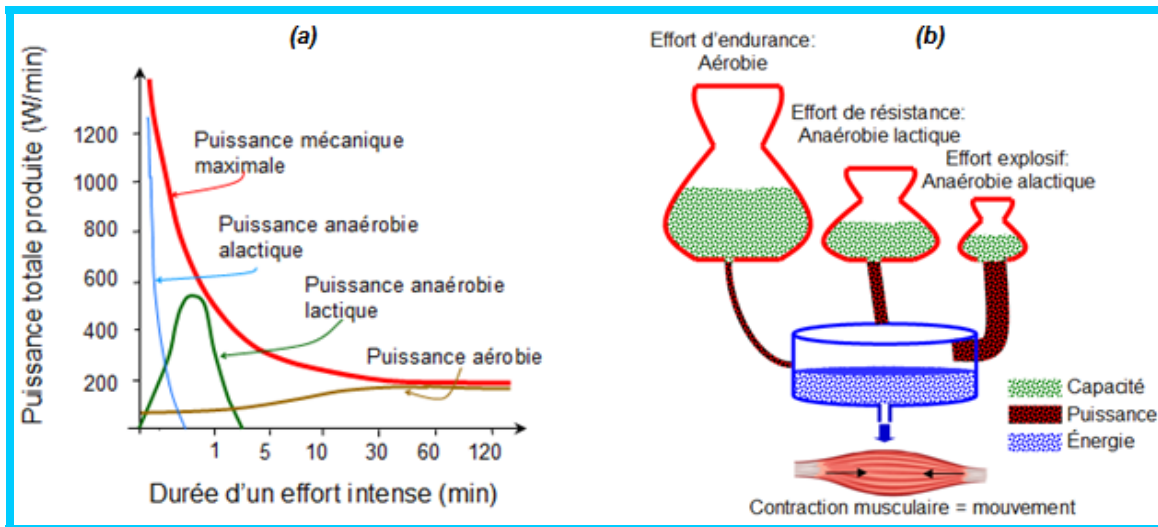


Figure 28 : Contribution des différents processus énergétiques selon le niveau d'effort (Réf.: 19)

Les apports énergétiques

La machine humaine a besoin de carburant. Ce carburant provient des aliments qui sont digérés et transformés. Une alimentation variée et équilibrée est nécessaire pour fournir à l'organisme l'énergie dont il a besoin, d'où l'importance de la quantité et de la qualité de la nourriture absorbée quotidiennement. Une alimentation variée permet d'obtenir l'équilibre en protéines, glucides, lipides, sels minéraux et vitamines.

Les besoins énergétiques quotidiens totaux pour une femme modérément active sont de 2100 kcal et de 2700 kcal pour un homme. Pour un cycliste, il est difficile de définir un besoin calorique quotidien recommandé. L'apport énergétique est en effet fonction de nombreux facteurs tels que le profil de la route, le poids du cycliste, les caractéristiques du vélo et de la résistance à l'air.

Cependant, pour un exercice à intensité moyenne l'apport énergétique pour une cycliste adulte dont le poids est de 55 kilos est de 2475 kcal/jour et il est de 3990 kcal/jour pour un homme pesant 70 kg (Réf. : 20). Ainsi, les besoins en protéines chez des cyclistes d'endurance bien entraînés sont d'environ

1,1 g/kg/jour, soit 77 g de protéines par jour pour un individu de 70 kg. Chez les sportifs d'endurance de haut niveau, ce besoin peut atteindre 1,6 g/kg/jour ou 112 g de protéines par jour pour un individu de 70 kg.

Les glucides : il faudra privilégier ceux à index glycémique moyen ou bas, c'est-à-dire induisant une augmentation lente du taux de glucose dans le sang. En règle générale, les aliments les moins raffinés, et notamment les produits céréaliers complets comme le pain complet, pâtes complètes, riz complet, présentent un index glycémique bas à moyen contrairement aux aliments très raffinés comme le pain blanc et le sucre blanc.

Les lipides : on distingue trois grandes classes d'acides gras. Les acides gras saturés, les acides gras mono-insaturés et les acides gras polyinsaturés. Pour la ration lipidique, la répartition suivante est conseillée : 25 % d'acides gras saturés, 60 % d'acides gras mono-insaturés et 15 % d'acides gras polyinsaturés. Pour ces derniers, il est conseillé un apport équilibré en acides gras polyinsaturés de la série oméga 6 et oméga 3. Ceci est particulièrement important chez le cycliste, car ces acides gras ont des rôles importants au niveau du fonctionnement du cœur et des muscles.

Les protéines : sont constituées d'acides aminés. Parmi ces derniers, il faut distinguer les acides aminés non essentiels, c'est-à-dire que l'homme sait synthétiser, et les acides aminés essentiels, c'est-à-dire que l'homme ne sait pas synthétiser. Ces derniers acides aminés doivent donc impérativement être apportés par l'alimentation en quantité suffisante. De plus, certains acides aminés dits branchés (leucine, isoleucine et valine) peuvent avoir une importance toute particulière chez le cycliste, car leur ingestion pourrait permettre de limiter la fatigue centrale et d'augmenter la performance.

Les micronutriments : les micronutriments (vitamines et minéraux) sont nécessaires pour maintenir un bon équilibre dans l'organisme. Par exemple, les antioxydants comme les polyphénols, les vitamines C et E ou le sélénium sont indispensables pour neutraliser les radicaux libres produits en permanence par nos tissus. Toute déficience en un micronutriment peut avoir des répercussions sur notre organisme et donc sur notre capacité à nous entraîner. C'est notamment le cas pour le fer, en particulier chez les femmes. En effet, beaucoup de cyclistes féminines présentent des taux de fer relativement bas et cela a un impact direct sur la performance.

L'eau : Il est difficile d'évoquer tous les bienfaits de l'eau. Elle représente environ 60 % du poids corporel d'un adulte. Elle participe à tous les processus métaboliques, assure le transport des nutriments dans l'organisme et l'élimination des déchets. C'est un des constituants du fluide qui lubrifie nos articulations et préserve la mobilité. Dans l'eau, on retrouve deux minéraux essentiels soient le sodium et le potassium. Et lorsque la température de l'organisme commence à

monter, l'eau agit comme le liquide de refroidissement, tel le radiateur de la voiture.

On constate une diminution de la capacité du travail en fonction de la perte d'eau. À partir de 2 à 3 % de perte d'eau, le rendement musculaire baisse de 20 %. Ce qui veut dire que pour un sportif de 70 kg, à partir de 2 litres de perte d'eau environ, son rendement diminue de 20 %. La déshydratation guette le cycliste amateur ou professionnel, qui néglige de boire suffisamment. Si le cycliste continue de « pousser la machine » sans s'hydrater, son corps réduira la production de sueur pour conserver ses réserves d'eau. Sa température corporelle grimpera et, si elle dépasse les 41 degrés Celsius, ce sera le coup de chaleur.

La gestion de l'énergie

Pour une personne qui pratique le vélo de loisir, une alimentation équilibrée suffit. Par contre, dès que l'on relève son niveau de pratique, des besoins énergétiques supplémentaires se font sentir. Dans les sports d'endurance, on a besoin en particulier de lipides ou de glucides selon l'intensité des efforts.

Les lipides seront brûlés en pédalant longtemps à vitesse raisonnable. Une façon de se débarrasser d'un excès de poids. À un rythme beaucoup plus soutenu et intense, ce sont les glucides qui seront sollicités. La baisse de glycémie est alors la cause de ce que les cyclistes appellent « la fringale », soit une faim subite. Lorsque celle-ci apparaît, c'est trop tard. Il faut une demi-heure pour que l'absorption de sucre fasse remonter la glycémie du sang. D'où l'importance de bien s'alimenter avant et pendant l'effort.

Pour une sortie de deux heures maximum, boire de l'eau sucrée peut suffire. Au-delà de cette durée, une boisson riche en glucides sera nécessaire. Le principe est de boire au minimum 500 ml par heure de vélo, et même plus en cas de température élevée.

Pour les sorties supérieures à deux heures, une alimentation solide est également nécessaire. Là aussi, le choix possible est vaste. L'apport énergétique peut être fourni par les barres de céréales, les barres énergétiques ou les fruits secs.

L'entraînement du cycliste

L'entraînement vise principalement à faire progresser la puissance maximale du cycliste. Un programme d'entraînement bien dosé permet d'apprivoiser la machine musculaire, habitue l'organisme à travailler à ses limites, et optimise l'apport d'oxygène. Quel que soit le sport pratiqué, la performance augmente avec l'intensité et la fréquence de l'entraînement. L'entraînement régulier permet d'améliorer les aptitudes aérobiques en développant et en renforçant les potentiels pulmonaires, cardio-vasculaires et musculaires du cycliste.

Les poumons – Le corps a besoin de plus d’oxygène durant l’effort. La capacité du système permettant de distribuer l’oxygène est limitée. Sa valeur maximale est appelée capacité aérobie ou consommation maximale d’oxygène ou VO₂Max. Elle correspond aux limites physiques d’une personne. On l’exprime en millilitre d’O₂ par kg de poids corporel et par minute (ml/kg/min).

Chez un sujet sédentaire, un bon programme d’entraînement aérobique permet d’augmenter la capacité du VO₂Max de 5 à 30 %. La condition initiale joue pour beaucoup et le gain est plus important chez les gens qui sont initialement inactifs. La valeur de la VO₂Max est variable suivant les individus, leur âge, leur sexe et leur entraînement aux efforts d’endurance. En moyenne, à 20 ans, les jeunes femmes moyennement actives ont une VO₂Max aux alentours de 40 ml/kg/min. Chez les hommes, elle est un peu plus élevée, aux alentours de 45 à 50 ml/g/min. La valeur maximale observée est de 95 ml/kg/min chez des skieurs de fond élités. La VO₂Max des meilleurs coureurs cyclistes se situe aux alentours de 80 ml/kg/min.

Le cœur — L’entraînement aérobique fait augmenter le poids et le volume du cœur. Le muscle cardiaque (myocarde) est le premier à connaître un gain du volume et la paroi du ventricule gauche, qui sera soumis à une pression plus élevée, s’épaissira. La quantité de sang que le cœur éjectera à chaque contraction augmentera aussi. Cela procure du même coup une amélioration des performances sportives d’endurance. De plus, lorsque le cycliste termine un entraînement, sa fréquence cardiaque reviendra à la normale beaucoup plus rapidement. Pour ce qui est du débit sanguin (volume de sang éjecté en une minute), il augmentera également chez les gens qui pratiquent une activité physique, ce qui crée une meilleure distribution du sang vers les muscles.

Les muscles – Un entraînement de type aérobique apporte des changements importants aux muscles. Les muscles sont composés de deux types de fibres. Les fibres *lentes*, qui sont fortement sollicitées durant les efforts de longue durée et les fibres *rapides*, qui sont fortement sollicitées lors d’efforts explosifs de courte durée. Pendant un entraînement aérobique, afin de devenir plus performantes, les fibres lentes voient leur volume augmenté de 7 % à 22 % par rapport aux fibres rapides. Dès les premiers mois d’entraînement, le nombre de capillaires musculaires augmente de 5 à 15 %. Cette capillarisation multiplie les échanges gazeux entre le sang et les muscles et crée un environnement favorable à une bonne contraction musculaire et facilite l’élimination de l’acide lactique. Finalement, l’activité physique agit à titre d’anti-inflammatoire naturel lorsqu’elle est bien dosée. Cela est dû au fait qu’après plusieurs entraînements, le corps s’adapte, ce qui limite les risques de blessures.

Ainsi, en s’entraînant régulièrement à intensité moyenne à élevée, on peut améliorer la performance tout en retirant des effets positifs au niveau la santé. Les effets bénéfiques de l’entraînement, tant sur la santé que sur la performance, ne se manifestent que si la pratique est assidue. Quelques semaines d’inactivité physique peuvent faire disparaître les effets positifs de l’activité physique pratiquée

antérieurement. Les cyclistes ont donc avantage à pratiquer d'autres activités en dehors de la saison, par exemple le ski de fond ou la course à pied.

Le tableau suivant donne un aperçu des effets de l'entraînement sur la santé et sur la performance.

Tableau 1 : Les bénéfices de l'entraînement sur la santé et la performance (Réf.: 21)

	Cycliste amateur		Cycliste élite	
	Cas 1	Cas 2	Cas 1	Cas 2
Sorties/semaine	1 à 3	2 à 3	4 à 7	5 à 9
Durée moyenne des sorties (min)	20 à 60	20 à 120	45 à 210	60 à 240
Intensité	Moyenne	Moyenne à élevée	Élevée	Élevée à très élevée
Effet sur la santé	Moyenne	Élevé	Élevé	Élevé
Effet sur la performance	Faible	Moyen	Élevé	Très élevé

PERFORMANCES DU SYSTÈME CYCLISTE-VÉLO

Pour se déplacer à la vitesse souhaitée, le cycliste doit fournir un effort en conséquence. Cet effort, exprimé en unités de watts, n'est pas constant pour une vitesse donnée, mais il varie en fonction de facteurs internes et externes au système cycliste-vélo. La performance du système cycliste-vélo est ainsi directement influencée par ces facteurs qu'il faut vaincre pour avancer. Ces facteurs sont la résistance mécanique, créée par le frottement des éléments de roulement du vélo, la résistance gravitationnelle, créée par le poids du cycliste et de son vélo, la résistance frictionnelle, créée par le frottement entre le pneu et la chaussée et la résistance aérodynamique, créée par le déplacement du vent (figure 29). Ainsi la performance du système cycliste-vélo peut être exprimée par la puissance que le cycliste doit développer pour rouler à la vitesse souhaitée et selon l'amplitude des résistances à vaincre.

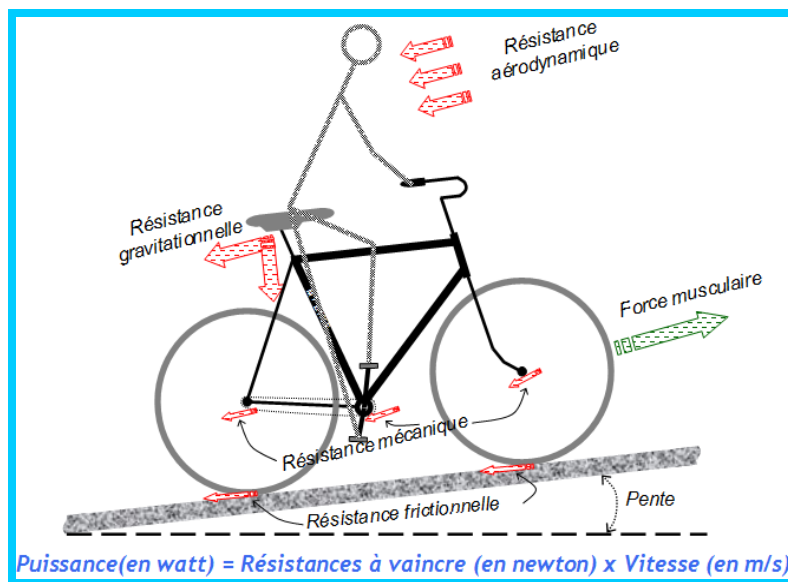


Figure 29 : Les différentes résistances opposées à l'avancement du cycliste

En plus des forces à vaincre, le présent chapitre traitera d'autres facettes de la performance du vélo, soit la vitesse (fréquence du pédalage) et le freinage.

① Les résistances à vaincre

La résistance mécanique (R_m) : Toute machine produisant un mouvement par un système de transmission quelconque subit une perte d'énergie. Le vélo ne fait pas exception. En poussant sur la pédale, celle-ci exerce une tension sur la chaîne qui, à son tour, exerce une tension sur le pignon de la roue arrière. Le mouvement

est ainsi créé. Aussitôt que ce mouvement est amorcé, les frottements entre la chaîne et les disques dentés du pignon ① et du plateau ⑦ diminuent le rendement de la transmission. Il faut ajouter à cela, le frottement des deux axes des roues ② ⑧, de l'axe de rotation du pédalier ⑥ et des dérailleurs ③ ④ ⑤. Même pour un vélo tout neuf très bien entretenu et graissé, rien ne peut totalement éliminer le frottement entre les pièces qui entraîne une dissipation d'énergie sous forme de chaleur. La figure 30 montre les endroits les plus sensibles aux frottements mécaniques, sources d'une perte d'énergie.



Figure 30 : Points de résistance mécanique

En mécanique, cette résistance est mesurée par l'efficacité mécanique du système de transmission. Cette efficacité dépend entre autres du nombre d'éléments impliqués, du niveau d'entretien des pièces, de leur type de matériaux et de leur ajustement mécanique. Théoriquement, cette efficacité peut atteindre 99 % dans des conditions idéales, mais il a été démontré par des mesures en laboratoire que l'efficacité mécanique maximale pour un vélo varie entre 91 % et 98 % (Réf. : 22).

Un vélo mal entretenu et de moindre qualité pourra avoir une perte d'efficacité mécanique allant jusqu'à 80 %. À vélo, cette perte est énorme, car elle devra être compensée par un apport additionnel de puissance musculaire afin de maintenir une même vitesse qu'un vélo ayant une perte bien moindre. Il est donc important de nettoyer, d'huiler et de graisser régulièrement toutes les pièces susceptibles de réduire l'efficacité mécanique du vélo.

La résistance gravitationnelle (R_g) : Elle représente la force exercée par le poids du cycliste et de son vélo étant donné le profil de la route empruntée. Elle est le produit de la masse du cycliste (m) par l'accélération gravitationnelle (g) et par la pente (p) et elle est exprimée en unités de newton. Cette résistance est nulle sur un terrain plat, puisque le poids ne peut ni faire avancer ni faire reculer le système cycliste-vélo. Sur une pente descendante, le poids va faire avancer le système cycliste-vélo dans le sens de la pente, alors que dans le cas d'une pente ascendante, le poids aura comme effet de faire reculer le vélo dans le sens contraire de la pente. Dans ce dernier cas, le poids du système constitue la principale résistance à vaincre.

Prenons le cas d'un cycliste qui pèse 80 kg, son vélo 10 kg, et qui traverse une route ayant trois profils différents. Une pente ascendante de 2 %, un plateau à 0 % et une pente descendante de -3 % (figure 31). Durant son ascension, le cycliste aura à vaincre une force de près de 18 newtons. Rendu au plateau, il ne fera face à aucune force de résistance due au profil de la route. Finalement, en amorçant sa descente, une force d'environ 27 newtons l'aidera à aller encore plus vite sans apport de puissance additionnelle de sa part.

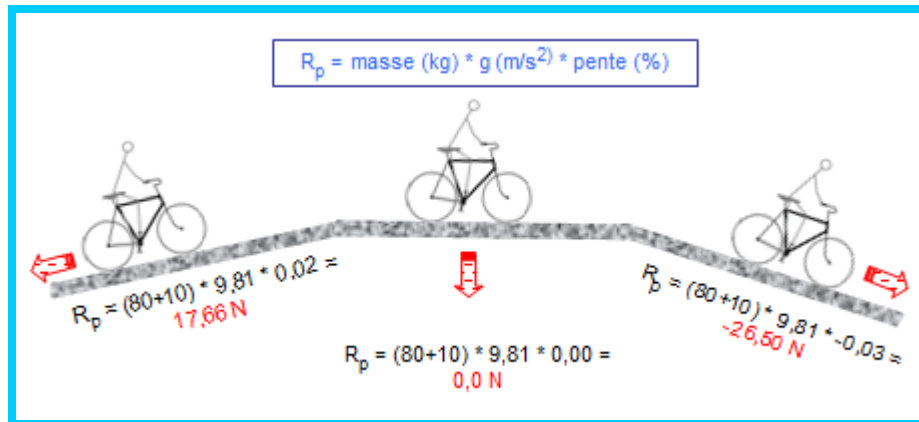


Figure 31 : L'impact de la combinaison poids et pente sur les forces à vaincre

Supposons que le cycliste se déplace sur la pente ascendante à une vitesse de 20 km/h, ou son équivalent de 5,56 m/s. Il lui faut générer une puissance supplémentaire de 98 watts, seulement pour transporter son propre poids et le poids du vélo le long de cette pente. La puissance est obtenue par le produit de la force et de la vitesse, soit, 17,66 newtons * 5,56 m/s.

La résistance frictionnelle (R_f) : Sur une chaussée nouvellement construite, le cycliste peut expérimenter une qualité de mouvement exceptionnelle. Plus la chaussée se dégrade, plus la qualité du mouvement se détériore. À l'extrême, rouler sur une chaussée en gravier ou en terre battue génère un inconfort important au cycliste. Le type et la qualité de la chaussée influencent directement le niveau de frottement du pneu avec la surface de la chaussée. Ce frottement est, en effet, une résistance au mouvement du vélo et génère une perte de puissance. En plus, la résistance à la chaussée dépend aussi de la pression de gonflage des pneus, des matériaux utilisés pour la fabrication des pneus, du poids du système cycliste-vélo et les précipitations (pluie ou neige). Le calcul de cette résistance est semblable à celui de la résistance mécanique :

$$R_f = \text{masse (kg)} * g \text{ (m/s}^2\text{)} * \text{coefficient de friction (\%)}$$

Le coefficient de frottement minimal se situe à 0,1 %, pour le cas de pneus de haute qualité bien gonflés et une surface de chaussée lisse comme, par exemple, une

piste de course en salle sur plancher de bois. Les valeurs maximales normales sont à 0,8 % pour des chaussées de qualité moyenne ou des pneus de qualité moyenne ou mal gonflés. Cette valeur n'est aucunement affectée par la vitesse du vélo ou la dénivellation de la chaussée. La valeur moyenne sur un réseau urbain asphalté de qualité acceptable est située entre 0,3 % et 0,4 % (Réf. : 23).

Si l'on reprend le cas du cycliste de l'exemple précédent, dont le poids combiné à celui de son vélo est de 90 kg. En supposant qu'il se déplace sur une piste cyclable, ayant un coefficient de frottement de 0,4 %, alors R_f sera égale à 3,5 newtons. En multipliant cette force par la vitesse de 5,56 m/s, on obtient la puissance perdue par cette résistance à la chaussée, soit 19 watts.

La résistance aérodynamique (R_a) : En avançant sur la route, les molécules d'air entrent en collision avec les parties frontales du corps du cycliste et de la structure du vélo. L'accumulation de ces molécules finit par former une force qui s'oppose à l'avancement du vélo. Or, l'énergie cinétique des molécules d'air est proportionnelle au carré de leur vitesse. C'est ainsi qu'un cycliste qui double sa vitesse verra la résistance aérodynamique à laquelle il fait face quadrupler. Donc, plus le cycliste roule vite, plus la résistance aérodynamique devient un frein important à son mouvement. Cette résistance s'exprime sous la forme :

$$R_a = \frac{1}{2} * \rho * C_x * A * V_a^2$$

ρ : est la densité de l'air. Elle est située à 1,23 kg/m³ au niveau de la mer ;

C_x : est le coefficient de pénétration dans l'air qui dépend de la physionomie du cycliste et de la forme de son vélo ;

A : est la surface frontale en m² du cycliste et de son vélo ;

V_a^2 : est la vitesse d'écoulement du vent sur le corps du cycliste, élevée au carré, elle équivaut à la différence entre la vitesse du cycliste et la vitesse du vent ($V-V_v$).

Si le vent est nul, alors V_a égale V . Si le vent est de face, alors V_a est égale à la somme de V et de V_v . Finalement si le vent est de dos, V_a est égale à la différence entre V et V_v .

Le cycliste a donc tout intérêt à réduire la résistance aérodynamique afin d'économiser ses énergies. Pour réduire cette résistance, le cycliste peut agir seulement sur les variables C_x et A .

Donc, un cycliste qui souhaite réduire cette résistance aura à minimiser la surface frontale de son corps (A) qui fait face au vent. Cette surface dépend de la taille et de la masse corporelle du cycliste, de la position du cycliste sur le vélo, de l'équipement utilisé, soit le casque, la forme du cadre et des roues, les accessoires ajoutés au vélo et les vêtements qu'il porte. En général, le cycliste de compétition adopte une position la plus basse possible sur son vélo. Sa poitrine est

pratiquement parallèle au sol et ses avant-bras sont accotés sur des allongeurs du guidon, formant un angle de 90 degrés aux coudes. Cette position correspond, pour un cycliste de 80 kg sur un vélo de course, à environ $0,36 \text{ m}^2$. Dans le cas d'un cycliste de ville, avec ses vêtements amples et sa position droite et un vélo plus massif, sa surface frontale pourra atteindre $0,65 \text{ m}^2$ et même plus, si par exemple le vélo est équipé d'un porte-bagage (Réf. : 24).

L'autre variable sur laquelle le cycliste peut agir et doit donc minimiser est ce qu'on peut appeler le coefficient de forme du système cycliste-vélo ou coefficient de traînée (C_x). Dans notre environnement terrestre, une goutte d'eau qui tombe, a la forme parfaite pour un rendement maximum de l'aérodynamisme d'un objet. Ceci explique le design du casque des cyclistes de compétition ayant une forme de goutte d'eau, arrondi au devant, long et profilé vers l'arrière. Une goutte d'eau a un coefficient de traînée de 0,04, comparativement par exemple à un avion qui a une valeur de 0,054. Les coureurs d'élite les plus remarquables par leur aérodynamisme atteignent des valeurs de (C_x) aux environs de 0,25 alors que pour le cycliste de ville, la valeur gravite autour de 0,8. Cette variable dépend de la vitesse de l'air et de la rugosité de la surface du corps en mouvement (Réf. : 25).

Pour les cyclistes élités, améliorer leur rendement aérodynamique est extrêmement important. Un petit gain de 2 % sur le coefficient de traînée (C_x) peut faire gagner au cycliste une demi-seconde à chaque kilomètre parcouru. Si le cycliste réussit aussi à réduire la surface frontale qui fait face au vent (A), le gain en vitesse équivaut à 0,13 m/s pour chaque $0,1 \text{ m}^2$ de réduction de cette surface. Ces gains, qui peuvent paraître mineurs, sont très importants pour les cyclistes lors des compétitions et sont source de motivation pour optimiser leur aérodynamisme. La figure 32 illustre de façon simplifiée, les deux variables déterminantes de la résistance aérodynamique, lorsque le cycliste est en mouvement. Plus la surface frontale est grande, plus la circulation du vent autour du corps du cycliste crée des zones de turbulences importantes.

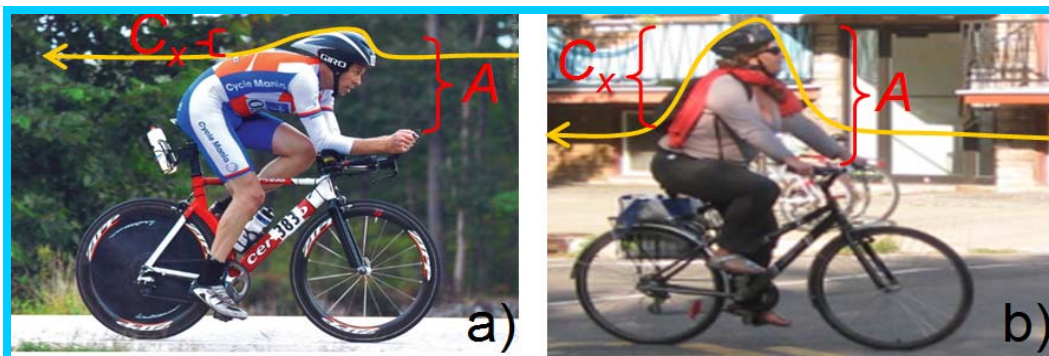


Figure 32 : La surface frontale (A) et le coefficient de traînée (C_x) pour un cycliste professionnel, *a*) et un cycliste de ville, *b*)

Prenons l'exemple d'un cycliste qui se déplace au niveau de la mer sur un terrain plat à 5,56 m/s ou 20 km/h et supposons qu'il fait face à un vent de 15 km/h ou 4,2 m/s. Ce cycliste est plutôt un cycliste du type b) sur la figure ci-haut. On évalue son coefficient de traînée (C_x) à 0,7 et la surface frontale (A) à 0,5 m². La résistance aérodynamique exprimée en unités de newton sera de :

$$R_A = \frac{1}{2} * 1,23 * 0,7 * 0,5 * (5,56 + 4,2)^2 = 20,5 \text{ N}$$

En multipliant cette force par la vitesse du cycliste, on obtient la puissance requise pour compenser le vent, soit 114 watts, comparativement à 36 watts, pour la même situation, mais sans aucun vent.

La résistance aérodynamique représente la part du lion des forces opposées à l'avancement du cycliste. La seule exception est quand le cycliste monte une pente de plus de 5 %, son poids et celui de son vélo forment, dans ce cas-ci, la résistance la plus dominante, bien sûr en présence de vents « normaux ».

La performance du cycliste est fonction, entre autres, de ces quatre résistances. Si l'on combine mathématiquement ces résistances dans une seule équation, on obtient la forme générale suivante qui calcule la puissance totale à générer par le cycliste pour vaincre l'ensemble des résistances, et ce pour une vitesse donnée :

$$\begin{aligned} \text{Puissance totale (w)} &= (1/R_m) * (R_g + R_f + R_a) * V \\ &= (1/R_m) * [m g * (p + f) + (\frac{1}{2} * \rho * C_x * A * V_a^2)] * V \end{aligned}$$

V : est la vitesse du cycliste;

M et g : sont respectivement la masse du système cycliste-vélo et la force gravitationnelle;

p : est la pente;

f : est le coefficient de friction;

ρ : est la pression de l'air;

C_x : est le coefficient de la traînée;

A : est la surface frontale du système cycliste-vélo; et

V_a^2 : est la vitesse d'écoulement du vent sur le corps du cycliste, soit $V - V_v$, où V_v est la vitesse du vent.

UN PEU DE CALCUL...

Un cycliste se déplace dans des conditions idéales sur une piste cyclable à une vitesse de 25 km/h ou 7 m/s. Le cycliste pèse 70 kg et son vélo 12 kg. Le cycliste dispose d'un équipement de qualité, lui permettant de minimiser les différentes résistances. Cette piste cyclable nouvellement asphaltée est sans pente, et le vent est pratiquement inexistant. Les valeurs des paramètres reflétant ces conditions ainsi que la puissance requise pour vaincre les résistances sont :

$$p = 0\% - f = 0,1\% - C_x = 0,6 - A = 0,45 - \rho = 1,23 - g = 9,81 - V_V = 0 - R_m = 97\%$$

$$P(w) = (1/97\%) * [82 * 9,81 * (0\% + 0,1\%) + (1/2 * 1,23 * 0,6 * 0,45 * 7^2)] * 7 = 65 \text{ watts}$$

La vitesse du cycliste, la vitesse du vent, la pente et l'aérodynamisme sont les variables ayant le plus d'impact sur la puissance requise:

Vitesse du cycliste de 7 à 14 m/s --> $P = 481 \text{ w}$, soit plus que 7 fois

Vitesse du vent de 0 à 5 m/s --> $P = 178 \text{ w}$, soit près de 3 fois

Pente de 0 à 2% --> $P = 180 \text{ w}$, soit près de 3 fois

$(C_x * A)$ de 0,27 à 0,54 --> $P = 124 \text{ w}$, soit près de 2 fois

Sachant que dans des conditions urbaines normales, la puissance générée par un cycliste moyen est de 150 watts sur un terrain plat et peut atteindre 250 watts en présence d'une pente de 2 à 4 %, l'effort requis pour compenser la résistance aérodynamique atteint régulièrement les 80 % et peut même dépasser les 90 % en présence d'un vent de face au-delà de 5 m/s. Pour l'exemple en haut, sur les 65 watts requis, 57 watts sont attribués à la résistance aérodynamique en absence du vent soit, 88 % de la puissance totale. Dans le cas où le vent aurait une vitesse de 5 m/s, ce sont 94 % des 178 watts de puissance totale requise qui sont attribués à la résistance aérodynamique.

2 La vitesse

La vitesse dépend des conditions physiques du cycliste, des caractéristiques du vélo et des conditions environnementales de conduite. Contrairement au véhicule motorisé, le cycliste ne dispose pas d'une puissance infinie qu'il peut utiliser à sa guise. Sa puissance, il la puise dans ses réserves énergétiques qui décroissent dans le temps. La vitesse résulte du transfert de la force musculaire vers le système de transmission du vélo, pour finalement produire un mouvement de la roue arrière.

Comme illustré sur la figure 33, la vitesse est intimement liée aux capacités cardiovasculaires et physiologiques du cycliste, à sa technique de pédalage et à la puissance mécanique produite par sa force. Aussi, la vitesse est influencée par l'ampleur des forces à vaincre, traitées plus haut.



Figure 33 : La chaîne logique de production de la vitesse

La vitesse est la distance parcourue par unité de temps. Il s'agit simplement de diviser la distance parcourue, exprimée en kilomètre ou en mètre, par le temps consacré pour franchir cette distance, exprimé en heure ou en seconde. Ce ratio a comme unité les km/h ou les m/s.

Souvent, quand on parle de vitesse de déplacement, on sous-entend la vitesse moyenne. Comme illustré sur le diagramme espace-temps de la figure 34, la vitesse moyenne pour un déplacement de 300 m durant 60 secondes correspond à 5 m/s ou 18 km/h. Durant le déplacement du cycliste, on peut aussi mesurer plusieurs valeurs de vitesse sur de courts laps de temps. Ces vitesses sont appelées vitesses instantanées et leurs valeurs reflètent la variation de l'accélération du cycliste dans le temps. Toujours, dans l'exemple de la figure 34, deux vitesses instantanées successives de valeurs différentes ont été calculées. Le fait que la vitesse instantanée passe de 5 à 6 m/s permet de conclure que le cycliste, durant cet intervalle de temps, a accéléré. La valeur de cette accélération correspond au ratio de la variation de la vitesse par rapport à la variation du temps (ou la longueur de l'intervalle du temps). L'accélération est toujours exprimée en m/s^2 et l'amplitude de l'accélération dans cet exemple est relativement faible, soit $0,2 m/s^2$.

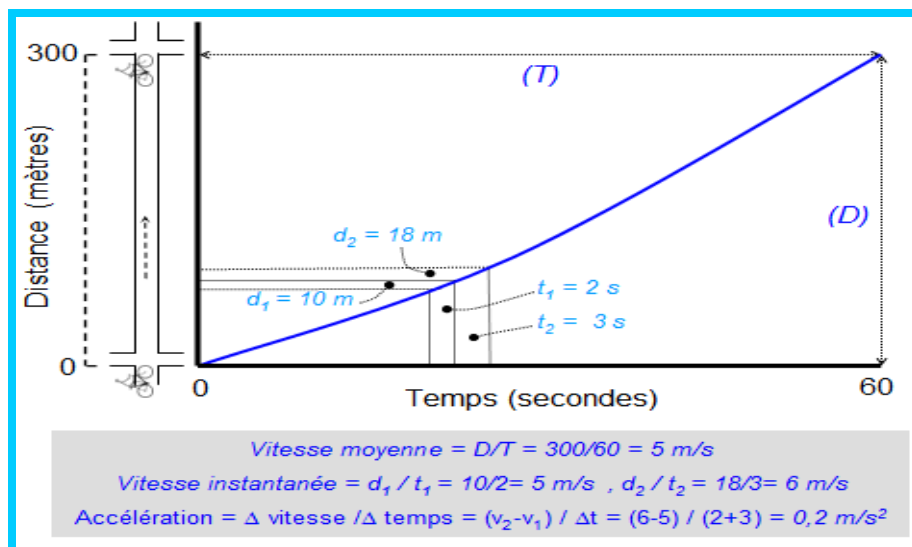


Figure 34 : Calcul de la vitesse et de l'accélération à partir du diagramme espace-temps

En cyclisme, la vitesse est intimement liée à deux notions, soit le développement et la cadence. Le développement est la distance parcourue pour chaque tour de pédale, quant à la cadence, c'est le nombre de rotations de la pédale par unité de temps. La vitesse est proportionnelle au produit du développement par la cadence de pédalage.

Notion de développement : Le développement correspond à la distance traversée par le vélo lors d'un tour complet de la pédale, et ce, indépendamment de la vitesse. Cette distance est le résultat, d'une part, de la combinaison de la taille du plateau et du pignon exprimée en nombre de dents, et d'autre part, du diamètre de la roue. Le développement est loin d'être standard et pour le même vélo, il varie selon la sélection par le cycliste du diamètre du plateau et du pignon, dont le but est d'obtenir une efficacité de pédalage optimale ou un meilleur confort biomécanique.

En actionnant son dérailleur, le cycliste peut ainsi faire varier le développement en choisissant le diamètre de son plateau et de son pignon. Par exemple avec un plateau de 48 dents, un pignon de 12 dents et une roue standard de 700C, le développement sera de 8,62 m. Le choix d'un développement long permet au cycliste d'aller vite, mais cela exige une force élevée. Par contre, avec un plateau de 36 dents et un pignon de 20 dents, la longueur du développement est de 3,88 m. Pour ce développement plus court, le cycliste fournit moins d'effort et la vitesse est moins élevée. Idéalement, les développements devront être choisis selon la topographie du parcours et de la présence du vent. Ainsi, en présence d'une pente ascendante ou quand les vents opposés sont importants, le développement devrait être court. Dans le cas d'une pente descendante avec un vent favorable, le développement devra être long.

Les cyclistes élités doivent disposer d'une gamme étendue de développement pour affronter les différentes conditions auxquelles ils font face. Généralement, le développement varie de 2 à 10 m. Pour un cycliste urbain, une gamme de développement allant de 3 à 5 m est suffisante quand le profil des parcours est relativement plat. Dans le cas où le profil serait vallonné, il est recommandé de disposer d'une gamme allant de 2 à 7 m.

Pour obtenir le développement souhaité, il faut choisir la bonne combinaison du plateau et du pignon, étant donnée la circonférence de la roue. Il faut donc connaître le nombre de dents du plateau et du pignon choisi. Le ratio entre le nombre de dents du plateau (N_1) et du nombre de dents du pignon (N_2) est appelé braquet. Comme illustré sur la figure 35, en multipliant ce braquet par la circonférence de la roue, on obtient le développement exprimé en mètres.

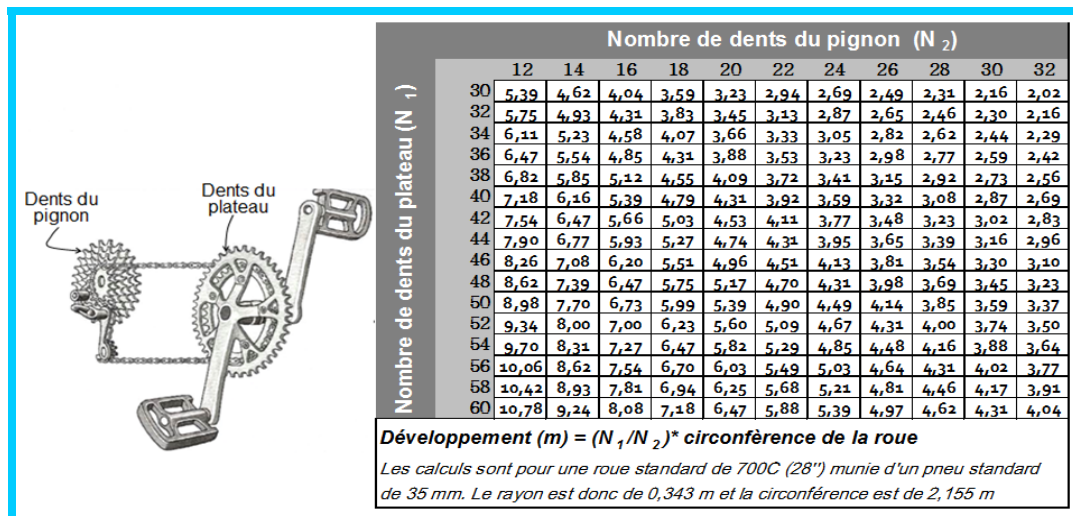


Figure 35 : Développements obtenus pour différentes grandeurs du plateau et du pignon (braquet), pour un vélo standard

Notion de cadence : La cadence est exprimée en nombre de tours de la pédale par minute (*TPM* ou *RPM* en anglais). En général, les cyclistes tentent de maintenir le plus longtemps possible la même cadence en sélectionnant le braquet qui leur permet de maintenir cette cadence, car cela apporte la plus grande efficacité en cyclisme. On distingue trois niveaux de cadence :

- Une cadence basse, située entre 50 et 60 TPM où les muscles sont sollicités et un travail de force est requis, mais le système cardiorespiratoire l'est moins. Cette cadence peut s'avérer utile pour un cycliste peu en forme, mais qui se déplace sur de courtes distances.
- Une cadence moyenne, située entre 60 et 80 TPM, une cadence adoptée par la plupart des cyclistes utilitaires, mais aussi par des cyclistes de haut niveau quand ils font face à un parcours difficile (pente ou vent).
- Une cadence élevée, située entre 80 et 100 TPM. Cette cadence permet d'obtenir des vitesses élevées tout en économisant les dépenses énergétiques. Maintenir cette cadence nécessite bien sûr des niveaux d'entraînement élevés. On comprend que cette cadence est pour les cyclistes bien entraînés et en bonne forme physique.

La cadence qui donne la meilleure vitesse pour le même coût énergétique est comprise entre 85 et 105 TPM. Plus précisément, une cadence de 90 TPM est considérée comme la cadence optimale, car l'inertie importante des roues en rotation entretient la cadence de pédalage. Cela permet aussi de passer plus rapidement et plus aisément les points morts haut et bas. Si le cycliste passe ces points avec plus d'inertie, le coup de pédale est beaucoup plus fluide et beaucoup

plus efficace. Cependant, cette cadence est plutôt à la portée des cyclistes élités (Réf. : 26).

En cyclisme, la puissance développée détermine la performance. Celle-ci résulte du produit de la force par la vitesse. Cette relation est souvent mal comprise, et amène les cyclistes à sélectionner un braquet élevé, croyant que le fait de forcer sur les pédales est synonyme de performance et donc une puissance plus élevée. Cependant, un cycliste choisissant un braquet élevé avec une cadence de pédalage faible peut être moins puissant qu'un autre qui choisit un braquet moins élevé avec une cadence de pédalage élevée.

Comme on l'a vu précédemment, la réserve de la force est limitée et donc la marge de progression du cycliste, qui privilégie la force à la fréquence de pédalage est aussi limitée. Plus le rythme de pédalage est élevé, moins les muscles travaillent en vigueur et moins ils se chargent de résidus lactiques, source de la fatigue. L'augmentation de la fréquence de pédalage n'est pas aisée, elle s'améliore avec la pratique et un bon entraînement.

Le tableau 2 montre l'impact de la fréquence de pédalage sur la force requise à appliquer, exprimée en kg, et ce pour une puissance donnée, exprimée en watt. On voit bien qu'on peut économiser beaucoup d'énergie en tournant plus vite la pédale.

Tableau 2 : Force en kg à appliquer sur la pédale

Puissance (watt)	60 TPM	80 TPM	100 TPM
100	9,5	7,2	5,7
200	19,1	14,3	11,5
300	28,6	21,5	17,2

Les deux notions traitées plus haut permettent de calculer la vitesse du cycliste selon le braquet choisi et sa fréquence de pédalage. La vitesse s'obtient par la relation suivante :

$$\text{Vitesse} = \text{cadence} * \text{développement}$$

$$\text{Vitesse (km/h)} = \frac{\text{Cadences (TPM)} * \frac{N_1}{N_2} * \text{Circonférence (m)} * 60}{1000}$$

Ainsi, pour une cadence de 65 TPM, un braquet de 44/18 et une circonférence de la roue de 2,155 m, la vitesse calculée est de 20,6 km/h ou 5,7 m/s.

La technique de pédalage : cet élément est aussi déterminant dans la recherche de la performance parfaite par les cyclistes. En regardant les cyclistes, on a l'impression que tous pédalent de la même façon. Or, en réalité, chaque cycliste possède sa propre technique de pédalage, mais on peut les regrouper dans deux catégories différentes. Ceux qui privilégient la cadence rapide et ceux, qui privilégient la force brute. À l'intérieur de ces deux catégories, chaque cycliste a sa propre technique de pédalage, mais tous sont à la recherche de la meilleure technique en fonction de l'environnement dans lequel ils se déplacent.

Il n'existe pas une technique parfaite. Si le cycliste moyen se fie simplement à son confort de pédalage, il en est autrement pour le cycliste compétitif qui a pour objectif de développer la plus grande puissance possible. Ceci lui permet de créer une énergie mécanique importante et donc d'atteindre de grandes vitesses de déplacement, même si cela se fait partiellement au détriment de son confort.

La clé du succès réside dans l'entraînement qui permet pour chaque cycliste d'optimiser sa technique de pédalage et d'augmenter sa puissance. Pour être puissant, le cycliste devra trouver le meilleur compromis entre la force qu'il développe et la fréquence de pédalage. La force a un caractère physiologique, elle s'entretient et s'améliore par l'entraînement. La fréquence de pédalage, bien qu'elle soit également liée à la physiologie du cycliste, elle a plutôt un caractère maîtrisable, c'est-à-dire qu'elle fait partie de la technique développée par le cycliste.

Les spécialistes (*Réf. : 27*) s'entendent sur le fait que le paramètre qui détermine la qualité du pédalage d'un cycliste est sa capacité à enchaîner de manière idéale les actions d'extension et de fléchissement des membres inférieurs, durant les quatre phases du cycle de pédalage. Le cycliste ne doit pas penser seulement à la phase motrice principale, mais donner autant d'importance à la phase motrice secondaire. Le cycliste devra appuyer sur la pédale lors de l'extension de la jambe, puis il devra relever son talon afin de tirer sur la pédale lors de la flexion de la jambe. On appelle cela le pédalage enroulé, il consiste donc à s'appliquer sur les 360° du cycle de pédalage et non pas seulement sur les 180° de la partie du cycle la plus productive. De cette manière, le cycliste pourra équilibrer la répartition de la force le long du cycle de pédalage et limitera l'importance des phases passives, soit les points morts haut et bas.

③ Le freinage

En milieu urbain, le cycliste a recourt fréquemment à ses freins pour réduire sa vitesse ou s'immobiliser. Pour assurer la sécurité du cycliste, les freins doivent donc permettre d'arrêter le vélo dans n'importe quelle situation et être fiables et durables.

Les freins fonctionnent selon un principe de base de la physique : la friction. En appuyant sur le levier du frein, le mécanisme serre les éléments de freinage frottant les uns contre les autres. Ce contact entre les deux surfaces convertit l'énergie cinétique, soit le mouvement, en chaleur qui a pour effet de ralentir le vélo.

Type de freins

Il existe différents mécanismes pour freiner le vélo.





- **Le frein à mâchoires** ou à jante est le frein le plus utilisé, à cause de sa simplicité, de son efficacité et de son prix. Les freins à mâchoires s'actionnent en appuyant sur un levier, situé aux poignées du guidon. Le levier met en mouvement grâce à un câble, des patins qui frottent sur la jante de la roue pour ralentir la rotation.
- **Le frein à disque** se compose d'un disque en métal attaché au moyeu, il suit les mouvements de la roue. Lorsque les freins sont actionnés, des étriers frottent le disque et ralentissent ainsi le roulement.
- **Les freins à tambour** se présentent sous la forme d'un tambour circulaire, installé sur le moyeu. Dans ce tambour se trouvent deux patins de freinage. Souvent, le frein à tambour sert plus comme des freins de ralentissement permettant de ralentir le vélo sans toutefois l'arrêter.
- **Les freins à rétropédalage** sont installés sur la roue arrière uniquement. Lorsque le cycliste rétropédale, durant plus d'un quart de tour, les freins sont actionnés et le vélo s'arrête. Il faut donc pédaler à l'envers pour arrêter le vélo.

En général, pour actionner les freins, il faut presser deux leviers situés aux poignées du guidon. Selon les vélos, les leviers peuvent avoir un fonctionnement :

- **mécanique** : en tirant sur un câble qui actionne les freins,
- **hydraulique** : en poussant un liquide à travers des tuyaux jusqu'aux freins.

Actuellement, le système le plus performant reste incontestablement le frein à disque hydraulique. Il séduit un grand nombre d'utilisateurs par sa puissance, son efficacité et sa finesse de freinage. Ses performances ne sont pas affectées par une jante sale ou mouillée. Ils sont durables, demandent très peu d'entretien, mais restent relativement chers à l'achat.

Tableau 3 : Comparaison de différents types de frein

Types de frein	Avantages	Inconvénients
<p>Freins à mâchoires</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Fiables, légers, faciles à manier • Bon marché • Démontage facile 	<ul style="list-style-type: none"> • Usure rapide, entretien régulier nécessaire • Se salissent facilement • Émettent un bruit dérangeant
<p>Freins à disque</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Fiables • Résistent à l'eau et à la saleté 	<ul style="list-style-type: none"> • Plus lourds et plus onéreux • Compatibilité nécessaire avec le frein, la roue, les rayons et le moyeu • Porte-bagage incompatible
<p>Freins à tambour</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Efficacité moyenne • Résistent à l'eau et à la saleté • Entretien plus rare 	<ul style="list-style-type: none"> • Moins fiables • Lourd • Entretien compliqué
<p>Freins à rétropédalage</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Efficacité moyenne • Protégés de la pluie et de la saleté 	<ul style="list-style-type: none"> • Risques de dérapage • Double système requis • Entretien et réparations longs

Utilisation des freins

Durant le freinage, il est important de doser entre l'usage des freins avant et arrière. L'objectif d'actionner les freins est d'arrêter le plus rapidement, mais tout en restant en contrôle du vélo. À cause de l'inertie du mouvement, le corps a tendance à continuer vers l'avant lorsque les freins sont actionnés. Il en résulte que le poids du cycliste se déplace vers la roue avant. Un usage excessif des freins avant peut accentuer la projection du corps vers l'avant et provoquer une chute, d'où l'importance de doser l'usage des deux freins pour obtenir la capacité maximale du freinage. Néanmoins, il faut privilégier le frein avant. On avance souvent la répartition de 70 % de puissance sur le frein avant et 30 % sur le frein arrière. Tout ceci s'explique par le transfert de la masse. En cas de freinage, le poids du système cycliste-vélo est transféré sur l'avant du vélo. La roue avant est ainsi plus chargée, le pneu avant s'écrase un peu plus, offrant plus de surface de frottement. Il est ainsi apte d'encaisser une forte puissance de freinage. Finalement, il ne faut pas oublier que le freinage est une technique qui s'apprend.

Lorsque le cycliste circule sur un terrain plat, avec présence d'autres cyclistes, il ne faut pas freiner inutilement, le freinage doit se faire en douceur et éviter les coups de frein brusques. Le cycliste doit aussi signaler aux cyclistes qui le suivent son intention de s'arrêter.

Lors d'une descente, il est important de laisser plus d'espace avec le cycliste qui précède. La position sur le vélo est très importante, tout d'abord les deux pieds doivent être à la même hauteur et le poids également réparti sur chaque pédale, il faut aussi prendre une position surbaissée pour abaisser le centre de gravité le plus possible. En descente assez longue, il est important de bien stabiliser le vélo en serrant la barre horizontale du vélo entre les genoux surtout par grande vitesse, pour l'empêcher de vibrer. Le freinage se fait sur les deux roues en alternance, jamais brusquement, cette technique permet d'éviter la surchauffe des freins. Il faut toujours contrôler sa vitesse dès le début, ne jamais attendre que la vitesse soit trop grande.

Des fois, il peut arriver des situations nécessitant un freinage d'urgence. Dans ce cas, les deux mains doivent tenir solidement les poignées du guidon. Le freinage d'urgence est un freinage brusque, l'inertie du poids du corps qui est en mouvement fait qu'il continue vers l'avant. La force des deux mains est nécessaire pour l'empêcher de s'éjecter vers l'avant. En plus d'avoir les deux mains sur le guidon, si le freinage doit être très brusque, il peut être nécessaire que le cycliste recule son bassin sur le vélo au point de ne plus être assis sur la selle, mais qu'il serre simplement la selle entre ses cuisses.

Idéalement, dans une courbe, le freinage se termine avant de commencer à virer. Cependant, si le freinage est amorcé dans la courbe, le vélo aura tendance à continuer tout droit, il est donc important d'y aller doucement. Si seulement le frein arrière est actionné, le vélo aura tendance à survirer, si seulement le frein avant est actionné, le vélo aura tendance à sous-virer. Il est donc important de bien doser le freinage des deux roues. Pour éviter le dérapage facile de la roue arrière, il est préférable de freiner un peu plus de la roue avant. Ce faisant, le poids est transféré vers la roue avant et libère la roue arrière qui a tendance à déraper plus facilement que la roue avant. Le cycliste peut aussi pencher son buste d'un côté de la courbe pour améliorer l'équilibre du vélo.

Sur une chaussée mouillée, l'efficacité du freinage est réduite considérablement. Il vaut mieux freiner avec la roue avant avec un léger usage des freins arrière. Lors du freinage, il y a plus de poids sur la roue avant que sur la roue arrière, ce qui fait qu'elle glissera moins facilement que la roue arrière. Il est aussi recommandé de réduire légèrement la pression des pneus pour augmenter l'adhérence. Dans tous les cas, il faut éviter de freiner brusquement, car ce sera inévitablement la chute.

Sur une chaussée enneigée, contrairement au vélo d'été, le freinage se fait majoritairement avec le frein arrière et légèrement avec celui de l'avant par petits

coups. Il est utile de se positionner le plus en arrière de la selle pour un transfert du poids afin de maximiser la traction. Vu la possibilité de présence de la glace par endroit, il est recommandé de chauffer le vélo par des pneus cloutés qui offrent une meilleure adhérence à la chaussée glissante. Leurs poids constituent une source de ralentissement, mais offrent une meilleure sécurité. Le mécanisme de freinage peut aussi être affecté par le gel lors des grands écarts de température, il faut donc l'entretenir régulièrement.

En plus de doser l'usage entre les freins avant et arrière, l'anticipation est un facteur important pour un freinage sécuritaire. L'anticipation fait partie des qualités nécessaires pour pratiquer le vélo. Mais plus que jamais, elle est primordiale en cas de pluie et de neige afin d'éviter les dangers et pouvoir freiner correctement malgré une distance d'arrêt rallongée. Naturellement, l'effet-surprise amène une réaction brusque et un usage excessif des freins. Il en résulte un blocage des roues sur une chaussée peu adhérente et inévitablement la chute. Aussi, comme dans la conduite d'un véhicule motorisé, il est nécessaire de laisser une distance sécuritaire entre le cycliste et le véhicule qui le précède pour faire face à toute situation d'urgence.

Distance de freinage

Il s'agit de la distance que le vélo parcourt entre le moment où le cycliste détecte un danger et le moment où le vélo est immobilisé. Cette distance est la somme de deux composantes, la distance de perception-réaction et la distance de réponse mécanique des freins.

- La distance de perception-réaction (D_1) est la distance parcourue pendant le temps écoulé, entre le moment où le cycliste détecte une situation nécessitant un freinage et le moment où il commence effectivement à freiner. Ce temps varie d'un individu à l'autre et dépend de facteurs tels que l'âge, le niveau d'alerte et la fatigue. Généralement, un cycliste alerte aura un temps de réaction d'environ 1 seconde et ce temps peut atteindre des valeurs de 3 secondes chez les personnes âgées ou les personnes ayant des facultés affaiblies. Pour des fins de calcul, on retient la valeur de 1,4 seconde, soit une moyenne souvent utilisée dans le domaine de conception des routes.
- La distance de réponse mécanique des freins (D_2) est la distance parcourue par le vélo entre le moment où le cycliste actionne ses freins et le moment où le vélo est complètement immobilisé. Elle est influencée par la vitesse du vélo, le poids du cycliste et de son vélo, du niveau d'adhérence de la chaussée, de la qualité des pneus et de la force et l'efficacité des freins.

La première composante est égale au temps de réaction (s) multiplié par la vitesse (km/h) :

$$D_1 = T * \frac{V}{3,6}$$

Quant à la deuxième composante, elle est relativement complexe à calculer, car les facteurs d'influence mentionnés en haut, sont difficiles à déterminer et varient d'un environnement à un autre et d'un cycliste à un autre. L'équation classique de calcul de la distance de freinage, qui synthétise l'ensemble de ces facteurs est :

$$D_2 = \frac{V^2}{254 * (f \pm g)}$$

Où : T est le temps de réaction (s)
 V est la vitesse (km/h)
 f est le coefficient de frottement
 g est la pente (%)

La vitesse est le paramètre le plus influent dans cette équation. L'énergie cinétique déployée par la vitesse suit une fonction carrée. Ainsi, si l'on double la vitesse, la distance de freinage se trouve quadruplée.

Le frottement, ou l'adhérence, est défini par la résistance mécanique au glissement relatif entre deux solides en contact, dans ce cas-ci entre le pneu et la chaussée. Les facteurs qui influencent ce paramètre sont la qualité des pneus, la qualité et le type de la chaussée, la pression d'air dans les pneus et les conditions climatiques.

Pour simplifier l'estimation de ce paramètre, une valeur de 0,25 est retenue pour le coefficient de frottement sur une chaussée sèche. Cette valeur tient compte d'une qualité moyenne des freins, et du manque d'expérience des cyclistes lorsqu'ils font face à une situation d'urgence (Réf. : 28). Cette valeur signifie que le maximum de la force de freinage est de 0,25 de la force que le système cycliste-vélo exerce sur le sol. Sur un terrain plat, cette force exprimée en newtons (N) est égale au poids du système cycliste-vélo multiplié par la gravité (9,81 m/s²). Puisque la force maximum du freinage dépend du poids du système, mais qu'en même temps, elle agit contre ce même poids, le poids est alors annulé dans l'équation. Donc, selon ces hypothèses, la force maximum du freinage dans des conditions normales est égale à 2,5 m/s², soit 0,25 * 9,81.

Sur chaussée mouillée, le coefficient de friction peut chuter d'environ 20 à 25 % selon l'intensité de la pluie. L'eau devient une sorte de pellicule entre la chaussée et le pneu et réduit ainsi l'adhésion des pneumatiques. En présence d'une chaussée enneigée ou glacée, l'impact sur l'adhérence des pneus est encore plus accentué. Une réduction de la valeur du coefficient de friction allant de 70 à 80 % est typique. Donc, pour une chaussée mouillée, une valeur de 0,20 à 0,18 est à

considérer, alors que pour une chaussée enneigée ou glacée, une valeur de 0,08 à 0,05 est à considérer pour calculer les distances de freinage.

Ainsi, la distance de freinage dans le cas d'un cycliste qui roule à 20 km/h (ou 5,56 m/s), sur un terrain plat et sur chaussée sèche, sera :

$$D = D_1 + D_2 = \left(\frac{20}{3,6} * 1,4 \right) + \frac{20^2}{254 * (0,25 \pm 0)} = 7,8 + 6,3 = 14,1m$$

Le même cycliste roulant pendant une averse aura une distance de freinage de :

$$D = \left(\frac{20}{3,6} * 1,4 \right) + \frac{20^2}{254 * (0,20 \pm 0)} = 7,8 + 7,9 = 15,7m$$

Et si la chaussée était enneigée ou glacée, il s'immobiliserait après avoir parcouru :

$$D = \left(\frac{20}{3,6} * 1,4 \right) + \frac{20^2}{254 * (0,08 \pm 0)} = 7,8 + 19,7 = 27,5m$$

La figure 36-a montre les distances de freinage sur une chaussée sèche, calculées selon les équations précédentes, pour des pentes de 0 %, -3 % et -6 %. Quant à la figure 36-b, elle montre les distances de freinage pour une chaussée sèche, mouillée et glacée sans présence de pente. Pour les six cas, la distance de perception-réaction (D_i) est identique et elle est calculée pour un temps de réaction de 1,4 seconde.

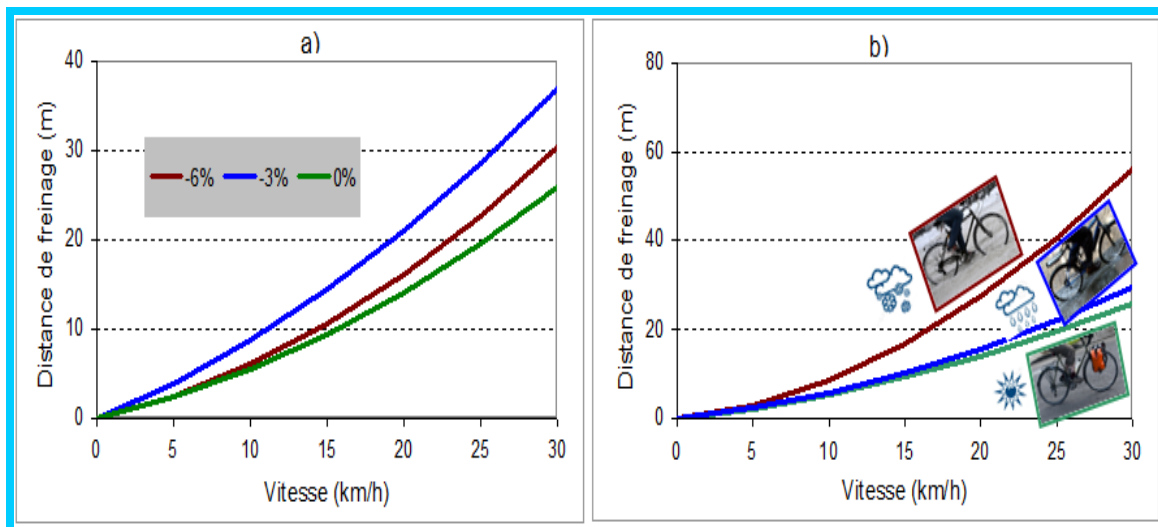


Figure 36 : La distance de freinage en fonction de la pente et des conditions climatiques

Le vélo permet non seulement de se déplacer rapidement, de façon écologique et économique, mais il représente aussi une véritable opportunité d'améliorer la santé. Son principal avantage, comme tous les sports d'endurance, est de renforcer le muscle cardiaque et donc d'améliorer la résistance à l'effort. La pratique régulière de vélo diminuait significativement le risque de maladies cardiovasculaires, première cause de mortalité dans les pays industrialisés. Elle présente aussi un impact positif sur les risques de diabète, d'obésité, d'hypertension et d'ostéoporose.



Figure 37 : Le choix est entre vos mains ! (Réf. : 29)

Accessible à la grande majorité de la population, la pratique du vélo présente très peu de contre-indications, sauf d'éventuels problèmes d'articulations, de dos et des complications d'ordres cardiaques et pulmonaires. Un chercheur britannique a démontré que les années de vie gagnées par une pratique assidue du vélo dépassent de 20 fois les pertes des années de vie dues principalement aux accidents. Le chercheur conclut que la pratique régulière du vélo permet d'augmenter en moyenne l'espérance de vie de deux ans et demi (Réf. : 30). Le consortium européen *Transportation, Air pollution and Physical Activities* (TAPAS) abonde dans le même sens en confirmant dans une étude sur le lien entre transport actif et santé, que les bénéfices d'un mode de déplacement actif en ville sont supérieurs aux risques qui lui sont liés (Réf. : 31).

Une étude française qui tient aussi compte des accidents et de la pollution subie par les cyclistes a démontré qu'en matière de mortalité, les bénéfices d'une augmentation de la pratique du vélo en Île-de-France sont de 19 à 27 fois plus élevés que les risques. Il est à noter que plus la part modale du vélo est élevée, plus les bénéfices l'emportent sur les risques (Réf. : 32).

Dans ce chapitre, nous traiterons brièvement des bénéfices du cyclisme sur la santé, mais également des quatre principaux inconvénients à la santé que sont les accidents, les vibrations, la pollution et le stress.

FACTEURS INFLUENÇANT L'USAGE DU VÉLO

Le vélo est alimenté par la puissance musculaire, il est instable, ne possède aucune protection pour le corps, n'a généralement pas de suspension et le cycliste est exposé directement aux intempéries. Ces caractéristiques physiques sont très importantes dans l'opinion d'utilisateurs potentiels du vélo. Le cyclisme est caractérisé par des facteurs externes qui ont un impact direct soit sur l'effort, soit sur le confort.

Impacts sur l'effort : Le profil de la chaussée et sa rugosité, la pente, le nombre d'arrêt-départ le long du parcours et la vitesse du vent.

Impacts sur le confort : La proximité au trafic motorisé, au bruit et à la pollution, les conditions météorologiques et le sentiment d'insécurité.

Parmi ces facteurs, ceux touchant à la santé sont prépondérants. Il est important de comprendre leurs portées, ainsi que leur influence sur le processus de prise de décision des utilisateurs potentiels du vélo. Ayant tous ces facteurs en tête, la réglementation, la planification et la conception d'un système de transport par vélo pourront en influencer certains et ainsi accroître la part modale du vélo.

① Les bénéfices pour la santé

Les bienfaits de la pratique du vélo pour la santé sont considérables, y compris celui de brûler les calories indésirables et de renforcer et de tonifier les muscles. En outre, le vélo est un sport sans heurts ; par conséquent, il ménage les articulations, sauf, bien sûr, si la chaussée est en mauvais état ou s'il s'agit de la pratique du vélo cross. Comme l'intensité de l'exercice varie en fonction du terrain et du vent, c'est aussi un bon moyen de renforcer le système cardiovasculaire.

Il n'y a pas que le corps qui en bénéficie, le moral aussi. Selon les résultats d'une étude publiée en 2008 dans le *British Journal of Sports Medicine*, il a été confirmé que les participants souffrant de troubles de l'anxiété et de dépression qui faisaient 20 minutes de vélo par jour se disaient moins anxieux tandis que ceux qui en faisaient de manière plus intense rapportaient un plus grand bien-être.

La capacité cardiovasculaire : Pédaler régulièrement à un rythme modéré permet de faire travailler le cœur dans de bonnes conditions. Ce dernier gagne ainsi en contractilité et pourrait travailler plus longtemps sans défaillance. Ce développement de l'endurance cardiaque entraîne une récupération plus rapide et

une réduction sensible des risques cardiovasculaires. D'après une étude publiée par le *British Medical Journal* en 2011, une demi-heure de vélo par jour permet de diminuer par deux ce risque. Il est toutefois important de rouler à son rythme et selon les conseils du médecin traitant. Le cycliste ne doit pas être essoufflé quand il pédale à tel point que son rythme cardiaque monte trop rapidement, sauf bien évidemment lors d'une montée longue et difficile, nécessitant un effort intense.

Les capacités respiratoires : Pratiqué de façon régulière, le cyclisme amène à une amélioration du volume pulmonaire et par conséquent à une amplification des capacités respiratoires. La respiration devient plus profonde, plus efficace et la résistance à l'effort augmente, conduisant à une évolution progressive des performances.

La circulation sanguine : Le cyclisme est vivement conseillé aux personnes souffrant de problèmes circulatoires, le renforcement de l'endurance cardiaque engendre une meilleure oxygénation et irrigation des muscles et des organes, notamment au niveau des jambes. L'activité physique permet par ailleurs de brûler les mauvaises graisses et favorise l'entrée du glucose dans les cellules. Globalement, il en résulte une baisse significative du taux de cholestérol, ainsi qu'une diminution de la tension artérielle et de la glycémie.

La perte de poids : Le cyclisme est une discipline tout particulièrement recommandée aux personnes ayant un surpoids. En plus de faciliter et d'améliorer la digestion grâce à un massage très énergique des intestins, il permet de faire du sport sans l'inconvénient majeur de ressentir ses kilos en trop. Les personnes en surcharge pondérale pratiqueront ainsi plus volontiers le vélo que la marche, tout comme les personnes âgées au métabolisme fragile et à la recherche d'une activité physique peu traumatisante pour le corps.

La structure musculaire : Le vélo fait des merveilles pour les muscles du bas du corps, soit les quadriceps, les ischio-jambiers et les fessiers. Les muscles se tonifient sans gagner en volume. De plus, l'effort requis pour garder l'équilibre contribue à renforcer les muscles du tronc. Globalement, le cyclisme permet de parfaire les muscles.

La densité osseuse : Comme tout exercice physique régulier, faire du vélo est également bénéfique pour le maintien osseux. Avec une pratique régulière, la formation osseuse est stimulée et solidifiée, permettant de prévenir les risques d'ostéoporose. De plus, les muscles et les ligaments deviennent plus souples et plus puissants. Les conclusions d'un article publié dans le *British Medical Journal* en 2011, affirment que la réduction du potentiel physique chez un cycliste moyen est inférieure à 5 % par décennie après l'âge de 30 ans, alors qu'elle est supérieure à 10 % pour une personne sédentaire.

La relaxation : Rouler en vélo permet aussi de diminuer la tension nerveuse et l'anxiété, à l'origine du stress. L'activité physique entraîne en effet la production

d'endorphines, des substances produites par des cellules du cerveau et ayant des propriétés calmantes. Ces substances procurent une sensation de détente psychique et de bien-être et diminuent la perception de la douleur. Enfin, le vélo constitue un excellent somnifère quand il est pratiqué sans excès. Une randonnée adaptée aux capacités du cycliste laisse une sensation de fatigue physique très agréable, facilitant un sommeil réparateur.

Ainsi, une activité physique modérée comme le vélo possède des effets bénéfiques. Ces effets bénéfiques peuvent être obtenus par le biais d'autres activités physiques modérées, mais le vélo présente un moyen de les atteindre rapidement, facilement et efficacement.

② Les inconvénients pour la santé

En contrepartie des bénéfices énoncés ci-haut, quatre inconvénients peuvent décourager l'usage du vélo. Ces inconvénients sont les risques d'accident et la vulnérabilité du cycliste, les vibrations transmises au corps vu une mauvaise qualité de chaussée, l'inhalation des émissions polluantes par le cycliste lorsqu'il circule dans le trafic et finalement, le niveau du stress lorsque la dangerosité de l'environnement de conduite augmente.

Les accidents impliquant les cyclistes

L'erreur humaine, par absence de précaution, distraction ou non-respect des règles du Code de la route, est la première cause des accidents de la route en général. Les conducteurs de véhicules qui ouvrent leur portière sans vérifier la présence d'un cycliste, les cyclistes qui ne respectent pas la signalisation d'arrêt ou les conducteurs qui font un changement de voie sans le signaler sont des exemples de comportements téméraires.

Au Québec, pour la période allant de 2003 à 2015, les accidents impliquant les cyclistes ont totalisé 204 décès, 1 669 blessés graves et 26 251 blessés légers. Les routes font en moyenne près de 16 décès chez les cyclistes annuellement, comparativement à 70 décès chez les piétons et 440 décès chez les occupants des véhicules motorisés.

Sur la figure 38, on constate que les accidents des véhicules motorisés représentent 84 % des décès, comparativement à 13 % pour les piétons et 3 % pour les cyclistes durant la période 2003-2015 (Réf. : 33).

On peut aussi remarquer que la baisse de la mortalité en 2015 par rapport à la moyenne de la période 2003-2014 a été de 33 % pour l'ensemble des usagers de la route, cependant, la baisse de la mortalité chez les cyclistes (-45 %) et chez les piétons (-39 %) est plus importante que celle observée chez les occupants des

véhicules motorisés (-32 %). Toutefois, on peut penser qu'il y a certainement place pour améliorer le bilan, particulièrement celui des usagers les plus vulnérables.

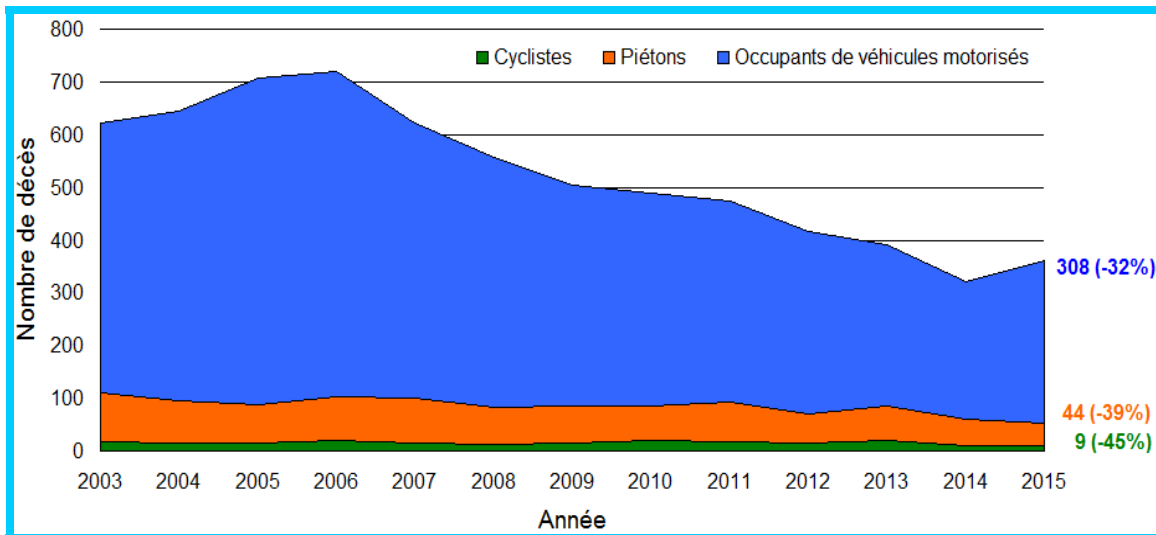


Figure 38 : Les décès sur les routes de Québec selon les modes de déplacement, de 2003 à 2015

En reportant des statistiques de décès sur la taille d'une population donnée, on peut comparer des régions ou des pays différents. Ainsi, selon les données européennes (26 pays) pour la période 2001-2013, il y a eu 4,2 cyclistes décédés par année par million de résidents. Durant la même période, au Québec, on a recensé 2,10 cyclistes décédés par année et par million de résidents.

Il est clair que cette statistique ne donne pas la meilleure appréciation du risque associé à l'utilisation du vélo comme moyen de transport ou de loisir. En Europe, le vélo est beaucoup plus utilisé qu'au Québec, les cyclistes québécois sont donc moins exposés au risque comparativement aux cyclistes européens. Une statistique basée sur la distance parcourue par les cyclistes estime mieux l'exposition réelle au risque et elle est plus appropriée pour évaluer les performances en sécurité des cyclistes entre régions et entre pays. Actuellement, peu de pays disposent de statistiques fiables sur les distances parcourues par les cyclistes. Une fois que des statistiques fiables seront disponibles, il sera plus aisé de qualifier la sécurité des cyclistes et de réaliser des études comparatives plus approfondies qui permettront de fixer des cibles réalistes et de déployer les moyens pour les atteindre.

Selon la Société d'assurance automobile du Québec (SAAQ), la vaste majorité des accidents (85 %) impliquant un cycliste se produisent en milieu résidentiel ou commercial, principalement dans des zones de 50 km/h ou moins. Les accidents en carrefour sont plus fréquents et représentent plus de 60 % de l'ensemble des accidents. Ces accidents en carrefour sont plus variés et les cyclistes en paient souvent le grand prix. Entre les carrefours, les accidents se produisent

principalement sur des artères achalandées et sont principalement le résultat d'un contact avec une portière de véhicule ouverte subitement ou d'une collision avec des véhicules durant la manœuvre de stationnement.

L'inattention du conducteur ou du cycliste représente la première cause des accidents. La phrase souvent dite lors d'accidents « *Je ne l'ai pas vu* » cache en fait deux éléments. D'abord la visibilité défaillante, particulièrement aux intersections, et le facteur-surprise, du fait que les conducteurs des véhicules motorisés ne s'attendent pas à voir surgir un cycliste dans leur trajectoire ou simplement ne pensent pas à cet usager de la route.

Étonnamment, la moitié des accidents de vélo sont des chutes subies par le cycliste alors qu'il roulait seul et souvent à une vitesse raisonnable. C'est la conséquence directe de l'instabilité du vélo qui a seulement deux points d'appui sur le sol. Les accidents impliquant un véhicule à moteur représentent le sixième des accidents recensés, un autre sixième résulte de collision entre deux vélos et finalement le sixième restant des accidents implique des collisions avec des piétons, des chiens et du mobilier urbain (Réf. : 34, 35).

La figure 39 illustre les différents scénarios d'accidents impliquant un vélo et un véhicule motorisé. Un certain nombre découle simplement du non-respect du Code de la route et d'autres découlent d'un partage conflictuel de la chaussée (Réf. : 36).

Cas	Typologie de l'accident
1	Le véhicule en avançant vers la ligne d'arrêt heurte le cycliste qui a le vert
2	Le véhicule émerge d'une sortie privée ou commerciale
3	Le véhicule quitte une sortie privée par la marche arrière
4	Le véhicule effectue un virage à droite sur feu rouge
5	Le véhicule effectue un virage à droite et heurte le cycliste qui va tout droit
6	Ouverture surprise de la portière du véhicule: le phénomène 'Dooring'
7	Le cycliste heurte un véhicule stationné ou arrêté
8	Le véhicule faisant face à un cycliste tourne à gauche
9	Le véhicule tourne à gauche en avant d'un cycliste se déplaçant dans la même direction
10	Le véhicule dépasse un cycliste se déplaçant dans la même direction
11	Le cycliste accède à la rue à partir du trottoir et non d'une intersection
12	Le cycliste a omis d'arrêter ou n'a pas respecter la priorité à une intersection
13	Le cycliste accède à l'intersection à partir du trottoir alors qu'il n'a pas le droit de passage
14	Le cycliste émerge d'une sortie privée ou commerciale sans s'arrêter
15	Le cycliste se déplace dans le sens contraire du trafic
16	Le cycliste effectue un virage à gauche en avant d'un véhicule se déplaçant dans la même direction
17	Le cycliste effectue un virage à gauche en faisant face à un véhicule
18	Le cycliste perd le contrôle de son vélo
19	Le feu vert tourne au rouge avant que le cycliste termine la traversée de l'intersection
20	Le cycliste amorce une manœuvre de dépassement d'un véhicule
21	Le véhicule quitte ou entre à un stationnement sur rue

Figure 39 : Principaux scénarios de collision entre les cyclistes et les véhicules motorisés

Le cycliste qui ne dispose d'aucune protection — à part le casque si le cycliste le porte — est vulnérable face aux autres véhicules. La masse combinée à la vitesse des véhicules motorisés ne laissent aucune chance aux cyclistes lors des collisions. On comprend alors que les cyclistes ont particulièrement intérêt à se tenir loin des camions et des autobus. Selon les données de la SAAQ, durant la période 2008-2013, les camions qui ne sont impliqués que dans 3,9 % des accidents ayant causé des blessures à des cyclistes, sont cependant responsables de 31,4 % de la mortalité des cyclistes.

Une problématique majeure pour les véhicules lourds est l'angle mort qui souvent ne permet pas au conducteur de bien voir le cycliste à sa droite. Lors des virages à droite, il en résulte parfois de terribles accidents. Munir les camions de barres de protection latérales ou d'un dispositif, tels que des miroirs convexes, une caméra ou un radar pour améliorer la détection dans les angles morts, pourra aider à réduire la fréquence et la gravité des collisions impliquant les cyclistes.



Figure 40 : Les camions et les cyclistes: une cohabitation dangereuse (Réf.: 37)

D'autres facteurs sont à considérer dans les causes des accidents. Il s'agit entre autres de la météo, soit la présence de la pluie ou de la glace, de la qualité de la chaussée, de la qualité de l'éclairage des rues, de l'état du vélo, principalement des freins, la consommation d'alcool ou de drogue et l'expérience du cycliste. Il est reconnu que les causes des accidents sont souvent multifactorielles et l'analyse de l'ensemble de ces facteurs permet de cerner la problématique et d'y apporter les actions requises.

Lors d'un accident impliquant un vélo et un véhicule motorisé, c'est inévitablement le cycliste qui en sortira perdant. L'ampleur des dommages subis par le cycliste est fonction du transfert de l'énergie du véhicule au cycliste. Ainsi, un véhicule plus lourd ou roulant à une vitesse élevée provoquera plus de dommages et la probabilité que le cycliste en sorte vivant s'amenuise.

En supposant que le piéton et le cycliste, deux usagers de la route qui n'ont pas une véritable protection, ont la même probabilité de décès lors d'une collision frontale, on peut donc appliquer au cycliste la relation qui détermine la probabilité du décès en fonction de la vitesse d'impact développé initialement pour le piéton (Réf. : 38). Ainsi, à une vitesse d'impact de 50 km/h, la probabilité de décès est 5 fois plus élevée que dans le cas où la vitesse d'impact est de 30 km/h. Cette probabilité est 9 fois plus élevée dans le cas où la vitesse d'impact est de 70 km/h.

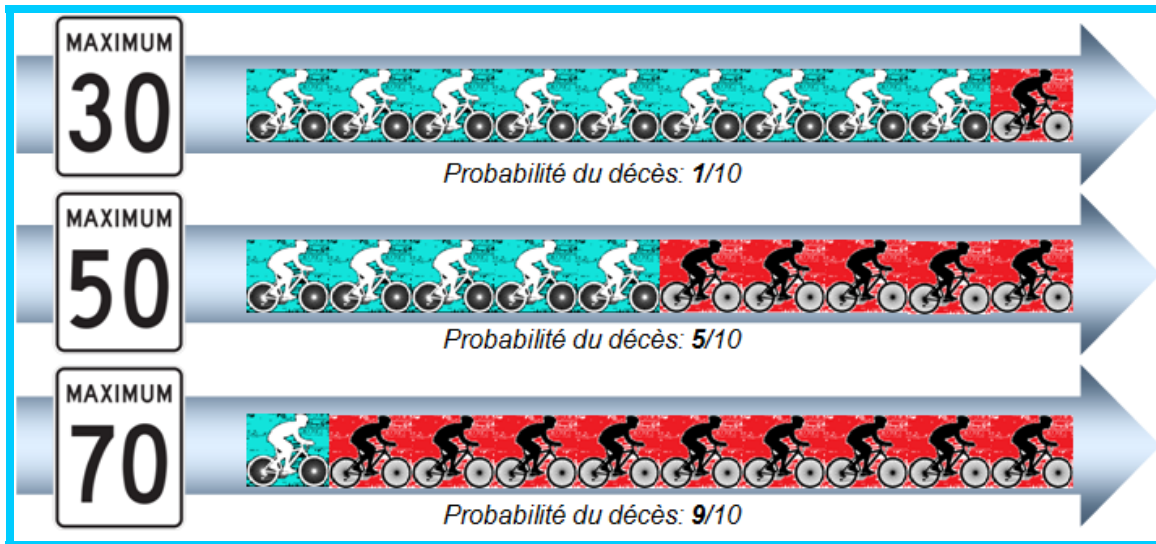


Figure 41 : La relation entre les risques de décès d'un piéton ou d'un cycliste et la vitesse du véhicule de promenade lors d'un impact frontal

Lors d'accidents, les cyclistes sont souvent victimes de blessures à la tête. Ces blessures qui peuvent varier de légères abrasions à une fracture de crâne sont la cause d'environ 60 % des décès chez les cyclistes (Réf. : 39). Il est donc important de se procurer un bon casque qui absorbe les chocs au moment d'un accident. Du point de vue de la biomécanique, l'énergie d'un choc direct à la tête va en partie être absorbée par l'écrasement du casque dans son épaisseur. Cependant, il est peu plausible que les casques qu'on retrouve actuellement sur le marché aient un effet significatif contre les mécanismes d'accélération-décélération linéaire ou rotationnelle qui se produisent lors d'impact. Le casque, par son épaisseur, peut aussi protéger des parties du visage qui sont proches du bord du casque tel que le front et les tempes. Une étude réalisée par des chercheurs de l'hôpital Général de Montréal (Réf. : 40) démontrait que sur les 143 cyclistes qui ont transité par le département de traumatologie entre 2007 et 2011, 86 % ont eu une lésion cérébrale traumatique légère à moyenne et 14 % des cyclistes ont eu une lésion cérébrale traumatique sévère. L'étude a aussi démontré l'importance d'avoir un casque, puisque parmi les 9 décès constatés, 7 ne portaient pas de casque lors de l'accident.

Si les blessures à la tête restent les plus importantes chez les cyclistes, différentes parties du corps sont aussi exposées au risque de blessure. En général, les contusions, c'est-à-dire la meurtrissure de la peau sans plaie ouverte, ni fracture, constituent la blessure la plus courante. Les fractures, que ce soit des membres inférieurs et supérieurs, ou au niveau du torse, les commotions cérébrales, les écorchures sur différentes parties du corps, les douleurs dorsales, les plaies profondes nécessitant des points de suture et les entorses sont souvent diagnostiquées après les accidents de vélo.

Afin de standardiser la sévérité des accidents, les blessures sont codées selon une échelle traumatologique internationale « Abbreviated Injury Scale » ou AIS introduite en 1969 par l'Association for the Advancement of Automotive Medicine. Cette échelle classe les types des blessures les plus fréquentes selon leur gravité en six classes.

Tableau 4 : Niveau de gravité AIS d'une blessure

<i>AIS</i>	<i>Gravité</i>	<i>Type de blessure</i>
1	Mineure	Contusion
2	Modérée	Fracture simple
3	Sérieuse	Fracture ouverte ou déplacée
4	Sévère	Lésion d'organe interne
5	Critique	Lésion majeure d'organe interne
6	Maximale	Lésion mortelle d'organe interne

Une classification spécifique a été développée pour les lésions cérébrales. Il s'agit de l'échelle de Marshall (*Réf. : 41*) qui catégorise ces lésions en six classes en fonction de leurs ampleurs.

Tableau 5 : Échelle de Marshall

<i>Types de lésions</i>	<i>Définitions</i>
Lésions diffuses — type I	Pas de signes d'atteinte cérébrale
Lésions diffuses — type II	Citernes de la base présentes Déviation de la ligne médiane < 5 mm Pas de lésion hyperdense ou en mosaïque >25 ml
Lésions diffuses — type III	Citernes comprimées ou absentes Déviation de la ligne médiane < 5 mm Pas de lésion hyperdense ou en mosaïque >25 ml
Lésions diffuses — type IV	Déviation de la ligne médiane > 5 mm Pas de lésion hyperdense ou en mosaïque >25 ml
Lésions avec effet de masse opérées — type V	Toute lésion évacuée chirurgicalement
Lésions avec effet de masse non opérées — type VI	Lésion hyperdense ou en mosaïque >25 ml non évacuée

La vitesse est un facteur contributif autant à la fréquence des accidents qu'à leur gravité. Tout en maintenant l'équilibre entre mobilité et sécurité, il se peut que l'adoption de 30 km/h dans certaines zones soit bénéfique pour la sécurité des

usagers vulnérables, une pratique assez courante en Europe. Le comportement des usagers de la route peut être influencé positivement par des campagnes de sensibilisation soutenues, notamment en ce qui concerne le port du casque, l'installation d'un système d'éclairage sur le vélo, permettant à un cycliste de voir et d'être vu dans l'obscurité ainsi que le respect strict des règles de conduite et de la signalisation. Des fois, le code de sécurité routière peut être révisé dans ce sens.

L'infrastructure est rarement la cause première de l'accident, mais constitue souvent un facteur contributif, par exemple par le manque de lisibilité des lieux ou par l'inadéquation de l'aménagement à une circulation à vélo. Dans beaucoup de cas, un aménagement plus favorable aux cyclistes peut réduire sensiblement, les risques d'accident. Par exemple, des pistes cyclables protégées et continues amélioreront certainement le bilan de sécurité pour les cyclistes. Différents aménagements sont accidentogènes par le manque de visibilité réciproque entre le cycliste circulant sur une piste cyclable et le conducteur sur la chaussée. Il est, par exemple, recommandé de rapprocher la piste cyclable séparée de la chaussée à l'approche des carrefours ou, de manière générale, d'éviter les situations où le cycliste pourrait être masqué en arrivant au carrefour, y compris par des véhicules en attente de tourner.

En ce qui concerne les carrefours contrôlés par des feux, des phases vertes spécifiques pour les tourne-à-gauche, voire des feux sans conflit exclusivement réservés aux cyclistes, permettront d'éviter certains accidents surtout dans les carrefours achalandés. Enfin, il apparaît que les risques d'accidents des cyclistes liés au stationnement des véhicules ne doivent pas être sous-estimés. La grande majorité des accidents en section courante, c'est-à-dire entre les intersections, correspond à des ouvertures de portières ou des manœuvres d'entrées/sorties des stationnements privés ou publics. Les conducteurs des véhicules doivent se familiariser avec l'idée qu'un cycliste peut se trouver à proximité de leur véhicule et augmenter leur niveau de vigilance en conséquence.

L'erreur humaine de la part du cycliste ou du conducteur de véhicule est la cause première des accidents impliquant un vélo. Des campagnes de communication devraient d'une part s'attaquer à certains comportements dangereux, parfois non perçus comme dangereux par ceux qui les pratiquent, et d'autre part, renforcer les conseils de prudence aux cyclistes. Le rappel d'un partage harmonieux de l'espace public et les connaissances minimales de base pour conduire un vélo en présence des véhicules motorisés doit faire systématiquement l'objet de campagnes de sensibilisation permanentes.

En matière de sécurité, il est avantageux que le nombre des cyclistes utilisant le réseau routier augmente. Il a été démontré que plus le nombre de cyclistes augmente, plus le taux d'accident diminue. En fait, même si le nombre absolu des accidents augmente, le risque individuel baisse en fonction du nombre d'usagers.

Les conducteurs des véhicules motorisés sont plus conscients de la présence des cyclistes et l'effet-surprise est de moins en moins important. Ils sont alors surtout disposés à accepter le partage de la chaussée. C'est ce qu'on appelle « Safety in numbers », ou l'effet de la masse critique, c'est-à-dire que les cyclistes, par leur nombre, imposent leur présence. La figure 42 illustre bien ce phénomène. Dans les pays où l'usage du vélo exprimé en distance parcourue par habitant est élevé, les accidents mortels par unité de distance sont plus bas que dans le cas des pays où l'usage du vélo est moins élevé (Réf. : 42).

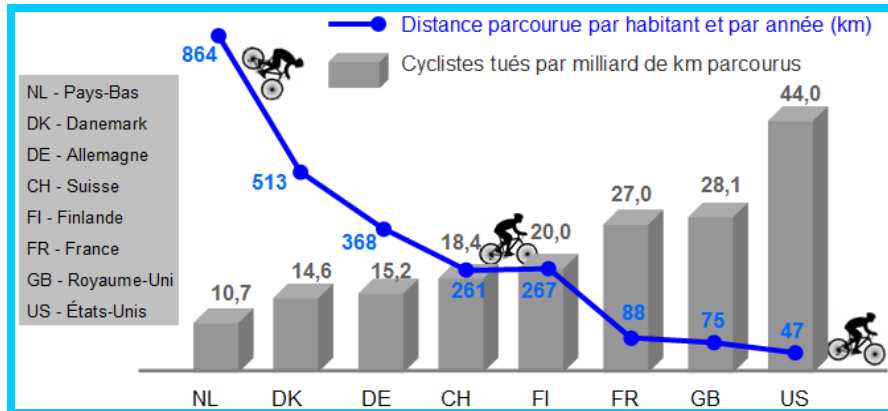


Figure 42: Relation entre l'intensité de l'usage du vélo et le taux des accidents mortels

Les vibrations subies par le cycliste

Les humains sont exposés aux vibrations durant leurs activités journalières, que ce soit durant leurs déplacements par différents modes de transport ou pendant l'usage d'outils mécaniques vibrants à pulsion ou rotatifs. Le cycliste est tout le temps exposé aux vibrations lorsqu'il se déplace puisque la chaussée n'est jamais parfaite et il ne dispose pas d'un système d'amortissement de chocs efficace. Les vibrations sont transmises par le guidon, les pédales et la selle. Dans la plupart des cas, les vibrations sont seulement une source d'inconfort qui peut influencer l'usage ou non du vélo comme mode de transport. Cependant, une exposition à une grande dose de vibration peut générer des problèmes de santé pour le cycliste. Ces problèmes peuvent être de nature physiologique, pathologique, psychologique ou biodynamique (Réf. : 43).

La vibration est un mouvement d'oscillation autour d'une position d'équilibre stable ou d'une trajectoire moyenne. Une vibration transmise à l'humain est caractérisée par :

- sa fréquence (en Hz) : elle correspond au nombre d'oscillations par seconde ;

- son amplitude : évaluée par l'accélération (en m/s^2). L'amplitude détermine l'intensité du mouvement ressenti par la personne exposée, elle est mesurée par la moyenne quadratique (Root mean square ou RMS) ;
- son orientation : caractéristique importante, pour les vibrations du corps entier, les effets et les moyens de protection ne sont pas les mêmes selon que l'orientation principale est dirigée dans un axe vertical (tête ↔ pied) ou dans un axe horizontal (avant ↔ arrière ou gauche ↔ droite) ;
- son point d'entrée dans le corps ; et
- son impulsivité : il s'agit de l'intégrale de la force au cours de l'intervalle de temps pendant lequel la force des vibrations est appliquée.

La durée de l'exposition aux vibrations est également un paramètre à prendre en compte dans l'évaluation du risque vibratoire. La figure 43 présente le schéma d'une vibration constante dans le temps.

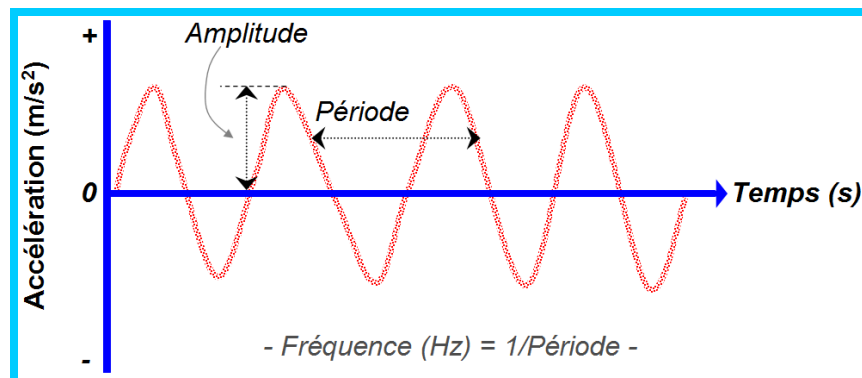


Figure 43 : Fréquence et amplitude d'une vibration

Les vibrations peuvent avoir un impact sur l'ensemble du corps et se produisent lorsque le corps est soutenu par une surface vibrante. Ce type de vibrations se produit dans tous les moyens de transport. Les vibrations peuvent aussi être localisées principalement au système main-bras. Il s'agit des vibrations transmises au corps par les mains, par exemple lors de travaux mettant en œuvre des machines vibrantes telles qu'une perceuse. La figure 44 présente les impacts probables sur différents systèmes du corps humain au complet ou sur le système main-bras. Le cycliste, selon son exposition aux vibrations, peut développer des symptômes affiliés principalement au système main-bras.

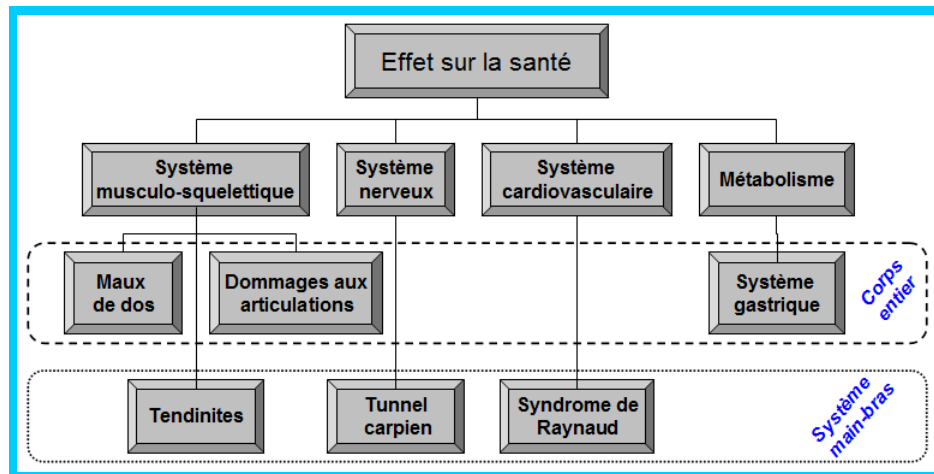


Figure 44 : Les effets négatifs des vibrations sur la santé humaine (Réf.: 44)

Les effets des vibrations sur la santé progressent lentement. Au début, une douleur est ressentie. Si l'exposition aux vibrations se poursuit, la douleur peut se transformer en blessure ou en maladie. La douleur est le premier effet observé sur la santé et l'on doit s'en préoccuper pour éviter que la blessure ne s'aggrave.

Corps entier : L'exposition quotidienne pendant un certain nombre d'années aux vibrations globales du corps peut avoir des effets sur le corps entier et causer des problèmes de santé. Ces vibrations sont associées à des fréquences hautes dans la gamme de 1 000 Hz et plus. Elles peuvent causer la fatigue, l'insomnie, les troubles gastriques, la céphalée et un tremblement peu de temps après ou pendant l'exposition. Aussi, elles peuvent générer un certain nombre de troubles du système circulatoire, de l'intestin, de l'appareil respiratoire, des muscles et du dos. Les vibrations globales du corps peuvent faire augmenter la fréquence cardiaque, la consommation d'oxygène et la fréquence respiratoire, et elles peuvent causer des changements dans le sang et dans l'urine (Réf. : 45). Heureusement, la plupart des cyclistes ne sont pas exposés à ces niveaux de vibration.

Système main-bras : Les vibrations à des fréquences basses, qui se produisent dans la gamme de 0,5 à 100 Hz, peuvent provoquer des changements dans les tendons, les muscles, les os et les articulations. Elles peuvent aussi avoir des effets sur le système nerveux. Le syndrome connu sous le nom médical de Raynaud secondaire, ou « doigt mort », causé par les vibrations est la maladie la plus courante observée chez les opérateurs d'outils vibrants à main. Globalement, ces effets constituent ce qu'on appelle le syndrome des vibrations du système main-bras. Les symptômes du « doigt mort » causé par les vibrations sont aggravés lorsque les mains sont exposées au froid.

Les personnes atteintes du syndrome des vibrations du système main-bras mentionnent souvent les symptômes suivants :

- pâleur d'un ou de plusieurs doigts exposés au froid ;
- picotement et perte de sensation dans les doigts ;
- perte de sensibilité tactile et sensations de douleur et de froid ;
- perte de force de préhension ;
- ulcères cutanés.

Le syndrome des vibrations du système main-bras évolue de façon graduelle et il s'aggrave avec le temps. Ses symptômes peuvent prendre de quelques mois à plusieurs années avant de devenir cliniquement perceptibles. Chez les cyclistes, une mauvaise qualité de la chaussée augmente le niveau de fatigue et peut provoquer des douleurs aux bras et au cou. Le phénomène du syndrome connu sous l'appellation de « handlebar palsy » est souvent associé à une longue pratique du vélo et résulte d'un dommage aux nerfs localisés dans le poignet de la main (Réf. : 46).

Afin de contrôler les problèmes de santé liés à l'exposition aux vibrations, des normes ont été développées par différentes organisations. Au Canada, on utilise les normes recommandées par l'American Conference of Governmental Industrial Hygienists afin de mettre en place des mesures de maîtrise des risques. Cependant, la directive européenne 2002/44/EC qui définit deux valeurs de référence est la plus adoptée actuellement. Il s'agit d'une valeur d'action (VA_8) de $2,5 \text{ m/s}^2$ et d'une valeur limite (VL_8) de $5,0 \text{ m/s}^2$. Ces valeurs correspondent à la dose journalière maximale des vibrations transmises au corps par le système main-bras A (8), établie selon la méthodologie ISO 5349-1. Sur la figure 45, la région verte représente les niveaux de vibration qui ne représentent pas de risque pour la santé. Quand à la région jaune, elle indique que les niveaux de vibration requièrent des actions à court terme pour les éliminer ou les réduire. Finalement, la région rouge correspond à des niveaux de vibration inacceptables et la personne exposée à ces niveaux doit être retirée de son milieu de travail immédiatement.

Ainsi, si une personne est exposée pendant 5 heures quotidiennement à un niveau de vibration de 4 m/s^2 , la figure 45 montre que l'exposition de cette personne, ramenée sur une journée standard de 8 heures A (8), se situe dans la zone jaune qui requiert soit de mettre en place des mesures pour réduire le niveau de vibration, soit de limiter la durée d'exposition de la personne à 3 heures. Les deux étoiles correspondent aux deux valeurs calculées pour une période d'exposition journalière de 8 heures ($VA_8=2,5 \text{ m/s}^2$ et $VL_8=5,0 \text{ m/s}^2$).

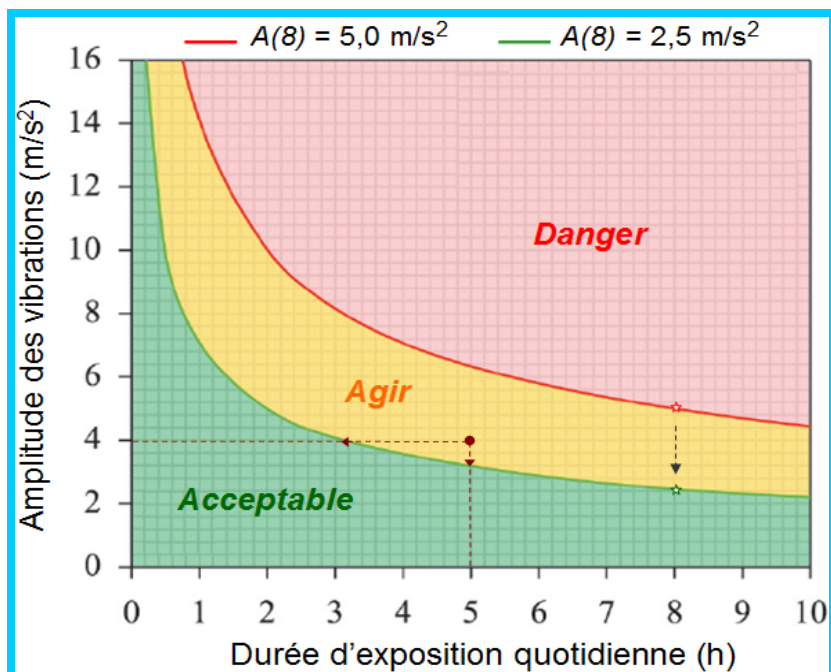


Figure 45 : Les valeurs références de la directive européenne évaluées en termes d'accélération calculée sur 8 heures (Réf.: 47)

Idéalement pour le cycliste, il est souhaitable que les vibrations qu'il subit durant ses déplacements sur le réseau soient contenues dans la zone verte de la figure 45. Ceci assurera son confort et diminuera les risques de blessure à long terme. Il faut cependant mentionner que les vibrations, même celles situées dans la zone verte, auront toujours un effet négatif sur la santé, spécialement pour les personnes à risque, plus susceptibles aux dommages causés par les vibrations.

Afin de mesurer les vibrations que le cycliste subit sur une chaussée donnée, on utilise un accéléromètre. Un accéléromètre est un capteur qui mesure les accélérations instantanées selon les trois axes orthogonaux (X, Y, Z). Il révèle le comportement du vélo durant son déplacement sur la chaussée étudiée. L'axe Z qui pointe vers le sol est celui qui fournit l'information qui permet de qualifier l'état de la chaussée via les variations des accélérations, exprimées en m/s^2 ou en unité de g, soit la force de gravité de la terre qui est égale à $9,81 m/s^2$.

Le principe de fonctionnement de la plupart des accéléromètres est basé sur la loi fondamentale de la dynamique :

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

Où : F est la force en unités de newton,
 m est la masse en kg, et
 a est l'accélération en m/s^2 ou en g

Plus précisément, la force d'inertie de la masse sismique du capteur est égale à une force de rappel appliquée à cette masse. On mesure l'accélération en mesurant la force exercée sur un corps, ou encore la déformation que cette dernière engendre sur une structure.

Les accéléromètres sont d'un usage assez courant. On les retrouve principalement dans l'industrie de l'automobile, où par exemple, les véhicules haut de gamme sont équipés de pas moins d'une quinzaine de micro-accéléromètres assurant la sécurité et le confort de conduite. On n'a qu'à penser au sac-gonflable, à la suspension active, au pré-tensionneur de ceinture de sécurité, à l'alarme antivol, au détecteur d'occupation de siège, au contrôle de stabilité, au dispositif anti-renversement, etc. Ils sont également utilisés dans l'industrie aéronautique, en sismométrie pour la prévision des tremblements de terre et bien sûr, dans les consoles de jeu et dans les iPhone, les iPod et les iPad de ce monde.

Grossièrement, on peut distinguer deux classes d'accéléromètres. D'une part, les accéléromètres de type industriel et qui sont conçus dans un boîtier métallique et basés principalement sur la technique de la détection piézoélectrique. D'autre part, les accéléromètres virtuels qu'on retrouve dans des unités électroniques mobiles, telles que les unités de jeu et les téléphones portables. La plupart de ces accéléromètres sont basés sur la technologie MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems). Dans un horizon assez proche, cette technologie sera probablement remplacée par la technologie NEMS (Nano Electro-Mechanical Systems), qui permettra de concevoir des dispositifs analogues à l'échelle du nanomètre.

La détection piézoélectrique utilise des matériaux qui permettent de convertir une contrainte mécanique en polarisation électrique et donc, en une variation de résistance. Les accéléromètres ainsi conçus sont utilisés généralement pour la mesure de chocs ou d'accélération de forte amplitude de milliers de g en milieu industriel.

Les accéléromètres des téléphones mobiles et autres unités électroniques mobiles sont constitués de surfaces de silicium polies, et composés de deux peignes, l'un fixe et l'autre suspendu par une lamelle flexible mobile. Lorsque la vitesse varie, il y a accélération. Le peigne mobile peut se déplacer de quelques dizaines de nanomètres. Le déplacement modifie la capacité électrique équivalente. Sa structure électronique fournit des signaux analogiques dont les amplitudes sont proportionnelles à l'accélération.

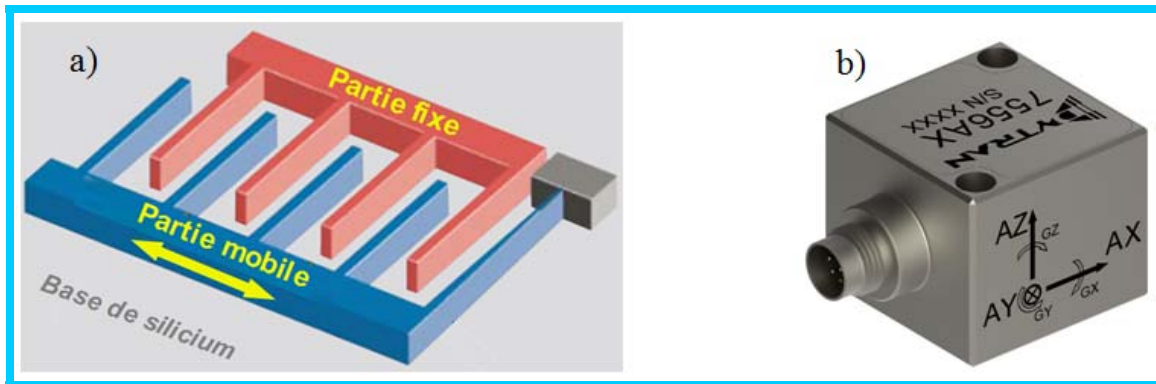


Figure 46 : Accéléromètre virtuel de type MEMS (a) et accéléromètre industriel de type piézoélectrique (b) (Réf.: 48, 49)

Au cœur du téléphone portable se niche un accéléromètre semblable à celui de la figure 46-a. Ce composant a pour tâche de mesurer l'angle que fait le téléphone par rapport à une droite virtuelle passant par le centre de la Terre. En mesurant cet angle et surtout ses variations dans le temps, on est capable de déduire toutes sortes de mouvement et d'orientation. Par exemple, si le téléphone est à la verticale ou à l'horizontale, s'il se déplace vers la gauche ou la droite, s'il est incliné ou s'il est secoué plus ou moins fortement.

Imaginons un téléphone posé sur une table, l'écran vers le bas :

- Si vous le déplacez de gauche à droite, alors vous agissez dans l'axe X.
- Si vous faites un mouvement avant-arrière, alors vous agissez dans l'axe Y.
- Si vous levez le téléphone et le déposez, alors vous agissez dans l'axe Z.

C'est l'axe Z qui fournit les accélérations correspondantes aux vibrations générées par l'état de la chaussée. La figure 47 illustre les trois axes orthogonaux associés à un téléphone portable ainsi qu'un exemple des accélérations générées par une chaussée lisse ou cahoteuse et correspondant à l'axe Z. Une accélération positive, signifie que la roue du vélo a rencontré une dénivellation, par exemple un nid-de-poule ou une fissuration. Dans le cas d'une accélération négative, la roue a traversé une surélévation, par exemple un dos-d'âne ou un puisard soulevé par l'action gel-dégel du sol.

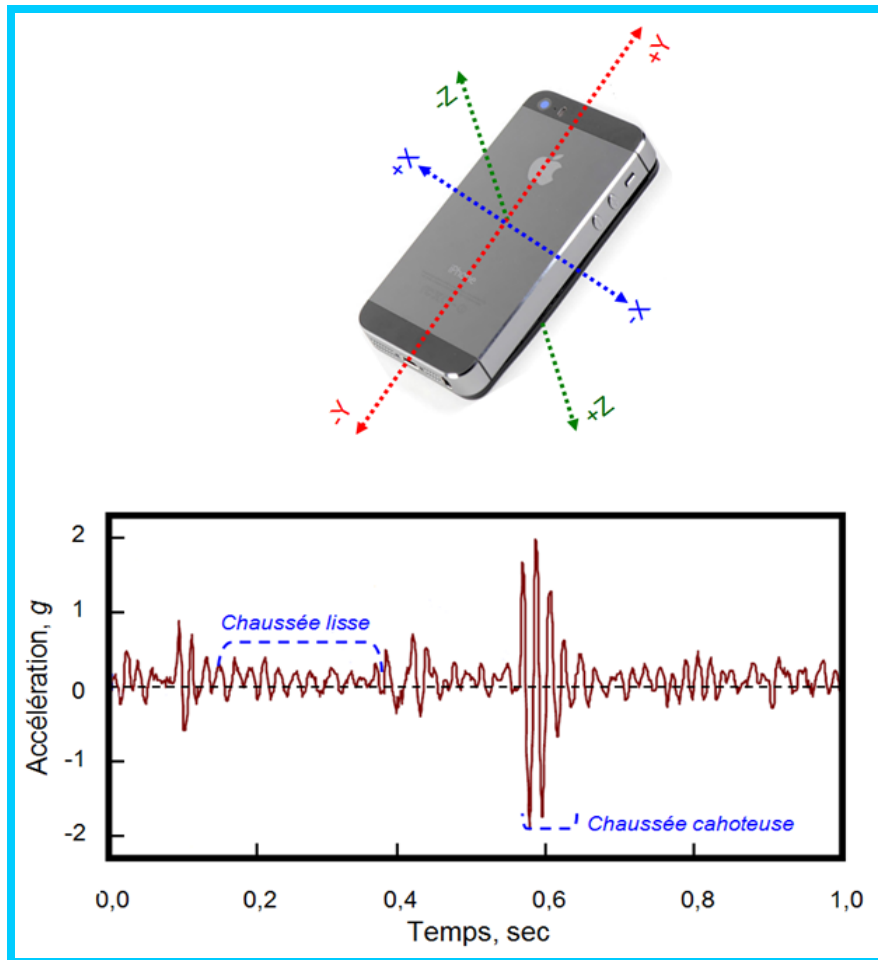





Figure 47 : Les trois axes orthogonaux d'un téléphone mobile et les vibrations de l'axe Z en unité de g ($9,81 \text{ m/s}^2$)

Afin d'évaluer la contribution de l'état de la chaussée aux vibrations transmises au cycliste, une expérimentation modeste a été entreprise. Un seul cycliste, mesurant 1,75 m et pesant 72 kg, a parcouru trois types de chaussée pendant l'équivalent d'une heure chacune. Un vélo de ville standard, dont la dimension des pneus est 700c x 35 mm et la pression est de 90 PSI, a été utilisé pour l'ensemble de l'expérimentation. Durant le parcours, le cycliste maintenait une vitesse autour de 18 km/h. Les trois types de chaussées sont décrits dans le tableau suivant.

Tableau 6 : Les trois types de chaussées testés

Type de chaussée	Description
<p>Chaussée en bon état</p> 	<p>Chaussée nouvellement refaite. Surface de roulement lisse et bien nivelée. Le cycliste ne ressent aucun inconfort</p>
<p>Chaussée en mauvais état</p> 	<p>Dégradation et distorsion importantes de la surface de la chaussée. Le cycliste ressent un niveau d'inconfort élevé</p>
<p>Chaussée en pavé</p> 	<p>Les blocs ne sont pas toujours nivelés et la présence d'espacement entre les blocs crée des secousses très inconfortables pour le cycliste</p>

L'application iVibrometer 7.1 développée par la compagnie BSoft inc. a été utilisée pour capter les vibrations détectées par l'accéléromètre du téléphone durant le parcours. Cette application, disponible sur le site bsoftmobile.com au modeste coût de 1,99 \$ US, a été installée sur un iPhone 4S. Le téléphone a été placé dans un support de protection et attaché solidement sur le guidon tel qu'illustré sur la figure 48. Ainsi, en fixant le téléphone sur le guidon, celui-ci capte les vibrations que le cycliste sent réellement dans son poignet et son avant-bras pendant qu'il tient le guidon du vélo.

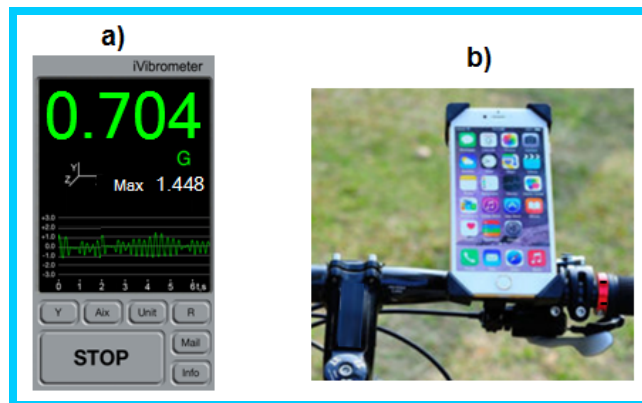


Figure 48 : L'application iVibrometer 7.1 (a) et le téléphone attaché sur le guidon du vélo (b)

L'application iVibrometer 7.1 échantillonne les vibrations selon les trois axes orthogonaux (X, Y, Z) à un taux de 100 Hz et permet de choisir comme unité de mesure de l'accélération soit en g ($9,81 \text{ m/s}^2$) soit en amplitude (mm/s^2). Les données ainsi recueillies sont exportables par le courriel et peuvent être utilisées directement par le chiffrier Excel.

Les fichiers de données générées par l'application sont immenses puisque l'échantillonnage se fait à une fréquence de 100 Hz, soit 100 données par seconde. Par exemple, pour une minute d'échantillonnage, le nombre de données est de $60 \text{ secs} * 100 \text{ Hz}$, soit 6 000 données pour chacun des axes X, Y et Z, pour un grand total de 18 000 données. Finalement, ce sont 10 minutes de données qui ont été analysées étant donné que l'objectif est d'illustrer sommairement l'impact de la qualité ou le type de la surface de roulement sur l'amplitude des vibrations absorbées par le cycliste. La figure 49 montre les accélérations en unité de g pour les trois sites, et ce, pour un échantillon de 6 secondes, ce qui correspond approximativement à une distance parcourue de 30 mètres. Or, le profil des accélérations pour les dix minutes d'analyse est très similaire à ce qu'on peut voir sur la figure.

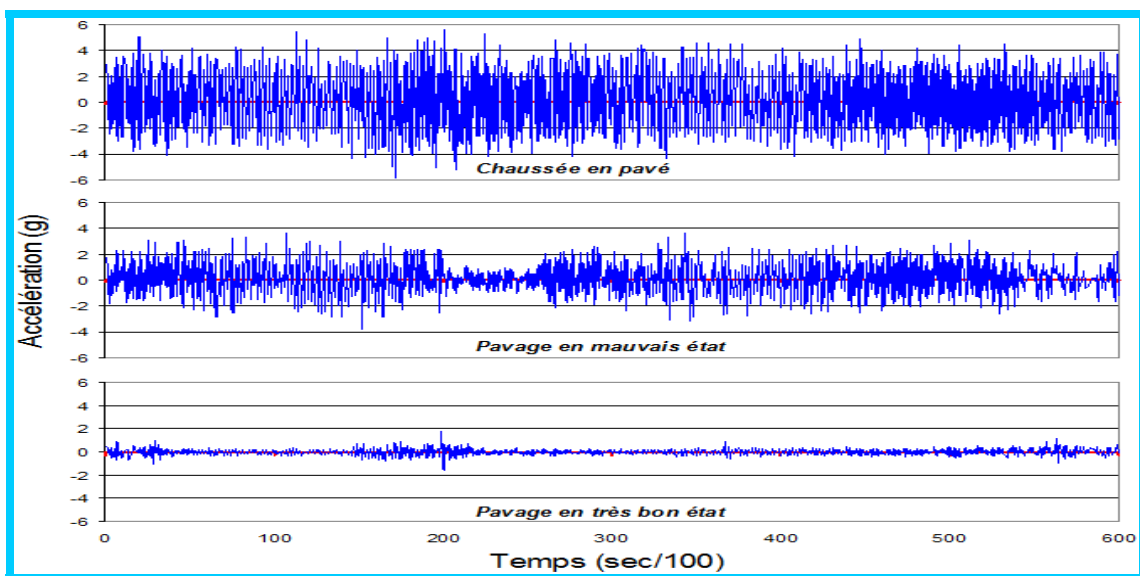


Figure 49 : Six secondes d'échantillonnage de l'accélération selon l'axe Z pour trois types de chaussée

Il est clair que la chaussée en pavé est la plus dommageable pour le corps du cycliste, principalement pour l'ensemble main-bras. Les accélérations atteignent des maximums dépassant des fois 4 g, soit approximativement les maximums ressentis par un travailleur opérant un marteau piqueur. La moyenne en valeur absolue des vibrations durant les 10 minutes analysées est de 2,96 g avec un écart-type de 0,87 g. Durant les jeux olympiques de Rio 2016, l'épreuve d'endurance de course à vélo sur une distance de 230 km, contenait une partie où les cyclistes

devraient rouler sur une section de route en pavé. Les images étaient saisissantes, puisque la force des vibrations a fait bondir les bouteilles d'eau hors des porte-bouteilles des vélos et le corps des cyclistes tremblait tellement que les secousses étaient bien visibles à travers les images transmises par la télé.

Les vibrations sur une chaussée en mauvais état génèrent aussi des vibrations importantes, mais ayant des amplitudes moins prononcées que dans le cas d'une chaussée en pavé. Les maximums dépassent parfois les 2 g avec une moyenne de 1,42 g et un écart-type de 0,74 g. quant à la chaussée en très bon état, les vibrations maximales ne dépassent que rarement les 0,5 g. La moyenne obtenue est de 0,27 g avec un écart-type de 0,18 g.

Or, pour déterminer si les vibrations relevées dépassent les seuils établis par la directive européenne 2002/44/EC, il est requis de calculer dans un premier temps, la moyenne quadratique (Root mean square ou RMS) des valeurs des trois axes orthogonaux X, Y et Z selon la formule suivante :

$$a_{hv} = \sqrt{a_{hwX}^2 + a_{hwY}^2 + a_{hwZ}^2}$$

Le terme a_{hv} représente la valeur totale de vibration dans les trois directions X, Y et Z. Mathématiquement, il est obtenu par la sommation quadratique des valeurs brutes obtenues via l'application iVibrometer 7.1. Une fois le terme RMS calculé, il faudra tenir compte de la durée d'exposition du cycliste à ces vibrations. Le calcul final se fait selon la formule :

$$A(8) = a_{hv} \sqrt{\frac{T}{T_o}}$$

$A(8)$ est la dose journalière maximale des vibrations transmises au corps exprimée en m/s^2 , T est la durée d'exposition et T_o est égale à 8 heures, soit la durée de référence.

Pour faciliter le traitement des données, les relevés durant dix minutes ont été subdivisés en tranche d'une minute. On dispose ainsi de dix observations pour chaque type de chaussée. Pour chaque tranche, l'exposition journalière aux vibrations $A(8)$, a été calculée. La figure 50 montre les résultats obtenus.

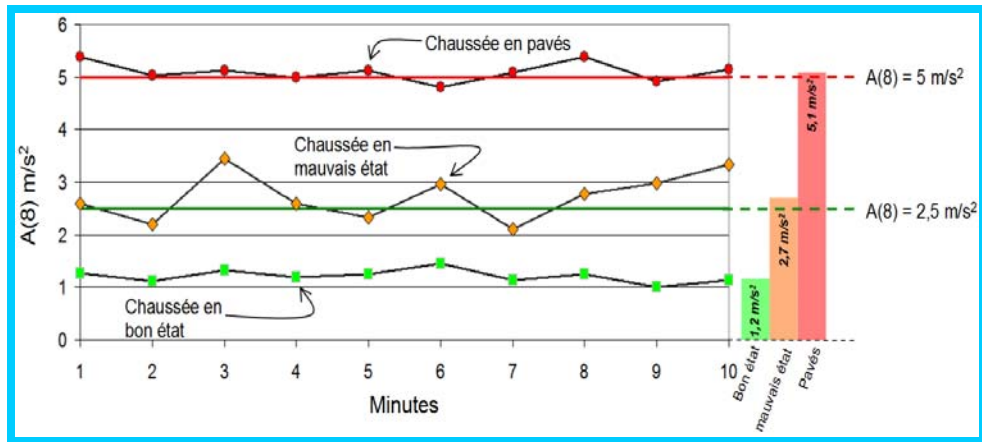


Figure 50 : L'exposition journalière aux vibrations A (8) pour les trois types de chaussée

Il est clair que le cycliste qui roule sur une chaussée en pavé dépassera ou s'approchera de la dose journalière maximale des vibrations transmises au corps par le système main-bras, soit 5 m/s^2 . Dans le cas présent, la moyenne calculée de A (8) pour une chaussée en pavés atteint les $5,1 \text{ m/s}^2$ avec un coefficient de variation (Écart-type/Moyenne) de l'ordre de 3,4 %. Les dommages sur le système main-bras que pourra subir le cycliste pourront être importants si la durée d'exposition est prolongée. Dans certains pays européens tels que l'Allemagne et les Pays-Bas, plusieurs pistes cyclables sont localisées sur d'anciennes rues construites en pavés de pierre irréguliers. L'exposition des cyclistes qui empruntent ces pistes régulièrement à des vibrations intenses pourra accélérer le développement du syndrome des vibrations du système main-bras, le « handlebar palsy ». Cependant, comme illustré sur la figure 51, il faut distinguer entre le pavé moderne qui est plus régulier et plus doux au roulement et l'ancien pavé en pierre avec des joints larges et une surface irrégulière.



Figure 51 : Ancien pavé en pierre, rugueux et irrégulier (à gauche) comparativement au pavé moderne relativement lisse et nivelé (à droite)

En ce qui concerne les chaussées en asphalte, la chaussée en bon état génère très peu de vibrations qui restent très en deçà de la dose journalière des vibrations qui nécessite la prise d'une action ($2,5 \text{ m/s}^2$). Dans le cas de la chaussée testée, dont la surface a été refaite il y a moins d'une année, la dose journalière moyenne des vibrations obtenue est de $1,2 \text{ m/s}^2$ et le coefficient de variation se situe à $9,7 \%$. Une partie de ces vibrations est due au mouvement même du vélo et à la gesticulation du cycliste lors du pédalage. Aussi, même une chaussée refaite à neuf pourra comporter des imperfections perceptibles par l'accéléromètre, mais que le cycliste ne peut percevoir. Selon le système de classification de l'état de la chaussée connu par l'indice de rugosité international ou IRI qui varie sur une échelle de 0 à 16, 0 étant la perfection absolue, les chaussées neuves et bien faites auront un indice autour de 1.

Quant à la chaussée en mauvais état, la multiplication des fissurations, la présence de l'orniérage, et la mauvaise qualité de la texture font de sorte que le cycliste ressent un niveau de vibration élevé. L'analyse effectuée révèle un niveau moyen de vibration de l'ordre de $2,7 \text{ m/s}^2$, soit au-delà de la limite nécessitant une action ($2,5 \text{ m/s}^2$). La dispersion des données calculée par le coefficient de variation est plus élevée que dans le cas des deux autres types de chaussée et se situe à $15,8 \%$. En fait, selon la profondeur de la fissure de sa largeur, ou de la présence d'un nid-de-poule, etc., la vibration moyenne obtenue pour chaque tranche d'une minute varie en conséquence selon l'ampleur de l'imperfection rencontrée.

Plusieurs facteurs jouent un rôle déterminant dans le niveau des vibrations ressenties par le cycliste. Outre la qualité de la surface de roulement, il y a le poids du cycliste et de son vélo, la configuration du guidon, la présence ou non d'amortisseurs de chocs, la largeur du pneu et sa pression ainsi que la vitesse de déplacement qui est un facteur multiplicateur des vibrations ressenties.

Malgré le caractère sommaire de cette analyse, on peut déduire néanmoins qu'une chaussée de qualité évitera aux cyclistes assidus, les risques de développer le syndrome des vibrations du système main-bras et d'augmenter le risque d'endommager les nerfs et la vascularisation localisés dans le poignet de la main. Elle évitera aussi des douleurs au niveau du cou et du dos pour les personnes ayant déjà une problématique à ce niveau. Une surface de chaussée confortable est, sans aucun doute, un facteur qui joue un rôle d'attraction additionnelle pour des usagers potentiels du vélo, mais aussi, pour que les cyclistes actuels continuent à pratiquer ce mode dans un environnement sans risque pour la santé.

L'exposition du cycliste à la pollution de l'air

La pollution de l'air est composée essentiellement de gaz et de particules fines (PM). Les principaux gaz qui contaminent l'air sont l'ozone (O_3), le dioxyde d'azote (NO_2), le dioxyde de soufre (SO_2) et le monoxyde de carbone (CO). Les particules

fines sont classées selon leur taille. les PM de moins de 10 micromètres (PM₁₀) et les PM de moins de 2,5 micromètres (PM_{2,5}). Plus les particules sont petites, plus elles peuvent pénétrer profondément dans le système respiratoire.

Les sources des principaux polluants de l'air proviennent, du secteur des transports, des industries, du chauffage résidentiel non propre et des foyers des feux de forêt, même à des centaines de kilomètres.

En l'absence de vent, les polluants sont emprisonnés dans la masse d'air. Ces conditions contribuent au phénomène du smog. Il s'agit d'un phénomène qui se présente sous forme d'une brume qui réduit la visibilité et où la concentration des polluants est plus élevée que la normale. Il provient du mélange d'un ensemble de polluants parmi lesquels les particules fines (PM_{2,5}), l'ozone troposphérique et les oxydes d'azote.



Figure 52 : Le smog, un phénomène omniprésent dans les grandes villes chinoises (Réf.: 50)

Les contaminants de l'air sont associés à des effets néfastes sur la santé, qui touchent surtout les fonctions respiratoires et cardiovasculaires. L'Organisation mondiale de la santé (OMS) a estimé en 2014 que la pollution de l'air est la cause directe du décès prématuré de 7 millions de personnes dans le monde. Ces données confirment que la pollution de l'air représente maintenant le principal risque environnemental pour la santé sur notre planète. Dorénavant, l'OMS classe l'exposition à l'air pollué comme source cancérigène (Réf. : 51).

À Montréal, on estime le nombre de personnes qui meurent prématurément en raison de différents polluants à 1540 annuellement. Selon les évaluations de

l'Institut national de santé publique du Québec, près de 1 000 décès seraient attribuables aux particules fines dans la métropole (*Réf.* : 52).

Les effets de la pollution sur la santé sont fonction de la durée de l'exposition à des contaminants de l'air, des concentrations des polluants ainsi que de l'état de santé des personnes exposées.

Une personne exposée à court terme à la pollution de l'air peut développer, le jour même ou les jours suivants, des symptômes tels que les irritations rhino-pharyngées et oculaires, la toux, le déclenchement de crises d'asthme, etc.

Quant à une exposition prolongée de quelques mois à quelques années à des contaminants de l'air, celle-ci conduit au développement de pathologies respiratoires chroniques affectant la capacité pulmonaire, notamment chez les personnes asthmatiques et âgées. En ce qui concerne les enfants, la pollution peut ralentir le développement des poumons. La pollution peut aussi contribuer à l'accroissement du risque de décès, par maladies cardio-respiratoires et par cancer du poumon. Il a même été observé que l'exposition à la pollution chez la femme enceinte peut affecter la croissance normale du fœtus. Des chercheurs (*Réf.* : 53) ont pu constater cela à Pékin, lors des Jeux olympiques en 2008. Les autorités chinoises avaient mis les bouchées doubles pour réduire la pollution de l'air. Il en a résulté que les bébés nés à cette période pesaient 23 grammes de plus que ceux nés l'année d'avant et d'après.

Paradoxalement, le cycliste qui fait un choix pour un mode de déplacement propre subit la pollution générée par les autres modes motorisés. Si le vélo est une solution pragmatique pour lutter contre la pollution urbaine, la pollution peut être un vrai risque pour les cyclistes, particulièrement ceux ayant déjà une santé fragile.

Le degré de pollution subi par le cycliste dépend du parcours emprunté et de la durée du trajet, des niveaux de polluants dans la ville, mais aussi du taux d'inhalation de l'air en fonction de l'effort produit. Le cycliste qui circule à proximité d'un trafic dense est plus exposé à la pollution que celui qui circule sur une piste cyclable loin du trafic automobile.

Les équipements utilisés pour évaluer l'exposition du cycliste à la pollution sont généralement des instruments portables qui peuvent mesurer un ou plusieurs types de polluants. Ces équipements sont installés dans une remorque tirée par un vélo ou à l'intérieur d'un véhicule. La figure 53 montre trois appareils d'usage courant, utilisés dans les études d'analyse de la qualité d'air ainsi qu'un montage

typique de ces instruments dans une remorque à vélo. L'appareil a) sert à mesurer la concentration des particules en suspension dans l'air dont la dimension est généralement inférieure à 40 micromètres de diamètre, l'appareil b) sert à mesurer la suie (*Black carbon*), provenant principalement des moteurs à diesel des véhicules lourds et l'appareil c) sert à mesurer la concentration des particules fines PM_{10} et $PM_{2,5}$.



Figure 53 : Des instruments portables pour mesurer différents polluants (Réf.: 54)

Des équipes scientifiques à travers le monde ont réalisé des études pour quantifier l'exposition du cycliste à la pollution de l'air. Certaines études comparent la quantité des polluants par catégorie, qui se trouve dans l'environnement immédiat du cycliste en fonction de l'infrastructure empruntée. D'autres études comparent l'exposition à la pollution des piétons, automobilistes et usagers du transport en commun pour une même infrastructure.

Les conclusions de ces études sur l'exposition à la pollution de l'air vont dans le même sens, à savoir que le cycliste et le piéton sont moins exposés comparativement à l'utilisateur de la voiture ou de l'autobus. Aussi, sur un même axe routier, le cycliste qui circule loin des véhicules à moteur est moins exposé à la pollution que le cycliste qui circule à proximité du trafic. De plus, le cycliste qui emprunte des rues locales moins achalandées par les véhicules motorisés est moins exposé que celui qui emprunte des artères majeures avec des débits de circulation importants. Ce sont des conclusions, sans surprise, confirmant que le cycliste a tout intérêt à s'éloigner de la source d'émanation des polluants qu'est le véhicule motorisé.

En France, plus précisément à Toulouse, une étude réalisée en 2008-2009 par l'Oramip, un organisme chargé de la surveillance des niveaux de pollution de l'air dans le Midi-Pyrénées, conclut que l'automobiliste, source importante d'émission de polluants, est aussi le plus exposé. L'automobiliste subit des niveaux plus importants de dioxyde d'azote, de monoxyde de carbone et de benzène que le piéton et le cycliste.

Ces derniers sont à la fois moins directement plongés dans le trafic et échappent à l'effet accumulation puisqu'ils n'évoluent pas dans un environnement confiné, tel celui de l'automobiliste. De plus, ils ont la possibilité de s'éloigner de la circulation (*Réf. : 55*).

Toujours en France, une étude réalisée en 2009 par une association de surveillance de la pollution atmosphérique dans la région d'Île-de-France, Airparif a conclu qu'en moyenne l'exposition à la pollution est deux fois moins élevée pour le cycliste sur une piste séparée que dans la circulation automobile et 30 % moins élevée dans les voies réservées pour autobus (*Réf. : 56*).

En Amérique du Nord, une étude réalisée par l'université de Portland en 2014 conclut que la concentration de différents polluants sur les artères majeures est de 97 à 317 % plus élevée que dans le site de référence (un parc situé dans la ville de Portland, mais loin du trafic). Elle est aussi plus élevée de 48 à 119 % que sur les rues locales. Globalement, le cycliste fait face de 2,1 à 3,2 fois plus de concentrations de polluants quand il circule sur une artère majeure que sur une rue locale. Finalement, l'étude précise que l'exposition du cycliste aux concentrations des polluants augmente d'environ 2 % pour chaque tranche additionnelle de 1000 véhicules circulant sur l'axe routier par jour (*Réf. : 57*).

À Fort Collins au Colorado, une étude similaire réalisée en 2015, conclut qu'un cycliste peut réduire son exposition à la suie (Black carbon) de 20 % et au monoxyde de carbone de 10 % en empruntant les rues locales plutôt que les artères ayant un trafic élevé (*Réf. : 58*).

À Montréal, une étude réalisée par une équipe de l'université de McGill publiée en 2015 confirme aussi les conclusions des deux études précédentes. Les niveaux de pollution de l'air, mesurés par des cyclistes équipés de capteurs de suie (en nanogrammes par mètre cube) et de particules ultrafines (en nombre de particules par centimètre cube), montrent clairement que les concentrations de polluants le long des pistes cyclables qui sont souvent loin du trafic, sont plus basses que sur les infrastructures cyclables localisées sur ou à côté des axes routiers. Le tableau 7 montre une synthèse des résultats de l'étude de McGill. On remarque l'impact de l'intensité du trafic et de l'éloignement du cycliste par rapport à la ligne médiane de la chaussée (*Réf. : 59*).

Tableau 7 : Relation entre la concentration des polluants, le trafic journalier et l'éloignement de la chaussée pour différents types d'infrastructures cyclables

	Chaussée partagée		Piste cyclable sur rue		Piste cyclable hors rue	
	<i>Artériel</i>	<i>Local</i>	<i>Artériel</i>	<i>Local</i>	<i>Artériel</i>	<i>Local</i>
Trafic journalier (véh.)	3 660	1 476	3 848	1 398	4 383	1 313
Éloignement du centre de la chaussée (m)	4,2	3,4	8,8	8,5	145,1	67,6
Concentration moyenne des particules ultrafines (nb/cm³)	22 551	19 681	23 223	20 733	13 693	15 120
Concentration moyenne de la suie (ng/m³)	1 733	1 133	1 404	1 063	687	638

Les études scientifiques mentionnées plus haut ont analysé l'exposition du cycliste à la pollution sur la base des mesures des contaminants présents dans l'environnement immédiat du cycliste. L'effet de l'effort physique a été simplement sous-estimé ou ignoré dans ces études. Ça revient à dire que tous les usagers de la rue inhalent plus ou moins les mêmes quantités d'air durant leurs déplacements, indépendamment de l'effort fourni.

Or, au repos, le cas notamment du conducteur d'un véhicule motorisé ou de son passager, la respiration est lente, la quantité d'air inspirée à chaque cycle se situe entre 5 et 8 litres/minutes. Lors d'un effort physique prolongé, notamment le cas d'un cycliste, le débit ventilatoire augmente considérablement. D'un débit d'environ 15 litres d'air/minute en vitesse de promenade (8 à 12 km/h), le débit ventilatoire peut s'élever à 40 litres d'air/minute pour un cycliste moyen se déplaçant à une vitesse d'environ 20 à 23 km/h. Chez un cycliste élite, durant les pics d'effort, le débit ventilatoire peut atteindre et même dépasser les 120 litres d'air/minute. Encore plus remarquables, les respirations durant l'effort sont plus profondes et les contaminants peuvent pénétrer plus profondément dans les poumons.

Pour la première fois, une équipe scientifique belge a présenté les résultats d'une étude en 2010 qui vont à l'encontre des conclusions des études précédentes. La particularité de cette étude est de mesurer les contaminants, effectivement inhalés par une cinquantaine de personnes selon l'effort physique fourni. Les sujets ont conduit, sur la même artère, des voitures et tout de suite après, des vélos.

Durant chaque parcours, des mesures ont été effectuées sur la fréquence de respiration, la profondeur des respirations, le taux d'absorption de l'oxygène, ainsi que la fréquence cardiaque. Ces mesures ont permis de calculer le volume d'air respiré et expiré par minute, la quantité de particules fines inspirées et par conséquent, ont permis une estimation des quantités de particules fines qui pourraient être déposées dans les poumons de chaque sujet.

Une fois devenus cyclistes, les sujets respiraient plus fréquemment et plus profondément que lorsqu'ils conduisaient des voitures. Les résultats démontraient que les cyclistes respiraient 4,3 fois plus d'air par minute que les automobilistes. De plus, les cyclistes inhalaient entre 400 et 900 % plus de particules fines que les automobilistes sur le même parcours. Aussi, la portion des particules qui reste déposée dans les poumons est significativement plus élevée chez les cyclistes que chez les automobilistes (*Réf. : 60*).

Cette étude utilise tout de même une approche hybride, dans le sens où les quantités de dépôts de particules fines dans les poumons sont estimées par des modèles et non mesurées directement.

Or, une équipe de l'université de Columbia à New York s'est engagée dans une étude utilisant des capteurs biométriques miniaturisés afin de mesurer la quantité de polluants inhalés réellement par le cycliste, non seulement en fonction de son environnement, mais aussi en fonction de son effort physique. L'expérience consistait à équiper les sujets d'équipement ultra sophistiqué et de très petite taille qui effectue des mesures en continu et en temps réel. Il s'agit notamment d'un moniteur de la pollution de l'air, d'une unité de mesure de la respiration, d'une unité de mesure de la pression sanguine, d'un GPS et d'un vêtement capable de mesurer la variabilité de la fréquence cardiaque. Vu la légèreté et la taille de ces équipements, il sera possible pour les sujets de les avoir sur eux 24 h/24. Les résultats de cette étude sont attendus pour 2017.

Dans l'attente d'une solution à la qualité de l'air, les cyclistes peuvent pédaler calmement afin d'éviter l'hyperventilation et inspirer par le nez dont les muqueuses jouent un rôle de filtre. Le cycliste peut aussi adapter son itinéraire en empruntant les pistes cyclables éloignées du trafic dense ou les rues locales, moins achalandées par le trafic motorisé. Autrement, il y a toujours la solution du port du masque antipollution !



Figure 54 : Un système de filtration de l'air, une invention ingénieuse de l'artiste britannique Matt Hope lui permettant de respirer de l'air propre sur les rues de Beijing (Réf.: 61)

Le niveau de stress et le milieu de conduite

On sait tous que l'exercice physique contribue à diminuer le stress. Ceci est aussi valable pour la pratique du vélo. Cependant, la conduite du vélo dans un milieu hostile et qui représente des sources potentielles de danger peut contribuer à hausser le niveau de stress.

Le stress est défini comme une réponse physiologique de l'organisme à une situation épuisante, dangereuse ou angoissante. Cette notion est étendue à tout état de perturbation provoqué par la confrontation à un danger, une menace physique ou psychique, un environnement difficile. On parle du stress d'un examen, d'un accident ou même du bruit.

Il y a deux types de stress. Le stress aigu qui fait partie de notre vie quotidienne et qui découle d'événements ou de situations envers lesquelles nous sentons que nous avons peu de contrôle et qui impliquent des éléments d'imprévisibilité. Le stress aigu n'est pas nécessairement mauvais, puisqu'il stimule la sécrétion d'hormones qui nous aident à gérer la situation. Le stress aigu déclenche plusieurs signes physiques, comme des palpitations très fortes, une hypervigilance ou des étourdissements. Ces signes sont le résultat de l'action des hormones du stress.

Les problèmes surviennent lorsque nous sommes exposés de manière répétée au stress sur une base chronique. Lorsque ceci survient, on peut commencer à souffrir

des effets néfastes du stress. Si, par exemple, un cycliste qui se déplace quotidiennement du point A au point B subit un stress généré notamment par un niveau élevé de trafic motorisé et le sentiment d'insécurité peut développer les symptômes d'un stress chronique.

À la longue, le stress chronique peut mener à l'épuisement de l'organisme. Plus précisément, le stress chronique entraîne des maladies cardiaques, de l'hypertension artérielle, hypercholestérolémie, du diabète de type II, de l'anxiété et de la dépression. Les effets du stress chronique sont pires chez les gens à risque de développer une maladie chronique, vu leurs antécédents familiaux.

Le stress provoque une production importante de cortisol, une hormone de stress, par la glande surrénale, entraînant ainsi une augmentation de la glycémie afin de fournir à l'organisme l'énergie nécessaire pour « survivre » (*Réf.* : 62).

Le cycliste peut donc sentir un inconfort physique, en lien direct avec l'environnement immédiat de conduite. Sur une piste cyclable sécuritaire, paisible et agréable qui ne traverse pas d'intersection achalandée, le cycliste ne ressent pratiquement aucun stress. Cependant, le niveau de stress augmente rapidement sur une voie de circulation mixte où il doit faire face à des automobilistes agressifs et nombreux, des piétons trop aventureux, une connectivité déficiente du réseau cyclable et une chaussée en mauvais état. Une réalité vécue au quotidien par ceux qui se déplacent en vélo et qui prend parfois des allures de parcours du combattant.

C'est dans cette optique que des chercheurs et des usagers ont eu l'idée de développer des cartes « émotionnelles » illustrant le niveau de stress subi par les cyclistes sur un réseau donné. L'objectif était d'informer les cyclistes des parcours à éviter, vu le niveau de stress potentiellement élevé généré par les conditions physiques et opérationnelles du parcours et de leur offrir des options avec moins de stress.

La conception des premières cartes émotionnelles ou carte de stress était basée sur des appréciations qualitatives de parcours effectuées par les usagers eux-mêmes. Chaque usager donnait une évaluation du niveau de stress qu'il a ressenti durant le parcours ou durant différentes sections du parcours. Aussi, des spécialistes ont classé pour un réseau cyclable donné, différents tronçons du réseau sur la base des conditions du trafic (volume et vitesse), de la configuration des intersections (largeur et phasage des feux), de la multiplicité des conflits avec d'autres usagers (site propre ou rue avec mixité du trafic). Le niveau du stress peut varier de « inexistant » à « très élevé » et peut contenir un certain nombre de niveaux entre les deux extrêmes. La figure 55 présente une carte qualitative de stress compilée par le département des transports de comté de Montgomery dans l'État du

Maryland. Cette carte illustre, par des couleurs différentes, les sept niveaux de stress potentiel ressenti par les cyclistes sur le réseau cyclable du comté.

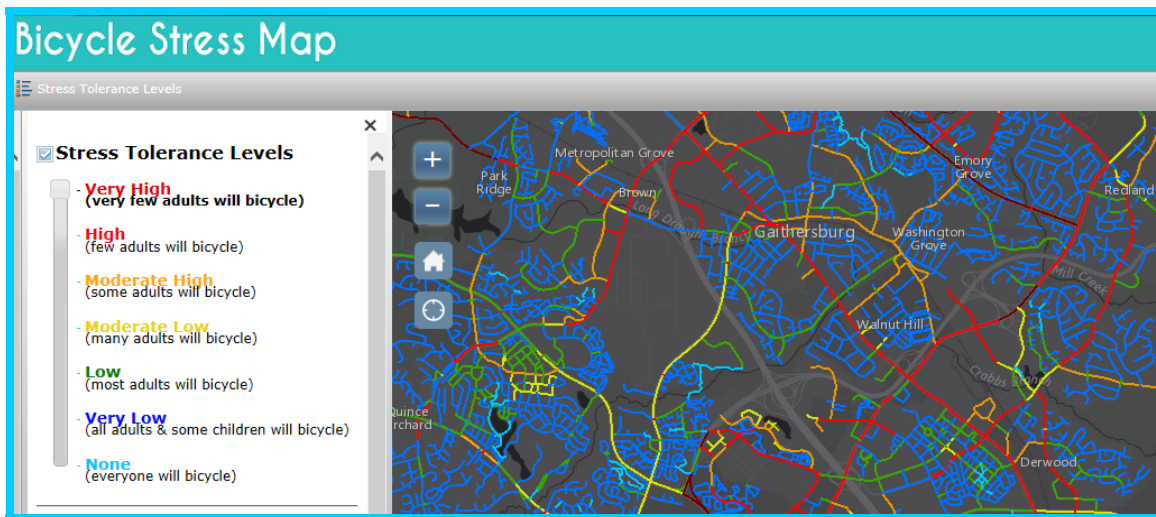


Figure 55 : Carte illustrant le niveau de stress pour les cyclistes au nord de la capitale américaine (Réf.: 63).

Il s'est révélé après l'analyse de cette carte de stress du réseau cyclable du comté du Montgomery que les pistes cyclables dans les axes très achalandés présentent une source de stress élevée. Aussi, le cycliste subit un stress élevé autour des stations du métro et, étonnamment, à proximité des stations de vélo en libre-service.

Cette méthodologie est basée sur une évaluation subjective et représente une valeur moyenne de stress sur un tronçon donné. Par conséquent, elle contient une marge d'imprécision plus ou moins importante. Pour offrir une évaluation impartiale et précise, des chercheurs ont développé des méthodologies basées sur la mesure directe du niveau du stress pendant le parcours du cycliste. Cette approche, qui permet l'étude du comportement des cyclistes dans leur environnement naturel, utilise des équipements de collecte de données discrets et peu encombrants.

Une des premières réalisations est le fruit des travaux d'une étudiante du *Massachusetts Institute of Technology*, qui a, en 2010, équipé son casque de vélo d'un enregistreur des ondes émises par le cerveau durant ses déplacements sur un réseau donné. Ce casque nommé *MindRider* enregistre l'activité cérébrale du cycliste en temps réel et permet de cartographier les endroits du parcours où le cycliste est en situation de stress. Un électroencéphalogramme (EEG) intégré au casque enregistre l'activité électrique du cerveau par des électrodes. L'EEG reconnaît jusqu'à 10 signaux différents envoyés par le cerveau qui peuvent être reliés à la concentration, l'anxiété, la peur ou la panique. Chaque état émotionnel capté par l'EEG est relié à un système de couleur qui simplifie la représentation du

niveau du stress. Une lumière rouge signifie que le stress est élevé, alors qu'une lumière verte indique un faible niveau de stress. Si la lumière rouge clignote, ceci indique un état de panique.

À toutes les secondes, les signaux captés par l'EEG sont envoyés via Bluetooth au téléphone mobile. Une application associée à chaque signal une référence GPS et les données sont transmises par le téléphone mobile à un ordinateur où elles sont enregistrées pour un traitement ultérieur.



Figure 56 : Le casque MindRider montrant l'instrument EEG (sur l'oreille gauche) et les signaux lumineux associés au niveau de stress ressenti (Réf. : 64).

La jeune chercheuse avec l'aide de huit cyclistes ont sillonné Manhattan pendant deux mois, ce qui a permis de produire la carte du quartier et d'identifier les endroits où les cyclistes sont le plus détendus et ceux où ils sont le plus stressés.



Figure 57 : Le niveau de stress relevé par le MindRider sur un parcours entre Brooklyn et Manhattan (Réf.: 65)

En 2016, une équipe de chercheurs de l'université de Portland (Réf. : 66) a développé une méthode de mesure du stress basée sur l'activité cutanée. L'application de cette méthode a nécessité l'utilisation de quatre caméras attachées au casque du cycliste, ce qui permet un enregistrement vidéo à 360 degrés. Donc, une fois les caméras synchronisées, l'équipe de chercheurs a accès à une vue globale de l'environnement du cycliste. Aussi, un instrument pour mesurer des données physiologiques a été utilisé : il s'agit du GSR (Galvanic Skin Response ou Réaction Cutanée Galvanique). Cet instrument mesure l'activité électrodermale à la surface de la peau qui reflète l'activité des glandes sudoripares et du système nerveux autonome. Par conséquent, elle permet d'étudier le comportement de l'individu après un stimulus. Le GSR est l'indice physique le plus employé comme mesure des troubles émotifs. Un changement dans les propriétés électriques de la peau en réponse au stress ou à l'anxiété est mesuré par l'enregistrement de la résistance électrique de la peau.



Figure 58 : Les caméras d'enregistrement vidéo et l'instrument d'enregistrement de l'activité électrodermale (Réf.: 66)

Un vélo instrumenté muni d'un capteur de puissance (Power meter) a été utilisé, permettant de mesurer la puissance développée par le cycliste, le torque, la vitesse, la distance parcourue et la cadence de pédalage. Aussi, un thermomètre installé sur le vélo enregistrerait tout le long du parcours la température ambiante. En combinant les données de performance du cycliste et la température ambiante, les chercheurs ont pu isoler l'influence de l'effort et de la chaleur sur les résultats du GSR. Finalement, un téléphone intelligent a été utilisé pour enregistrer les données GPS le long du parcours et ainsi localiser géographiquement l'ensemble des données collectées.

Les données ont été recueillies durant une semaine par cinq cyclistes sur un parcours d'environ 8 km au centre de la ville de Portland (Oregon). Ce parcours est constitué de quatre différents milieux. Une section sans présence d'infrastructure pour les cyclistes, une section avec voie cyclable sur rue en rive et deux pistes cyclables en site propre dont la deuxième a plus d'activité piétonnière.

Selon les résultats de cette analyse, les cyclistes ressentent plus de stress quand ils roulent près du trafic motorisé, quand la piste cyclable est bloquée par un véhicule, quand le cycliste s'approche d'une intersection achalandée et quand il y a un volume élevé de cyclistes et de piétons sur la piste cyclable.

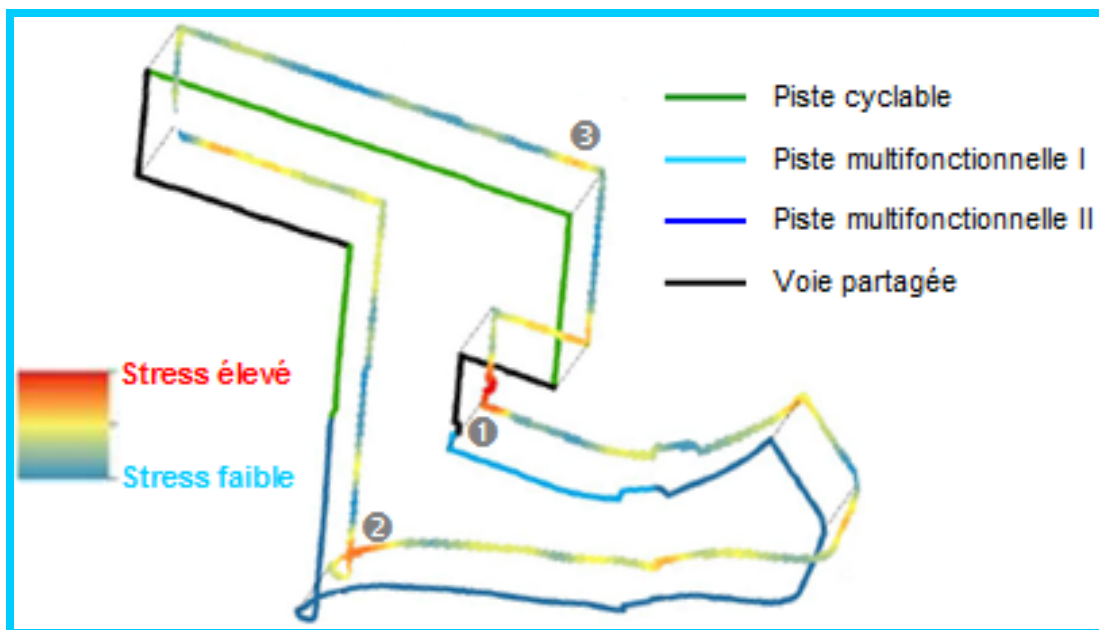


Figure 59 : Niveau de stress selon différents types d'infrastructures cyclables
(Réf.: 66)

Sur cette figure, il est clair que le passage de la voie multifonctionnelle I à la voie partagée ❶ augmente considérablement le stress ressenti par les cyclistes. Le croisement entre les deux infrastructures se fait par une intersection achalandée. Aussi, au point ❷, un virage serré sur une rampe montante augmente le niveau de stress des cyclistes. Finalement, même sur la piste cyclable, le cycliste ressent plus de stress lorsqu'il arrive à une section où la piste cyclable n'est plus protégée par les véhicules stationnés qui constituent une protection supplémentaire ❸.

L'analyse réalisée par l'équipe de chercheurs a démontré que les cyclistes sont sensibles aux conditions du trafic. Ainsi, le niveau du stress des cyclistes augmente de 1,75 fois durant la période de pointe par rapport à la période hors pointe. Aux intersections, l'augmentation du stress est de 1,70 par rapport à une section courante. En ce qui concerne le niveau du stress en fonction du type de l'infrastructure, les résultats, quand le trafic est modéré, montrent que les voies partagées sont une source importante de stress, suivies des pistes cyclables en rive et finalement des pistes cyclables en site propre.

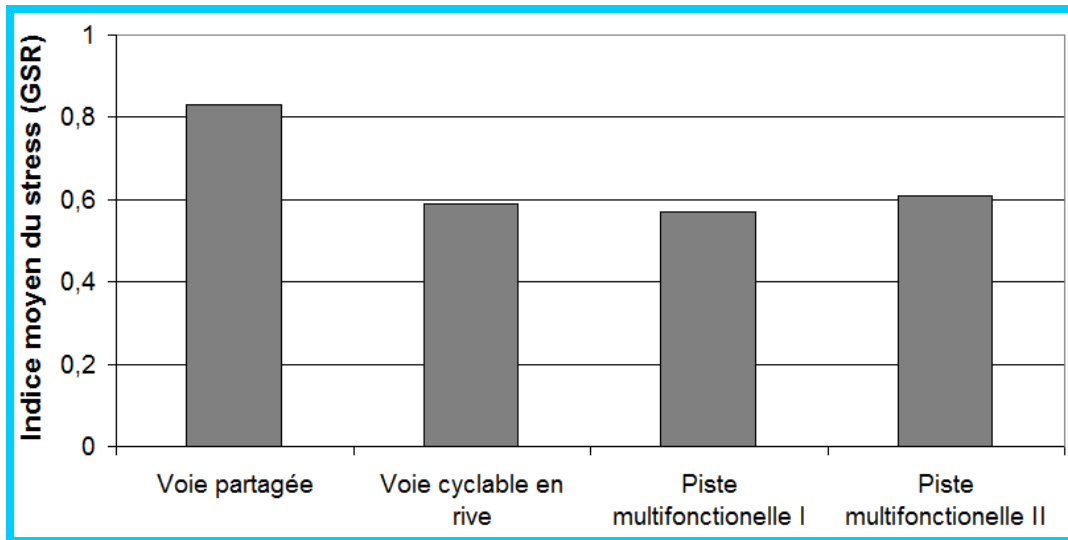


Figure 6o : Le niveau de stress selon le type de l'infrastructure (*Réf.: 66*)

Que l'évaluation du stress sur un réseau donné soit déterminée par des mesures de l'activité cérébrale ou par l'activité cutanée ou par d'autres mesures physiologiques, les résultats qui en découlent ne peuvent que contribuer à améliorer le trajet quotidien des cyclistes en devenant un intrant dans la planification des réseaux cyclables.

MODÉLISATION DE LA CIRCULATION DES VÉLOS

Dans plusieurs villes à travers le monde, l'utilisation du vélo est en constante croissance. De nouvelles réalités sont nées de l'accroissement fulgurant de l'usage du vélo comme mode de transport. Ainsi, le vélo n'est plus réservé qu'au loisir en fin de semaine, mais son usage utilitaire dépasse dorénavant son usage récréatif. De plus, on commence à observer sur certains axes cyclables un phénomène de congestion, c'est-à-dire des situations où des pelotons de vélos se forment et les cyclistes y sont contraints de se suivre en file indienne vu la densité des cyclistes et l'absence d'opportunité de dépassement. C'est le cas notamment de la piste cyclable de la rue Brébeuf à Montréal (Québec, Canada), où l'auteur a recueilli des données pour analyser certaines facettes de la circulation des vélos.

Le besoin de développer des méthodes et des outils pour assister l'ingénieur et le planificateur dans l'analyse de la performance de ce mode de transport est de plus en plus justifié. Certes, déjà des chercheurs ont amorcé ce travail, mais, comparativement à ce qui a été réalisé pour le transport motorisé, on est encore dans les premiers pas de la science de circulation pour le mode vélo. Ce chapitre est basé sur deux publications réalisées par l'auteur et qui ont été présentées à deux congrès sur les transports en 2013 à Washington DC. et en 2014 à Portland en Oregon (Réf. : 67, 68).

La science de la circulation étudie aussi bien le comportement statique que dynamique du cycliste et fait le lien entre son comportement et l'environnement de conduite. Elle s'intéresse plus particulièrement aux effets des infrastructures, des moyens de gestion de la circulation, de l'intensité et de la nature du trafic et des caractéristiques physiques et cinématiques du vélo sur la conduite et la prise de décision. Ainsi, la science de la circulation couvre un large domaine et met en lien divers aspects tels qu'illustrés sur la figure 61.

Si la théorie utilisée reste relativement similaire pour les modes motorisés et le vélo, il reste néanmoins qu'il y a des différences fondamentales qui influencent le développement de la science de la circulation du vélo.

- Alors que l'automobile et les autres modes motorisés sont autopropulsés, la cinétique du vélo dépend exclusivement de la force musculaire du cycliste. Cette force musculaire est la somme des forces anaérobiques et aérobiques produites par le système de production d'énergie du corps humain.

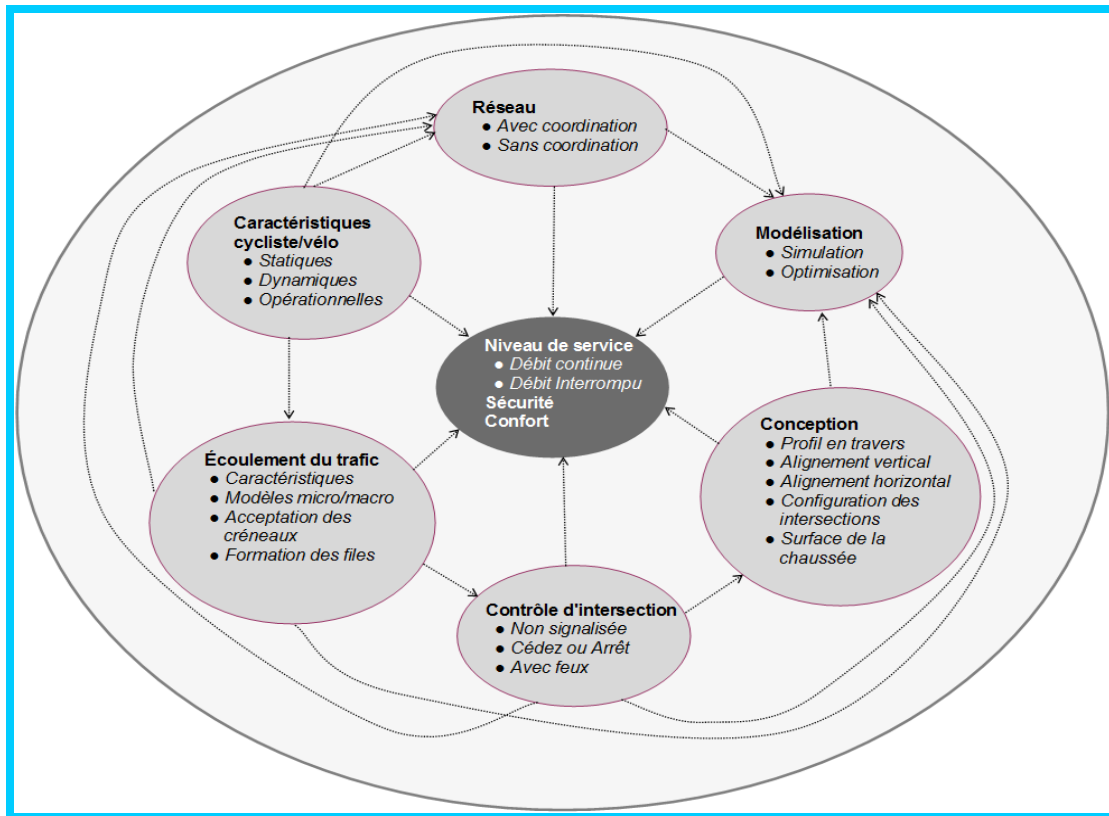


Figure 61 : Univers simplifié de la science de la circulation

- Du point de vue cinématique, le système cycliste-vélo est instable aussi bien dans son mouvement longitudinal que latéral. Longitudinalement, l'accélération du cycliste est très fluctuante, car si en moyenne il peut appliquer une certaine force, à chaque coup de pédale, cette force fluctue. Le profil d'accélération du vélo se caractérise par une forte fluctuation comparativement à l'accélération de l'automobile qui est relativement plus stable. Latéralement, même en ligne droite, le vélo est en constant déséquilibre provoqué par un décalage du centre de gravité qui est en partie dû au pédalage.
- Le système cycliste-vélo se caractérise par un aspect unique aux deux-roues. Il s'agit de sa manœuvrabilité ou de son agilité. Ce facteur, qui pourra s'avérer difficile à modéliser, pourra avoir un impact important sur la détermination de la capacité de l'infrastructure cyclable et aussi sur l'aspect sécurité. Les cyclistes ne se suivent pas toujours en file indienne quand les opportunités de dépassement sont rares. Contrairement à l'automobiliste qui est contraint à respecter une certaine distance sécuritaire et rester en file derrière le véhicule qui le précède à l'intérieur de la voie, le cycliste peut parfois se laisser déporter pour rouler à côté du cycliste qui le précède, mais juste en retrait sans toutefois le dépasser. Il s'agit dans la plupart du temps, d'une préparation pour un dépassement dès que les conditions le permettront. Ce phénomène est

accentué quand la largeur de la voie cyclable dépasse 1,5 m. Des fois, le cycliste peut même sortir momentanément de l'infrastructure désignée pour dépasser (par exemple rouler sur le trottoir) et revenir plus loin sur la piste cyclable. Il y a bien sûr un facteur risque que chaque cycliste est prêt à assumer quand il s'engage dans ces manœuvres, mais les observations sur le terrain montrent que la majorité des cyclistes préfèrent se suivre de façon sécuritaire sans prise de risque inutile.

Pour modéliser la circulation des vélos, deux approches sont empruntées de la science de la circulation classique. Il s'agit de l'approche microscopique et de l'approche macroscopique. L'approche microscopique, qu'on appelle aussi modélisation microscopique, essaie de reproduire le comportement individuel de chaque cycliste dans le peloton durant son déplacement, mais, en tenant compte de son interaction avec les autres cyclistes à proximité et avec son environnement immédiat. Cette approche permet d'analyser très finement un certain nombre de facteurs qui influencent notamment la sécurité, le confort et la fluidité. Elle permet aussi de concevoir les modèles de simulation pour ce mode. Quant à l'approche ou la modélisation macroscopique, elle reproduit le comportement du groupe de cyclistes sans distinction des individus. Elle permet entre autres d'analyser la capacité de l'infrastructure et son niveau de service.



Figure 62 : Piste cyclable achalandée à Montréal où les possibilités de dépassement sont limitées en périodes de pointe

① La modélisation microscopique du comportement du cycliste

Plus la circulation du vélo est dense, plus le cycliste devra évaluer sa situation et prendre des décisions en continu en fonction de son environnement immédiat. Il a

été constaté pour les véhicules motorisés que les conducteurs sont au moins à 80 % du temps en situation de poursuite en milieu urbain, c'est-à-dire que le conducteur doit ajuster sa conduite en fonction du véhicule qui se trouve immédiatement devant lui. Avec l'accroissement de l'usage du vélo, on pourra s'attendre à ce que cette proportion finisse par s'appliquer à la circulation du vélo, d'où l'importance de modéliser un élément fondamental dans la science de la circulation, soit la Loi de la poursuite. La Loi de la poursuite, connue sous l'appellation en langue anglaise de « Car-following », permet dans un seul modèle mathématique de combiner directement ou indirectement les caractéristiques physiques et opérationnelles du vélo (longueur, accélération et vitesse), les facteurs humains (perception, décision et action) et l'environnement immédiat du cycliste (trafic lourd, modéré ou écoulement libre). La Loi de la poursuite est formulée selon une logique psychophysique :

$$\text{Réaction}_{(t+\Delta t)} = f(\text{Sensibilité}_{(t)}, \text{Stimulus}_{(t)})$$

La réaction est celle du cycliste et se manifeste soit en terme d'accélération ou de décélération ; la sensibilité est un facteur qui reflète l'intensité de la réaction du cycliste face au stimulus perçu et le stimulus est souvent exprimé en terme de différence entre les vitesses des deux cyclistes qui se suivent, appelée aussi vitesse relative.



Figure 63 : Illustration des principaux paramètres décrivant le mouvement d'une paire de cyclistes (L, pour *Leader* et F, pour *Follower*)

Depuis la fin des années 50, on peut recenser une centaine de modèles mathématiques représentant la Loi de la poursuite. Ces modèles ont été développés initialement pour la compréhension de la dynamique du trafic automobile et principalement, le phénomène de la congestion. Ils ont été aussi

utilisés pour diagnostiquer les accidents et identifier les comportements des conducteurs qui contribuent à ces accidents. Il y a eu aussi, depuis la fin des années 60, une utilisation accrue de ces modèles dans les simulateurs microscopiques du trafic. Actuellement, la simulation microscopique est intensément utilisée pour la planification, la formation et la recherche. Depuis le milieu des années 90, elle fait partie intégrante du développement des systèmes de transport intelligent (STI).

Les modèles représentant la Loi de la poursuite peuvent être groupés en six catégories selon les concepts adoptés lors de leur développement. Le tableau suivant présente ces catégories ainsi que les concepts qui les distinguent.

Tableau 8 : Les six catégories de la Loi de poursuite

Catégorie	Concept
Stimulus-Réaction (Chandler, 1958)	La réaction du conducteur est proportionnelle au stimulus qu'il perçoit. Le stimulus est défini par la vitesse relative et l'ampleur de la réaction qui se produit après un laps de temps est fonction du facteur de sensibilité
Espacement sécuritaire (Kometani & Sasaki, 1959 ; Gipps, 1981)	La réaction du conducteur suiveur est fonction d'une vitesse sécuritaire déterminée selon le taux maximum de décélération (freinage d'urgence) et selon l'espacement disponible
Psycho-physique ou Point d'action (Todosiev, 1963)	La réaction du conducteur suiveur est fonction de l'accélération du conducteur suivi et de la différence entre l'espacement actuel et l'espacement désiré
Automate cellulaire (Nagel, 1992)	Le conducteur suiveur suit une règle binaire et se déplace d'une section de la route à l'autre si les règles préétablies sont vérifiées
Vitesse optimale (Bando, 1995)	La réaction du conducteur suiveur est proportionnelle à la différence entre sa vitesse optimale pour un espacement donné et sa vitesse actuelle
Équivalence des trajectoires (Newell, 2002)	Le conducteur suiveur mime le conducteur suivi avec cependant une translation dans le temps et dans l'espace

Afin d'examiner et de modéliser le comportement du cycliste sur une piste cyclable par la Loi de la poursuite, les trajectoires dans le temps et dans l'espace d'une paire de cyclistes en situation de poursuite ont été relevées par un appareil GPS, le *Forerunner 305* de la compagnie *Garmin*. Cet appareil, développé pour les activités sportives, s'est avéré très performant pour le relevé des données que ce soit pour des déplacements en vélo ou en automobile. Chaque seconde, l'appareil fournit la vitesse, la distance parcourue et l'altitude de chaque cycliste formant la paire.

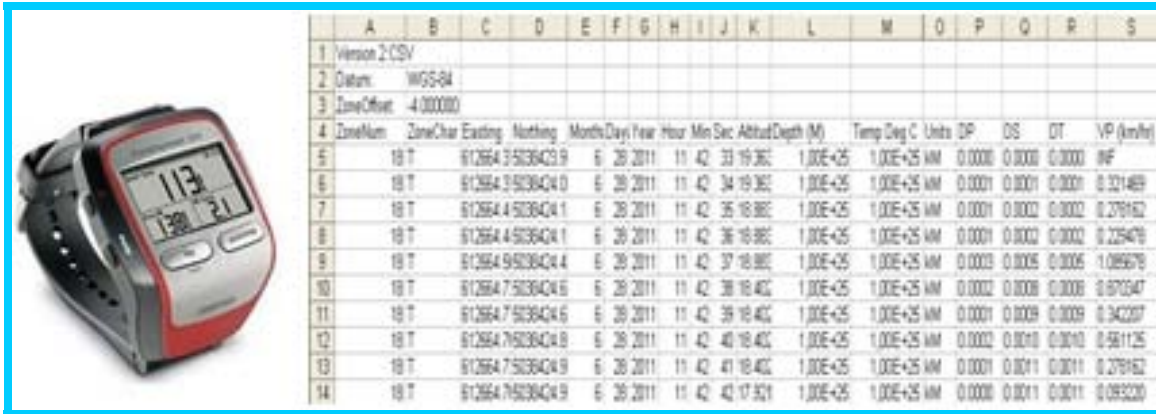


Figure 64 : Données dynamiques captées par l'appareil Forerunner 305

Deux appareils synchronisés au point de départ et portés au poignet de chaque cycliste ont permis l'enregistrement des données sur une portion de 1,7 km sur la piste cyclable longeant le canal Lachine dans l'arrondissement du sud-ouest de Montréal (figure 65). Les données brutes sont par la suite compilées et traitées afin de construire le diagramme espace-temps. Ce diagramme très riche en information permet de calculer une importante panoplie de paramètres qui expliquent, sous différents angles, le comportement du cycliste. La figure suivante montre le parcours emprunté durant l'expérimentation et les trajectoires espaces-temps relevées des deux vélos.

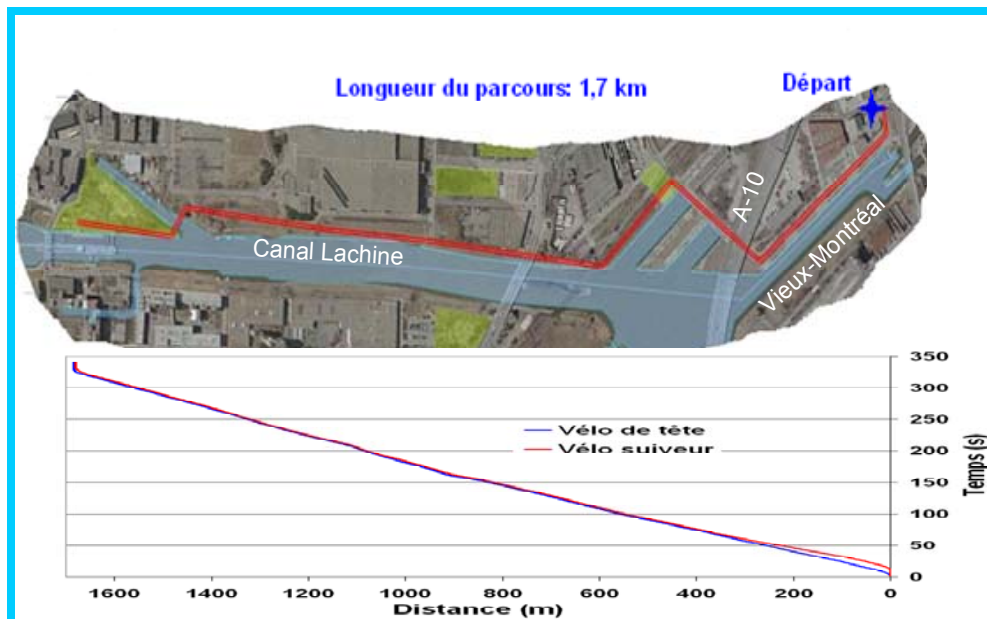


Figure 65 : Parcours emprunté par la paire de cyclistes et le diagramme espace-temps

Les relevés par GPS ont permis de reproduire les comportements des deux cyclistes durant le parcours. La figure 66 montre la progression de la paire de vélos, les profils de vitesse et de l'accélération ainsi que les espacements maintenus entre les deux vélos durant le parcours.

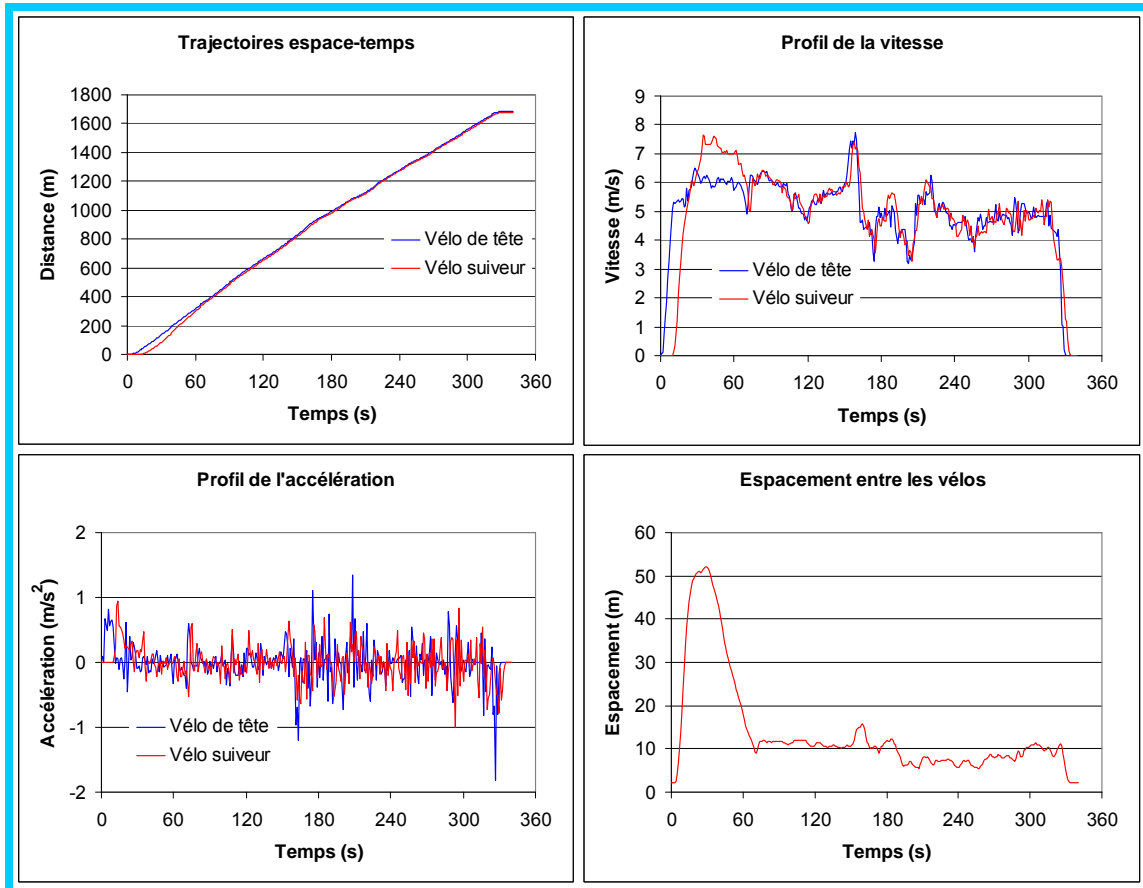


Figure 66 : Données informatives sur le parcours des cyclistes

On peut constater sur la figure précédente une certaine corrélation entre le comportement dynamique des deux cyclistes, surtout quand l'espacement qui les sépare est réduit, soit dans ce cas, à partir d'environ la soixantième seconde. À ce moment, le cycliste suiveur est forcé de s'ajuster à la vitesse du cycliste qui le précède puisqu'il ne pouvait pas le dépasser (la consigne au cycliste suiveur était de partir 10 secondes après le départ du premier cycliste, de le rattraper et de le suivre normalement sans le dépasser).

Il existe donc une distance entre les cyclistes, au-delà de laquelle, le cycliste suiveur se déplace librement et en deçà de laquelle, le cycliste ajuste son comportement à celui du cycliste qui le précède afin de maintenir une distance sécuritaire tout en essayant d'atteindre sa vitesse désirée. Cette prémisse peut être démontrée avec le graphique du « plan de phases » (figure 67) qui met en relation la vitesse relative (différence des vitesses des deux cyclistes en situation de

poursuite) et l'espacement qui les séparent. Le plan de phases est emprunté de l'astronomie où il est utilisé pour étudier le mouvement des planètes.

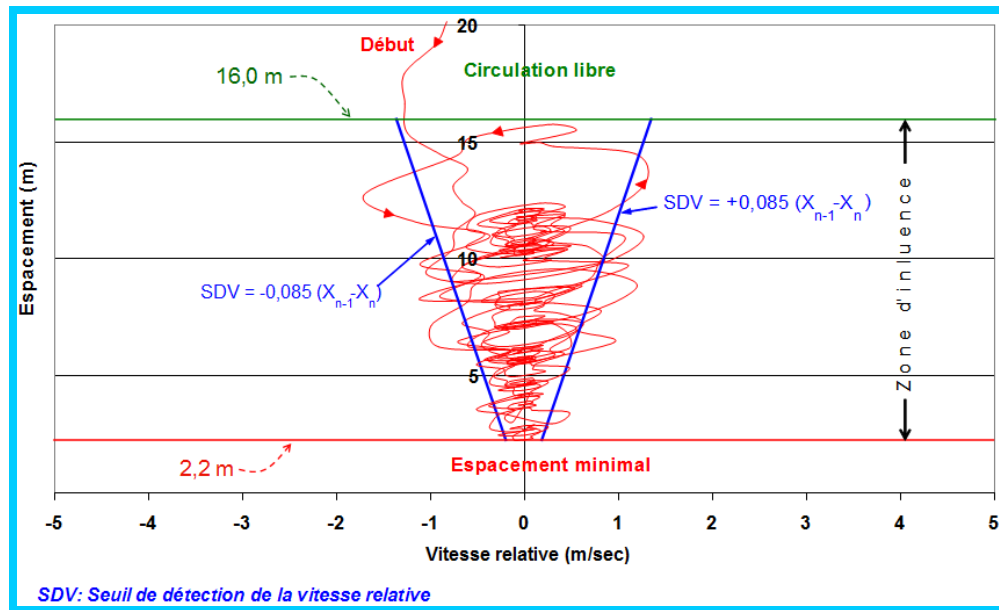


Figure 67 : Trajectoires du Plan de phases pour deux cyclistes en situation de poursuite

On constate que le cycliste suiveur pénètre dans la zone d'influence du cycliste suivi quand l'espacement est environ 16 m. Inconsciemment, le cycliste suiveur essaie de minimiser l'écart entre sa vitesse et la vitesse du cycliste qui le précède tout en maintenant un espacement sécuritaire et confortable selon sa vitesse de déplacement. Donc, le cycliste effectue plusieurs cycles d'accélération/décélération pour se rapprocher de son point d'équilibre situé le long de l'axe de l'espacement autour d'une vitesse relative égale à zéro. Une vitesse relative nulle signifie que la vitesse des deux cyclistes en poursuite est égale.

Or, pour que le cycliste s'ajuste, il doit être conscient pendant tout le temps qu'il est en situation de poursuite, qu'il s'éloigne de son point d'équilibre. Cette information lui est transmise par le paramètre psychophysique qu'on appelle le « seuil de détection de la vitesse » (SDV). Il s'agit du niveau minimal de changement de la vitesse relative qui est perceptible par le cycliste. À partir de ce seuil, le cycliste devient conscient qu'il s'éloigne de son point d'équilibre. Dans le cas où il s'éloignerait négativement de son point d'équilibre, il va augmenter sa propre vitesse et dans le cas où il s'éloigne positivement de son point d'équilibre il va réduire sa vitesse. L'équation développée par Evans (Réf. : 69) pour les automobilistes a été adaptée pour représenter le cas du trafic cycliste.

Sur la même figure, on observe un espacement minimal de 2,2 m que le cycliste garde en tout temps pour ne pas entrer en collision avec le cycliste devant lui, bien

sûr dans le cas où il ne peut le dépasser. Cet espacement minimal correspond à la longueur standard d'un vélo (1,85 m) plus le créneau minimal en termes de distance lorsque les cyclistes sont arrêtés. Selon les données recueillies durant cette expérience, le créneau minimal à l'arrêt est d'environ 0,35 m.

Le tableau 9 présente les six modèles de la Loi de la poursuite utilisés pour reproduire le comportement du cycliste suiveur en fonction du comportement du cycliste devant lui. Les quatre premiers modèles ont été développés spécifiquement pour la circulation automobile alors que les deux derniers l'ont été formellement pour la circulation du vélo.

Tableau 9 : Différents modèles de la Loi de la poursuite utilisés pour reproduire le comportement des cyclistes (Réf. : 67, 68)

Modèle	Formulation
Chandler	$a_n(t+T) = \lambda \left[v_{n-1}(t) - v_n(t) \right]$
Gazis	$a_n(t+T) = \alpha \frac{v_n(t)^m}{\left[x_{n-1}(t) - x_n(t) \right]^l} \left[v_{n-1}(t) - v_n(t) \right]$
Pipes	$a_n(t+T) = CW \frac{v_{n-1}(t) - v_n(t)}{\left[x_{n-1}(t) - x_n(t) \right]^2}$
Gipps	$v_n(t+T) = \text{Min} \left\{ \begin{array}{l} v_n(t) + 2,5aT(1-v_n(t)/V) \sqrt{0,025 + v_n(t)/V} ; \\ bT + \left[b^2T^2 - b \left\{ \begin{array}{l} 2[x_{n-1}(t) - x_n(t) - s] - v_n(t)T \\ - v_{n-1}(t)^2/b^* \end{array} \right\} \right]^{1/2} \end{array} \right\}$
Raksuntorn	$v_n(t+\Delta t) = \alpha_1 v_n(t) + \alpha_2 \left[x_{n-1}(t) - x_n(t) \right] + \alpha_3 \left[v_{n-1}(t) - v_n(t) \right]$
Manar	$v_n(t+T) = \text{Min} \left\{ V_f ; \delta \left(x_{n-1}(t) - x_n(t) - S_j \right) \right\}$

Les trois premiers modélisent l'accélération et les trois derniers modélisent la vitesse. Le modèle proposé par l'auteur (Manar) incorpore deux contraintes. Une première contrainte qui tient compte de l'espacement minimal (S_j), soit l'espacement entre deux cyclistes en situation d'arrêt. Une deuxième contrainte limite la vitesse de déplacement du cycliste à la vitesse d'écoulement libre, c'est-à-

dire quand il n'est pas gêné par la présence d'autres cyclistes. L'hypothèse retenue est que cette vitesse correspond au 85^e centile des vitesses observées.

Quant au processus de calibration, il a consisté à optimiser les valeurs des paramètres des modèles, selon une méthode itérative dont la fonction objective est de minimiser la somme des écarts au carré. Cet exercice d'optimisation a permis de reproduire le plus fidèlement possible les quatre variables qui décrivent le comportement microscopique du cycliste suiveur en fonction du comportement réel du cycliste suivi. Ces variables sont la vitesse, l'accélération, la position à chaque seconde et l'espacement entre les deux vélos. De plus, pour chacune des variables, on a calculé la régression entre les valeurs observées et théoriques et on a obtenu ainsi la valeur de la pente de la régression (avec une constante égale à 0) et son coefficient de corrélation multiple (R^2). Aussi, la statistique de Fisher (F) a été calculée pour évaluer la similitude entre les valeurs observées et théoriques. Le tableau 10 présente les paramètres optimisés ainsi que les statistiques de comparaison entre les données observées et théoriques.

Tableau 10 : Comparaison statistique des résultats des modèles retenus

Modèles Paramètres		Chandler	Gazis	Pipes	Gipps	Raksuntorn	Manar
		Paramètres optimisés	$\lambda = 1,7$	$\alpha = 1,7$ $m = 0,01$ $l = 0,17$	CW = 680	$a = 2,0$ $T = 1,0$ $V = 10,0$ $s = 3,0$ $b = -2,0$ $b' = -2,0$	$\alpha_1 = 0,96$ $\alpha_2 = 0,02$ $\alpha_3 = 0,35$
Vitesse	Pente	0,999	1,008	1,006	0,994	1,000	0,995
	R^2	0,971	0,981	0,978	0,976	0,985	0,972
	F_{cal}/F_{crit}	0,860	0,934	0,909	0,866	0,929	0,935
Position	Pente	1,010	1,012	1,011	1,000	1,000	0,999
	R^2	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999
	F_{cal}/F_{crit}	0,800	0,800	0,801	0,794	0,790	0,796
Accélération	Pente	0,346	0,914	0,646	0,752	1,387	1,105
	R^2	0,935	0,957	0,936	0,915	0,832	0,930
	F_{cal}/F_{crit}	0,111	0,637	0,326	0,729	0,932	0,515
Espacement	Pente	0,656	0,585	0,605	1,315	1,356	0,534
	R^2	0,594	0,599	0,588	0,703	0,838	0,860
	F_{cal}/F_{crit}	7,752	3,089	8,094	1,467	0,849	1,307

Le ratio 'Fisher calculé/Fisher critique ≤ 1 ', signifie qu'on accepte l'hypothèse que les variances des valeurs observées et des valeurs théoriques ne sont pas statistiquement différentes pour un niveau de confiance de 99% ($\alpha = 0,01$; $D_f = 340$).

On constate que globalement, l'ensemble des modèles peuvent reproduire assez bien le comportement du cycliste en situation de poursuite. Statistiquement, tous les modèles sont significatifs pour reproduire la vitesse, la position et l'accélération du cycliste suiveur. Cependant, pour la reproduction de l'espacement entre les deux cyclistes en poursuite, seul le modèle Raksuntorn produit un résultat significatif. La figure 68 montre les résultats des simulations selon les six modèles retenus, pour les vitesses (68-a), les accélérations (68-b) et les espacements (68-c). Les résultats simulés sont comparés aux profils observés des cyclistes obtenus par l'appareil GPS. Aussi, si on retranche des données GPS les premières 70 secondes, durant lesquelles le cycliste suiveur tente de rejoindre le cycliste suivi (figure 68-d), tous les modèles performant bien pour reproduire les espacements observés.

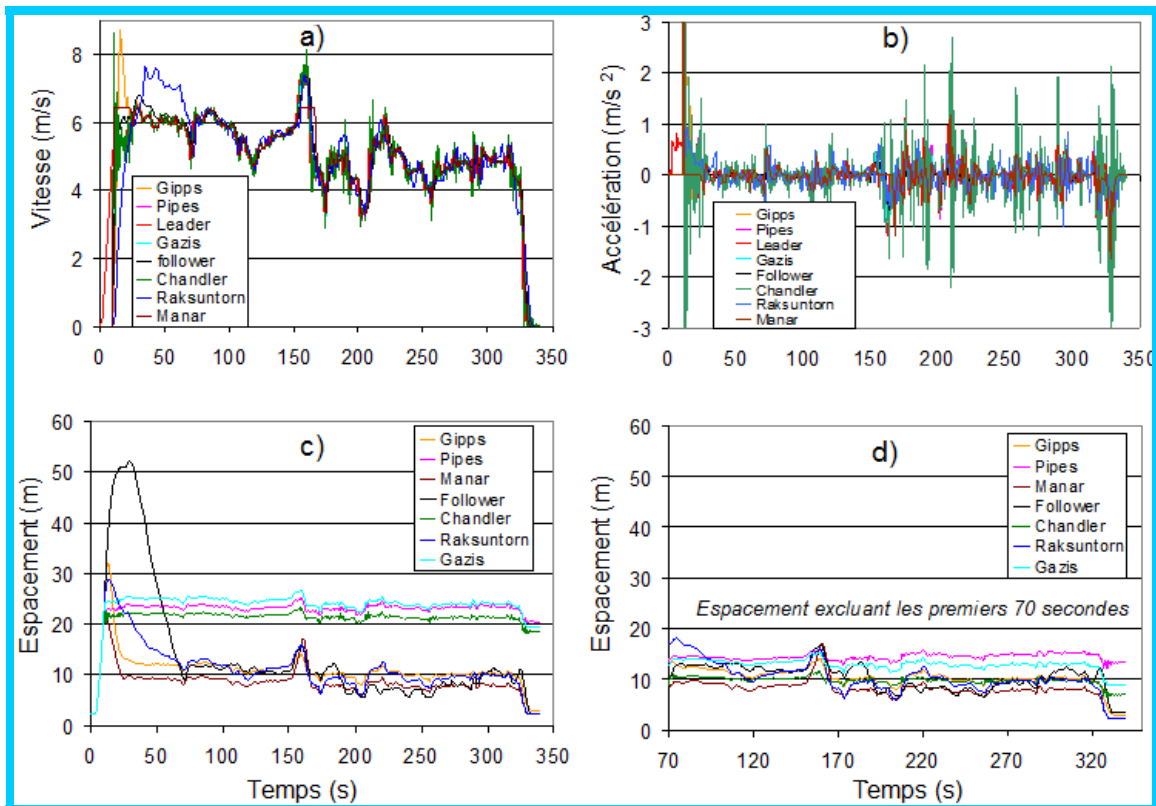


Figure 68 : Résultats des simulations des différents modèles de poursuite appliqués au vélo

Ainsi, la logique de conduite des automobiles qui a servi au développement des modèles de poursuite est aussi valable pour reproduire le comportement microscopique du cycliste. Pour les deux modes, la différence des vitesses ou vitesse relative ainsi que l'espacement sont les variables déterminantes dans le processus de conduite, que ce soit pour l'automobile ou le vélo.

② La modélisation macroscopique du trafic vélo

À l'aide d'une caméra vidéo, des données ont été relevées en 2011 sur la piste cyclable bidirectionnelle de 3 mètres de large localisée sur la rue de Brébeuf à Montréal. Cette piste très achalandée, située au cœur de Montréal dans le Plateau, est sujet régulièrement à la congestion aux heures de pointe. Les données relevées sont les temps de passages de chaque vélo traversant les extrémités d'une zone de 2 mètres. Une caméra fixée sur une perche de 6 mètres filmait le flot des vélos durant la période de pointe de l'après-midi. Environ 300 paires de vélos ont été enregistrées et les données ont été extraites manuellement du film par l'utilitaire « Movie Maker » de la compagnie Microsoft qui permet un traitement séquentiel de 30 images par seconde. La figure 69 montre l'installation de la caméra sur le site, la vue prise par la caméra et l'utilitaire de traitement du film.



Figure 69 : Site et équipement de prise de la vidéo et logiciel d'analyse

Ainsi, on a pu obtenir de façon assez précise, les vitesses individuelles des vélos, les espacements, les créneaux entre les vélos en termes de distance et de temps ainsi que les accélérations (voir la figure 63 pour la définition des termes). Ces données de nature microscopiques permettent d'obtenir, par des transformations mathématiques, des données de nature macroscopiques telles que les débits, la densité et la vitesse. Les données recueillies ont permis de fournir une information riche sur les caractéristiques dynamiques du cycliste et sur son comportement ainsi que sur les caractéristiques moyennes du flot des vélos.

Tableau 11 : Statistiques sur la dynamique des cyclistes

Paramètres	Minimum	Maximum	Moyenne	85 ^e centile	Écart-type
Vitesse (m/s)	2,00	8,00	5,67	6,42	0,99
Accélération (m/s ²)	0,00	1,34	0,20	0,40	0,21
Décélération (m/s ²)	-1,81	0,00	-0,20	-0,03	0,22
Espacement (m)	2,89	62,91	14,78	24,93	10,09

Les données relevées sur la piste cyclable ont permis de modéliser la relation fondamentale du trafic. Il s'agit de mettre en relation les trois variables qui sont le débit, la vitesse et la densité. Cette relation permet de déterminer entre autres la capacité de l'infrastructure, la vitesse et la densité optimales qui permettent d'atteindre cette capacité. Le concepteur pourra utiliser cette relation pour comparer différents scénarios de conception et prévoir ainsi les conséquences de chaque scénario sur la qualité du service offert aux cyclistes. La capacité est le nombre maximum de vélos qui peuvent passer à un point donné le long de la piste cyclable pendant une unité de temps, exprimée généralement en vélos par heure. La densité est le nombre de vélos se trouvant sur une section de chaussée à un moment donné, elle est exprimée en vélos par kilomètre. La vitesse moyenne de déplacement du flot des vélos est obtenue en divisant le débit par la densité, elle est exprimée en kilomètres par heure. Dans le cas où le flot des vélos est supérieur à la capacité, il y aura inévitablement de la congestion.

$$\text{Débit (vélo/h)} = \text{Vitesse (km/h)} * \text{Densité (vélo/km)}$$

La figure 70 illustre graphiquement la relation mathématique entre les trois variables décrites plus haut.

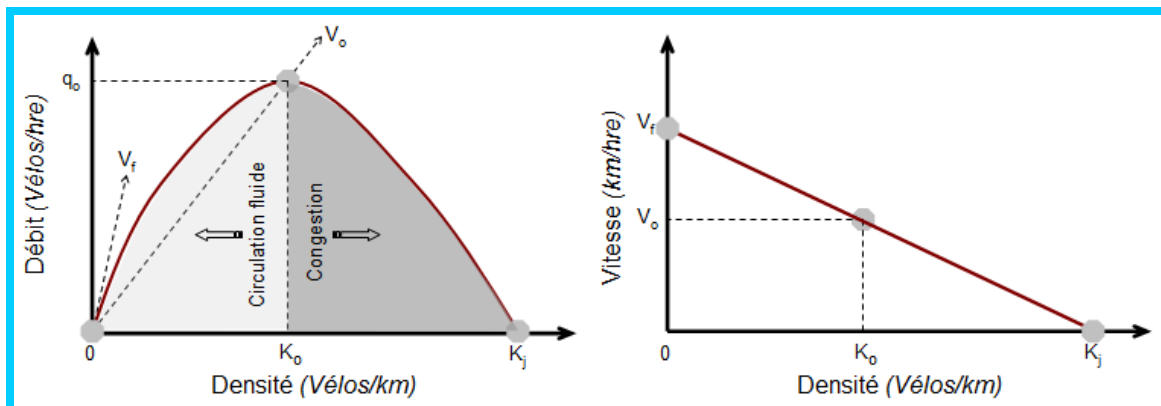


Figure 70 : La relation théorique entre les trois variables du trafic

On constate sur la partie gauche de cette figure qui illustre la relation Débit-Densité, qu'il y a trois valeurs limites qui donnent une forme parabolique à cette relation. Évidemment, en l'absence de tout trafic de vélo, le débit et la densité sont nulles. Plus l'achalandage sur la piste cyclable augmente, plus la densité et le débit augmentent. Cependant, la vitesse diminue avec l'augmentation de la densité. L'infrastructure atteint sa capacité (q_0) quand la densité et la vitesse atteignent des valeurs optimales (K_0 , V_0). Au-delà de cette densité optimale, les vélos disposent de moins en moins d'espace pour manœuvrer et le débit commence à diminuer. Il s'agit de conditions de congestion qui peuvent s'aggraver jusqu'à atteindre une «immobilité» complète du trafic du vélo (K_j). Cette immobilité est plutôt théorique, car en réalité, même dans des conditions extrêmes de congestion, le trafic continue à progresser, mais à des vitesses extrêmement basses. La partie à droite illustre la relation Vitesse-Densité. Cette relation a une forme linéaire décroissante. À partir d'une vitesse maximale (V_f) ou vitesse d'écoulement libre, la vitesse décroît avec l'augmentation de la densité des vélos jusqu'au point où la vitesse atteint des valeurs proches de zéro. La densité atteint à ce moment-là sa valeur maximale (K_j).

Sur le terrain, il est rare d'observer la capacité réelle d'une piste cyclable, car le flot des vélos est généralement faible. Pour déterminer la capacité théorique à partir des relevés réalisés sur le terrain, il a fallu utiliser le concept de «débit instantané». Il s'agit de multiplier les écarts en termes de temps entre chaque paire de cyclistes par 3600 et on obtient ainsi le débit. L'écart est la différence des temps de passage de deux cyclistes qui se suivent par rapport à un point fixe sur la chaussée. Le point fixe dans ce cas est l'espace délimité par les deux lignes rouges tracées sur la chaussée qu'on peut voir sur la figure 69. Il a fallu aussi déterminer la densité maximale de l'infrastructure (K_j). En partant du principe qu'un vélo nécessite un espace minimal de $3,16 \text{ m}^2$ pour manœuvrer, on obtient une densité maximale de $0,32 \text{ vélo/m}^2$, soit l'équivalent de 475 vélos/km pour une piste cyclable de $1,5 \text{ m}$ de largeur. Cet espace minimal est obtenu en multipliant l'espace de manœuvrabilité ($1,2 \text{ m}$) par la longueur du vélo ($1,85 \text{ m}$) plus le créneau moyen minimum, c'est-à-dire l'espace observé entre la roue arrière du vélo suivi et la roue avant du vélo suiveur à des vitesses très basses qui reflètent les conditions de congestion ($0,78 \text{ m}$).

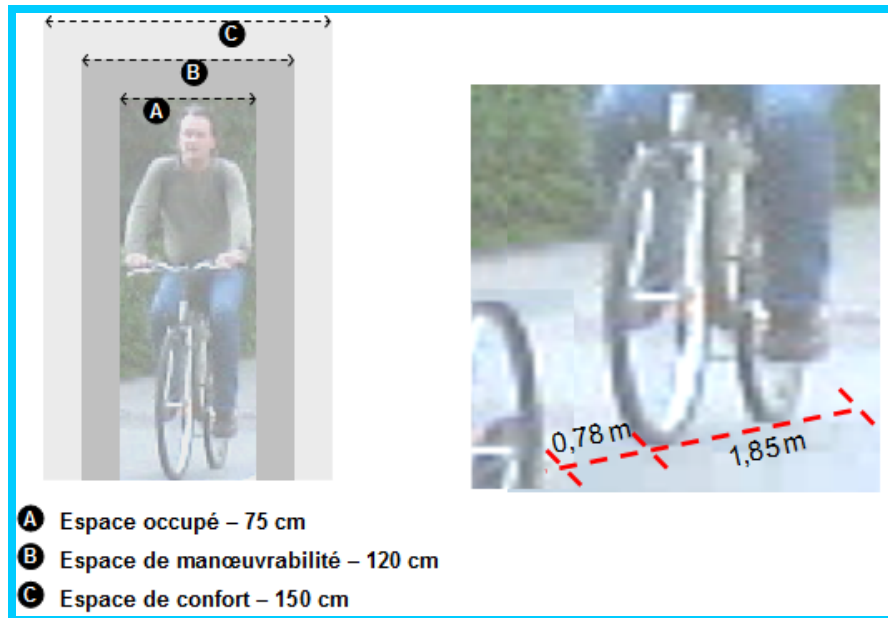


Figure 71 : Illustration des différents espaces requis pour la conduite du vélo

Ayant défini ces valeurs limites, on peut construire la relation fondamentale du trafic du vélo Débit-Densité, mais aussi la relation Vitesse-Densité. Ainsi, quatre modèles développés pour le trafic automobile ont été retenus pour modéliser cette relation. Le tableau 12 présente les modèles choisis ainsi que les valeurs optimisées de leurs paramètres.

Tableau 12 : Calibration des modèles macroscopiques (Réf.: 67, 68)

Modèle	Formulation	Paramètres optimisés
Newell	$v = v_f \left[1 - e^{-\frac{\lambda}{v_f} (1/k - 1/k_j)} \right]$	$v_f = 24$ $k_j = 475$ $\lambda = 13\ 200$
Pipes-Mujal	$v = v_f \left[1 - (k/k_j)^n \right]$	$v_f = 24$ $k_j = 475$ $n = 1,65$
Northwestern	$v = v_f e^{-1/2 (k/k_0)^\alpha}$	$v_f = 24$ $k_0 = 250$ $\alpha = 3,4$
Van Arde	$k = - \frac{1}{c_1 + \frac{c_2}{v_f - v} + c_3 v}$	$v_f = 24$ $c_1 = 0,00187135$ $c_2 = 0,00561404$ $c_3 = 0,00010046$

La calibration des modèles est faite sur la base de la minimisation de la somme des erreurs au carré entre les valeurs observées et théoriques. En ce qui concerne la relation Débit-Densité, il apparaît que les modèles Northwestern et Van Arde

performent mieux que les deux autres modèles. Par contre, en ce qui concerne la relation Vitesse-Densité, la corrélation des quarts modèles avec les données relevées sur le terrain est relativement faible. Ceci s'explique par la forte dispersion de la vitesse quand la circulation de vélo est fluide. Il s'agit en fait du reflet de la variation des capacités physiques des cyclistes composant cet échantillon. Dans tous les cas, la forme des relations expérimentales est totalement conforme aux bases théoriques attendues.

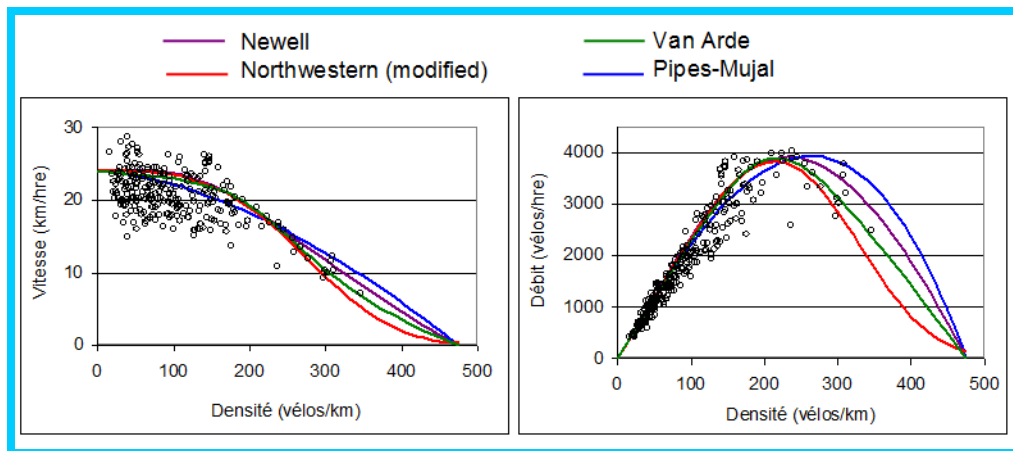


Figure 72 : Relations macroscopiques Vitesse-Densité et Débit-Densité. Les lignes représentent les modèles calibrés et les points sont les observations du terrain

Ainsi, la capacité directionnelle de la piste de la rue Brébeuf calculée (moyenne des quatre modèles) est de l'ordre de 3890 vélos/h (1,08 vélo/s). Cette capacité coïncide avec une vitesse optimale de 17 km/h (4,7 m/s) et une densité optimale de 230 vélos/km (0,15 vélo/m). Les valeurs de capacité reportées dans la littérature (Réf. : 70) varient de 1500 à 5000 vélos/h selon la largeur de la piste cyclable.

Comme dans le cas des modèles microscopiques, les modèles macroscopiques développés pour le trafic automobile sont bien adaptés pour modéliser le trafic des vélos au niveau macroscopique. Une calibration des paramètres des modèles est nécessaire pour tenir compte des différences dans les caractéristiques opérationnelles des deux modes. Ces modèles permettent entre autres de justifier l'augmentation de la capacité des voies cyclables et même de développer de nouveaux concepts d'infrastructures, tels les réseaux express vélo ou « bicycle superhighways ». Déjà en application aux Pays-Bas et au Danemark alors que d'autres pays ont récemment entamé le pas tel que l'Allemagne et la France. Ces infrastructures offrent une plus grande capacité et permettent de rouler à des vitesses plus élevées en toute sécurité (Réf. : 71).

VÉLO 2.0 – LE VÉLO DU 21^e SIÈCLE

Depuis deux décennies, on est témoin de l'introduction de l'intelligence artificielle dans une multitude d'objets quotidiens. Des téléphones intelligents, des montres intelligentes, des voitures intelligentes, des maisons intelligentes et même des villes intelligentes font désormais de plus en plus partie de notre vie de tous les jours... Et voilà arrivés les vélos intelligents !

Déjà, ici et là, l'électronique s'implante graduellement dans le vélo, améliorant ainsi la sécurité, le confort, l'information et l'expérience du cycliste. Après plus d'un siècle où le vélo consistait principalement de métal et de caoutchouc, le vélo du 21^e siècle verra une introduction graduelle de l'électronique dans la fabrication de cette machine.



Figure 73 : Vision futuriste du cycliste et de son vélo (Réf.: 78)

L'intelligence ajoutée au vélo transforme totalement son usage. Le cycliste peut « communiquer » avec son vélo et décider des actions à prendre en fonction des informations reçues. Les diverses applications développées pour le téléphone intelligent permettent, par l'entremise de divers capteurs implantés dans la structure du vélo, d'enregistrer, d'analyser et d'afficher les informations utiles pour le cycliste sur son téléphone intelligent par la connectivité Bluetooth. Actuellement, plusieurs compagnies et surtout une multitude de groupes de jeunes inventeurs à travers le monde développent des composantes électroniques et des applications intelligentes pour améliorer la sécurité, le confort et l'expérience du cycliste. Le vélo par ses qualités écologiques comme moyen de transport bon marché et bénéfique à la santé rejoint les préoccupations des jeunes générations. Avec l'introduction des récentes technologies dans l'usage du vélo, l'attrait sera encore plus élevé.

Il n'est pas surprenant que les premières initiatives pour introduire l'intelligence dans le vélo proviennent de jeunes concepteurs qui ont saisi les immenses potentialités d'allier vélo et nouvelles technologies, comme c'est notamment le cas de l'automobile.

En fait c'est au Canada que l'histoire commerciale du vélo intelligent a débuté. En 2013, un groupe de jeunes étudiants de l'université Queens à Toronto ont lancé le concept du premier vélo intelligent. Le *Vanhawks Valour* est un vélo connecté, pensé pour les déplacements urbains quotidiens (Réf. : 79). Parmi ses fonctionnalités, on retrouve un système de navigation sans écran, indiquant au cycliste la direction à prendre grâce à des petites diodes sur le guidon. Le cycliste aura saisi préalablement sa destination sur son téléphone intelligent, relié au vélo via la connectivité Bluetooth. Aussi, il est possible de récupérer sur son téléphone toutes les informations d'un trajet effectué, notamment la vitesse, la distance parcourue, les calories dépensées ainsi que le rythme cardiaque. Grâce à une combinaison du GPS, de l'accéléromètre, du magnétomètre et du gyroscope installés dans chaque Valour, des cartes identifiant les meilleurs itinéraires ou ceux à éviter en matière de qualité de la chaussée ou de topographie du terrain, peuvent être générées. Ces cartes sont accessibles aux autres propriétaires de Valour et pourront par exemple, servir de base pour proposer aux autorités les pistes cyclables à construire en priorité !

Le Valour est capable de détecter les obstacles dans l'angle mort grâce à des capteurs ultrasons. Si le cycliste s'apprête à tourner alors qu'une voiture le double, une vibration dans le guidon lui indiquera alors le danger imminent. Le capteur ultrason balaie une distance de 3 mètres en arrière du vélo. Le Valour n'est pas isolé, il communique dans un rayon de six kilomètres avec les autres vélos Valour. Ce qui permet notamment de rechercher un vélo qui a été rapporté volé, une fois son propriétaire lance l'alerte aux autres propriétaires. Ce vélo 2.0 qui est construit en fibre de carbone ne pèse que 7 kg et son prix au détail se situe à environ 1500 \$.

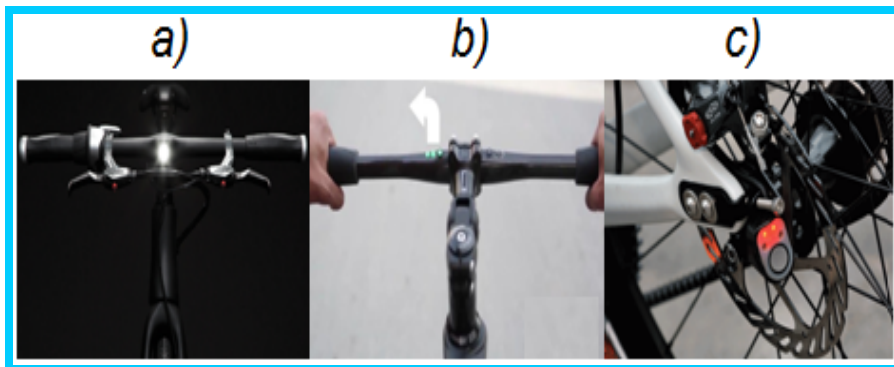


Figure 74 : Une lumière intelligente a), un système de guidage par GPS b) et un radar ultrason pour vérifier les angles morts c)

À Montréal, un jeune groupe a plutôt orienté son invention de façon que les vélos existants puissent devenir des vélos 2.0. Il s'agit donc de réduire le coût de la transformation d'un vélo standard en vélo intelligent. La jeune équipe, *CycleLabs*, a donc créé le *SmartHalo* qui s'installe sur le guidon et qui inclut un GPS, de l'éclairage, une alarme et un moniteur de performance. Cet appareil est connecté au téléphone intelligent par Bluetooth et permet un dialogue entre le cycliste et son vélo.

Pour la navigation, un système très simple d'affichage en forme circulaire permet de guider le cycliste vers sa destination. Au préalable, le cycliste saisit sa destination sur son téléphone, et le GPS incorporé dans ce dernier transmet au *SmartHalo* l'information de guidage. Ainsi, quand il faut tourner, un signal lumineux vert indique la direction à prendre et si le cycliste emprunte une mauvaise direction, le signal clignote en rouge.



Figure 75 : Le système de guidage de *SmartHalo* (Réf.: 74)

Le *SmartHalo* offre aussi un éclairage intelligent en D.E.L., puissant de 200 lumens, et se déclenche quand il fait noir et que le vélo est en mouvement. Ce système intelligent incorpore aussi une alarme sonore qui, une fois armée, s'active si le vélo est secoué durant une tentative de vol. Le *SmartHalo* permet aussi au cycliste de suivre ses performances en accédant aux données relatives à ses déplacements. Il peut ainsi mesurer et comparer sa vitesse, la distance parcourue ou les calories brûlées. Par ailleurs, le *SmartHalo*, par ses applications permet de localiser l'endroit où le vélo a été stationné, d'informer le cycliste de l'entrée d'un appel ou pour l'avertir en cas d'alerte météo.

Des petites entreprises de la taille de *Vanhawks* et *CycleLabs* se développent un peu partout. En Chine par exemple, l'entreprise technologique *Cotlo* lance un vélo intelligent commercialisé par la compagnie *Costelo* sous le nom de *Corvus*. Ce vélo est équipé d'un radar intégré qui détecte les véhicules à l'arrière. Ce système parvient à déterminer si le véhicule en approche constitue un danger en fonction de sa vitesse et de celle du cycliste. Si c'est le cas, l'appareil alerte ce dernier en faisant vibrer la selle. Pour le guidage par GPS, un dispositif permet d'avertir le

cycliste de la direction à prendre en faisant vibrer l'extrémité du guidon dans le sens du virage. À la tombée de la nuit, le phare D.E.L. s'allume automatiquement.

Le Corvus est aussi doté d'un écran avec diodes électroluminescentes organiques (OLED) encastré dans le cadre et qui indique la vitesse, la distance parcourue, les calories brûlées ou encore la cadence. Par une application du téléphone intelligent, il est possible d'avoir accès à des informations additionnelles comme la géolocalisation du vélo, dans le cas où celui-ci serait volé.

Toutes ces données sont collectées par des capteurs dissimulés tout autour de la structure du vélo. Près des roues arrière se trouve par exemple le compteur de vitesse. GPS, altimètre, accéléromètre, inclinomètre et module Bluetooth sont également disposés autour du cadre. Tout est alimenté par une batterie en lithium amovible et rechargeable.



Figure 76: Le Corvus, un vélo 2.0 bien équipé (Réf.: 75)

Il y a aussi de grandes compagnies bien établies dans d'autres activités industrielles qui s'invitent dans l'industrie du vélo 2.0. C'est notamment le cas du géant Samsung qui a développé son propre vélo intelligent. Le vélo intègre un équipement électronique relié à un téléphone intelligent qui est maintenu magnétiquement sur le guidon. Le module électronique dispose de connexions sans fil Bluetooth et Wi-Fi. Le tout est alimenté par une batterie placée sous le pédalier.

Ce vélo dispose d'une caméra placée au-dessus de la roue arrière et qui permet au cycliste de surveiller ce qui se passe derrière lui et de vérifier ses angles morts.



Figure 77 : Le vélo 2.0 développé par la compagnie Samsung (Réf.: 76)

Quatre projecteurs laser situés de chaque côté du cadre à l'avant et à l'arrière marquent sur le sol des lignes lumineuses afin d'inviter les automobilistes à respecter une distance sécuritaire. Cet éclairage s'active automatiquement en fonction de la luminosité détectée par le capteur du téléphone intelligent. Cette idée développée par Samsung a été récemment commercialisée par quelques entreprises. Il s'agit en quelque sorte d'une piste cyclable portable et personnelle qui permet de se faire remarquer dans la circulation d'une manière très visuelle.



Figure 78 : La piste cyclable virtuelle, incluant même un pictogramme (Réf.: 77)

Ce vélo dispose de plusieurs applications, dont une application de navigation GPS qui permet d'enregistrer les parcours les plus fréquents que le cycliste peut soumettre aux services municipaux pour prioriser certains axes basés sur l'expérience des cyclistes.

Aussi surprenant que ça puisse paraître, des géants de l'industrie de l'automobile se sont lancés eux aussi dans le développement du vélo 2.0. L'idée derrière cet intérêt est d'offrir un mode complémentaire au déplacement par voiture. Prévoyant pour les années à venir des niveaux de congestion élevés dans les centres urbains, plusieurs constructeurs ont conçu des vélos intelligents électriques et pliables, qui peuvent être placés dans le coffre. Une fois arrivé en périphérie de la destination, le conducteur laisse son auto, par exemple, dans un stationnement incitatif et utilise son vélo pour atteindre sa destination finale, sans trop d'effort, grâce à la propulsion assistée par un petit moteur électrique. Vu que ces vélos ont des moteurs électriques et une batterie d'alimentation, le poids total du vélo constitue un défi à surmonter.

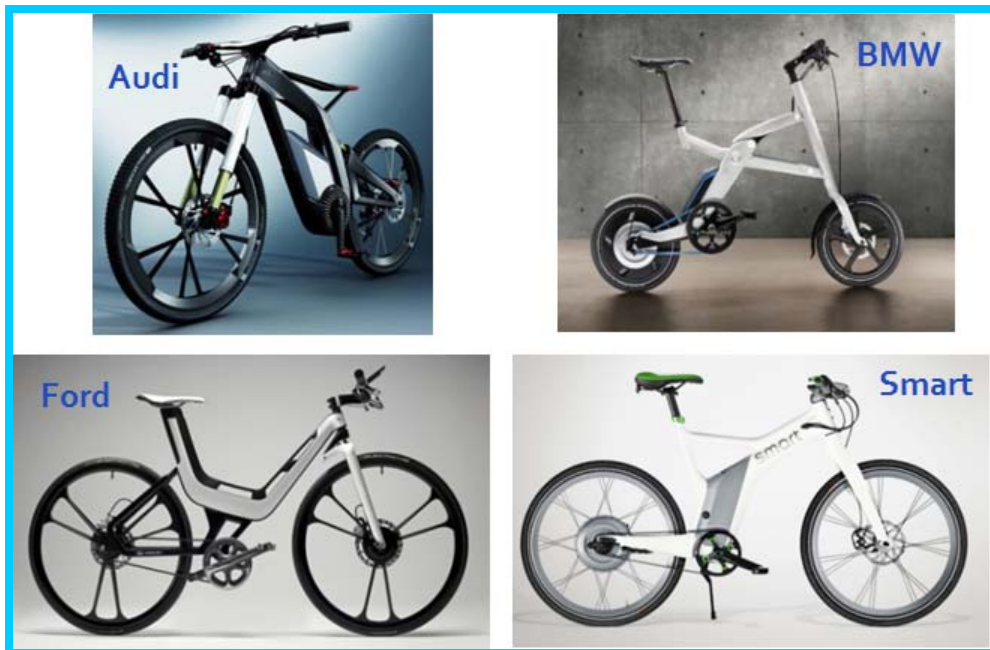


Figure 79 : Quelques prototypes de vélos intelligents et électriques développés par des constructeurs automobiles (Réf.: 78, 79, 80, 81)

Ces vélos possèdent un GPS pour le guidage, des systèmes antivols et un système de recharge rapide autonome, à l'intérieur même du coffre de la voiture.

Ces géants de l'industrie automobile continuent d'améliorer leurs produits et il est juste question de temps avant que les concessionnaires commencent à nous offrir des vélos électriques et intelligents comme option !

Le fabricant d'automobiles suédois, Volvo, bien connu pour ses implications innovatrices dans le renforcement de la sécurité des véhicules a été le premier à commercialiser des systèmes de surveillance par caméra capables d'analyser les obstacles qui surgissent pour alerter le conducteur, voire d'actionner les freins à sa place. Après avoir développé un système de détection du piéton, Volvo a

développé un autre système de détection du cycliste, un autre usager particulièrement vulnérable en cas de collision avec un véhicule.

Le système de détection des piétons et des cyclistes se compose d'une unité radar implantée dans la calandre, d'une caméra logée derrière le pare-brise au niveau du rétroviseur intérieur, et d'une unité de commande centrale. Le radar détecte tout objet en amont du véhicule et détermine à quelle distance il se trouve. La caméra à haute résolution détermine la nature des obstacles et elle est capable de reconnaître les piétons et les cyclistes.

Une fois que la confirmation de l'objet à la fois par le radar et par la caméra est obtenue, le système enclenche immédiatement un freinage automatique à pleine puissance en cas de besoin.

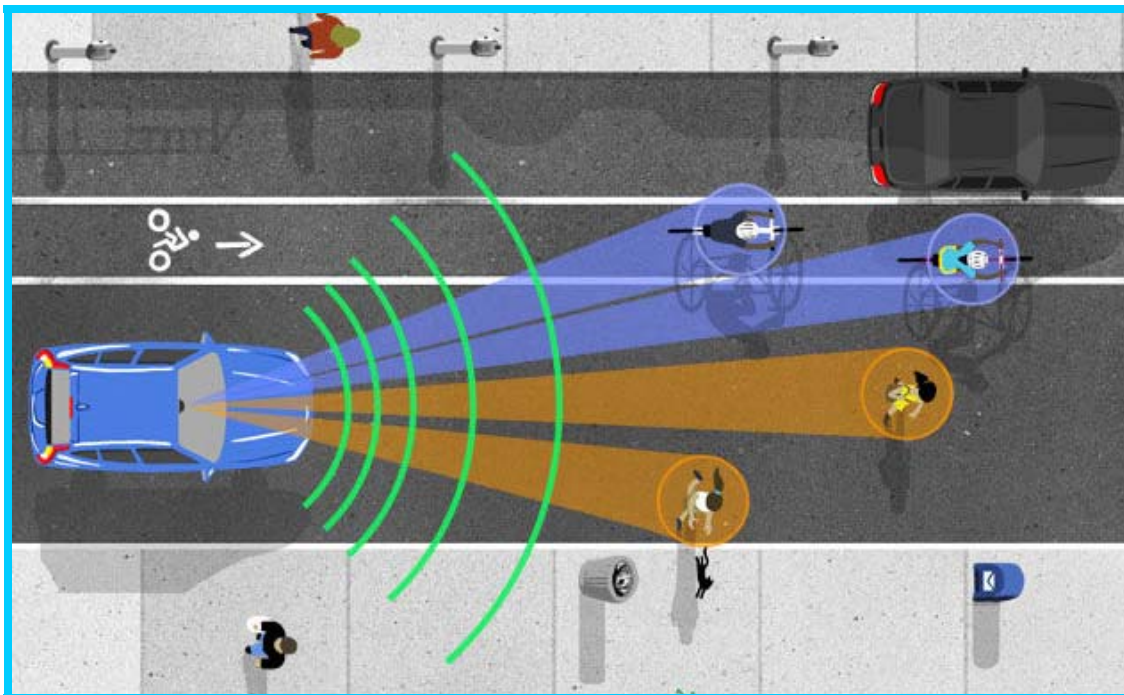


Figure 80 : Un système de détection des piétons et des cyclistes grâce à l'évolution de l'analyse numérique des images (Réf.: 82)

Toujours dans une perspective d'amélioration de la sécurité des cyclistes, Volvo a développé un prototype de casque de vélo intelligent. Ce casque connecté est relié au téléphone intelligent du cycliste par un module Bluetooth et envoie sa position aux serveurs de Volvo, qui calcule également la position des voitures environnantes ainsi que leurs vitesses. Pour le moment, seul le modèle XC90 de Volvo en est équipé. Si une collision est imminente, le casque prévient le cycliste par trois diodes lumineuses situées en avant du casque et visibles par le cycliste. Même chose pour le conducteur de la voiture, qui sera alerté lorsqu'un cycliste arrive dans sa trajectoire.

Le casque, développé en partenariat avec le fabricant de casques suédois *POC* et la compagnie technologique *Ericsson*, est encore au stade de projet. Or, pour maximiser les retombées réelles sur la sécurité des cyclistes, cette idée de relier conducteurs et cyclistes entre eux devra s'étendre aux autres constructeurs d'automobiles.

Dans la même optique, l'entreprise technologique chinoise, *Livall* a développé un casque connecté pour cycliste, le *Bling*.



Figure 81 : les différentes fonctionnalités du casque connecté Bling (Réf.: 83)

Un ensemble de 80 lumières D.E.L. avec huit couleurs différentes réparties sur l'ensemble du casque rend le cycliste visible de jour comme de nuit. Le cycliste peut indiquer également son intention de tourner, en appuyant sur les flèches directionnelles installées sur le guidon. Les lumières D.E.L. arrières clignoteront à droite ou à gauche pour signaler son intention de changer de direction.

L'enceinte intégrée au casque permet au cycliste d'écouter sa musique librement, sans jamais l'isoler des bruits environnants. Un microphone connecté par Bluetooth lui permet de répondre à des appels si souhaités et il peut aussi, par les commandes vocales, faire des appels. Se déplaçant en groupe, une fonction talkie-walkie permet aux cyclistes équipés du casque Bling de communiquer entre eux. Finalement, un accéléromètre ainsi qu'un capteur de la gravité sont incorporés dans l'extrémité arrière du casque et sont capables de détecter une éventuelle chute. Dans ce cas, les lumières D.E.L. clignotent activement en rouge et un signal est envoyé directement aux services d'urgence, si la situation le requiert.

Sur un ton plutôt insolite, deux jeunes Suédoises ont créé le tout premier casque de vélo invisible, le *Hövding*. Plutôt que de se porter sur la tête, il se place autour du cou, à la manière d'un foulard. Conçu comme un coussin gonflable, il se déploie

lors de mouvements brusques, d'une collision contre une portière de voiture par exemple ou lors d'une chute au sol. En se déployant, le casque enveloppe la tête, le cou et une partie du visage.

Pour assurer un fonctionnement parfait, ce casque invisible dispose d'une multitude de capteurs de type accéléromètres et d'un algorithme complexe qui évalue 200 fois par seconde si le comportement du cycliste est normal ou bien s'il s'agit d'un accident. En cas de chute ou de collision, le casque gonflable se déploie en un dixième de seconde avant que la tête ne heurte le sol ou l'obstacle. Une fois gonflé, il protégera efficacement le crâne et le cou, même dans le cas d'impacts multiples. Ce casque permet d'enregistrer jusqu'à 10 secondes d'événements après l'impact, comme s'il s'agit d'une boîte noire d'un avion. Le dispositif de gonflage est assuré par une petite cartouche de gaz à haute pression à base d'hélium située à l'arrière. Pour éviter toute mauvaise surprise, le modèle est muni d'un bouton marche-arrêt, utile lorsque le cycliste redevient piéton.

Grâce à sa technologie innovante, le casque Hövding a prouvé qu'en cas d'impact à 25 km/h, sa capacité d'absorption des chocs est trois fois supérieure à n'importe quel casque standard (Réf. : 84)



Figure 82 : Le casque invisible et son déploiement lors des chocs (Réf.: 85)

Une multitude d'autres inventions qui renforcent le confort et améliorent l'expérience du cycliste envahissent de plus en plus le marché du vélo 2.0. À mentionner notamment deux inventions intéressantes, le dérailleur automatique et le cadenas intelligent.

- Si le cycliste urbain doit constamment ralentir et accélérer, ne pas devoir changer de vitesse serait une vraie délivrance. Avoir toujours la juste cadence aide à faire un effort plus régulier et permet une économie d'énergie. C'est dans cette optique que l'électronique s'attaque à la

« boîte de vitesse » des vélos, c'est-à-dire au couple dérailleur-pédalier. La société britannique, *Cambridge Consultants*, a vu l'opportunité de développer une application pour le téléphone intelligent afin d'automatiser les changements de vitesse. En s'appuyant sur les informations transmises par l'accéléromètre du téléphone intelligent, par le capteur de vitesse et par le capteur de cadence, l'application optimise le couple dérailleur-pédalier afin que le cycliste se retrouve dans les meilleures conditions possibles. La commande électromécanique du changement de plateaux ou de pignons est assurée par un dispositif électrique de changements de vitesse déjà disponible sur le marché. La liaison entre le téléphone intelligent et les composantes du système de dérailleur automatique est assurée par une connectivité Bluetooth. La compagnie prévoit d'intégrer dans le système les données GPS de téléphone intelligent, en vue de tenir compte automatiquement du relief du terrain dans les changements automatiques des vitesses.

Il existe déjà sur le marché, un dérailleur automatique *NuVinci N380* développé par la compagnie américaine *NuVinci Cycling* située au Texas. Ce dérailleur est développé initialement pour équiper les vélos électriques, mais il s'est avéré très fonctionnel sur un vélo normal. Ses inconvénients sont son poids d'environ 1 kg et son prix encore considérable. Le *NuVinci N380* n'est pas juste automatique, mais il est aussi à variation continue. C'est-à-dire que le rapport de pédalage est modifié de façon très progressive, rendant le pédalage fluide, sans que le cycliste puisse remarquer de saut d'un rapport à l'autre.

- En ce qui concerne les cadenas intelligents, le principe n'est pas révolutionnaire. Il existe déjà de nombreux cadenas connectés qui permettent de les ouvrir ou de les fermer grâce à une application dédiée ou par simple proximité du téléphone intelligent, par une connectivité Bluetooth. Cependant, un cadenas intelligent, le *Skylock* développé par la compagnie *Velo Labs*, se distingue des autres par le fait qu'il incorpore d'autres fonctionnalités qui assurent la sécurité du cycliste. Le *Skylock* peut envoyer une alerte pour prévenir le propriétaire du vélo en cas de tentative de vol. En plus, grâce à un accéléromètre, le *Skylock* est capable de déterminer si le cycliste est victime d'un accident. Dans ce cas, une connexion Bluetooth permettra de communiquer avec le téléphone pour prévenir éventuellement les urgences ou envoyer des messages à des numéros préprogrammés, que ce soit la famille ou des amis. *Velo Labs* prévoit d'organiser une communauté autour du *Skylock* qui permettra aux propriétaires de louer leur vélo. Un système de déblocage du cadenas à distance et un système sécurisé pour le paiement seront à développer. Il s'agira éventuellement d'un système

parallèle de location des vélos privés, un peu l'Uber des vélos ! L'autonomie du cadenas est impressionnante puisqu'une heure d'énergie solaire lui permet de fonctionner tout un mois.

En intégrant le numérique dans les vélos, les services de location des vélos en libre-service ont grandement bénéficié de ce développement. La technologie disponible actuellement permet de suivre les vélos en temps réel, d'éviter les vols, de réguler leur flux, d'aider à en trouver un qui est libre à partir d'un téléphone intelligent, ou au contraire, de trouver une place pour retourner le vélo. Ces systèmes sont basés sur le même concept, soit une gestion centralisée, nécessitant des bornes massives installées à travers le territoire desservi et un service de redistribution des vélos assez dispendieux et contraignant, c'est le cas notamment de BIXI.

Afin de redonner un nouveau souffle au vélo libre-service, Ryan Rzepecki un jeune new-yorkais, a imaginé un concept où les systèmes de gestion des autorisations et de la sécurité sont installés à même le vélo. Il a ainsi créé la société *Sobi (SOcial Bicycles)* qui propose des systèmes de vélos connectés basés sur une technologie GPS et des antivols connectés. Ce concept, déjà opérationnel dans une quinzaine de municipalités, dont Ottawa et Hamilton, permet à l'opérateur de mettre à la disposition des clients des vélos sans mettre en place d'infrastructures spécifiques comme des bornes d'accueil imposantes. L'utilisateur a seulement besoin d'un téléphone intelligent muni de l'application Sobi pour géolocaliser et utiliser ces vélos. Les opérateurs peuvent alors proposer un système de vélos en libre-service qui n'est plus limité à la disponibilité des bornes.



Figure 83: Le vélo libre service SoBi – Unité de contrôle alimenté par l'énergie solaire et la barre de sécurité en forme de U en jaune (Réf.: 86)

Concrètement, l'utilisateur localise et débloque le cadenas en utilisant son téléphone intelligent ou simplement en entrant son numéro de compte personnel sur le clavier installé sur le vélo. Un serveur central valide et confirme la demande de

location et la fonction GPS commence à suivre la localisation du vélo. Une fois l'utilisateur termine son parcours, il insère la barre de sécurité (barre jaune dans le médaillon de la figure 83) à travers le boîtier pour bloquer la roue arrière et le serveur valide la fin de la transaction et remet le vélo en disponibilité.

L'avantage du système SoBi est qu'il élimine la nécessité de retourner le vélo à une borne dédiée. Le système fonctionne avec des stationnements standards pour vélos. La redistribution des vélos est majoritairement accomplie par les usagers eux-mêmes, encouragée par un système d'incitatifs. En effet, l'opérateur délimite un certain nombre de zones munies de stationnements pour vélos. Dans le cas où l'utilisateur laisserait le vélo à l'extérieur de la zone assignée, un tarif lui est imposé. Cependant, l'utilisateur suivant, en retournant le vélo à la zone initiale, reçoit un bonus. Ce système assure que les vélos reviennent vers les zones désignées, mais il offre tout de même une flexibilité pour aller à n'importe quelle destination dans l'ensemble des zones.

Finalement, le vélo pourra être complètement réinventé si l'idée d'un mécanisme de stabilisation automatique fiable voit le jour. Actuellement au stade de la recherche avec un certain succès dans certaines universités, principalement en Asie, l'objectif est de développer un mécanisme qui pourra tenir le vélo en équilibre sans l'intervention du cycliste. Il s'agit en fait d'un vélo électrique autonome, soit l'équivalent du véhicule autonome qui fera probablement son entrée sur le marché automobile dans un futur assez proche. Le défi par rapport au véhicule autonome est l'autoéquilibrage nécessaire pour le vélo. Le cycliste n'aura plus besoin de mettre les pieds sur le sol quand le vélo est arrêté, et pourra même s'occuper à faire autre chose que conduire, alors qu'une application GPS le conduira du point A au point B. Bien sûr, on est dans le monde futuriste, mais au rythme actuel du développement de la technologie et de l'informatique, cet avenir pourra être assez proche.

VÉLO, UN ALLIÉ CONTRE LE RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE

L'invention de la machine à vapeur sous pression, par le Britannique James Watt, confirme en quelque sorte le coup d'envoi de la révolution industrielle vers le milieu du 19^e siècle. La conséquence directe est la croissance de la production industrielle qui a nécessité depuis l'usage massif des sources de combustion diverses en passant par le charbon, le mazout lourd et l'électricité.

Parallèlement, les émissions mondiales des gaz à effet de serre (GES) n'ont pas cessé d'augmenter et l'accumulation de ces gaz dans l'atmosphère favorise le réchauffement de la Terre. Les conséquences du réchauffement climatique, même par quelques dixièmes de degrés, peuvent être à l'origine de catastrophes naturelles, d'un déséquilibre des écosystèmes et d'une diminution de la production agroalimentaire. Déjà, on est témoins de manifestations concrètes telles que la fonte des glaces de l'océan Arctique et la multiplicité des phénomènes météorologiques extrêmes.

Notre planète est en crise climatique et la situation peut s'aggraver davantage si l'ensemble des pays n'agissent pas solidairement dans le but d'abaisser les niveaux des émissions des GES.

La figure 84, basée sur les données de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), est assez révélatrice. La croissance des émissions des GES, de la révolution industrielle jusqu'à la fin de la Deuxième Guerre mondiale était gérable. Cependant, depuis le boom économique qui a suivi la guerre, combiné à un accroissement fulgurant de la population mondiale, les émissions des GES ont progressé de façon exponentielle. Ce qui est relativement positif sur cette figure, c'est que les émissions des GES ont été stables durant les années 2013 à 2015 atteignant les 32 gigatonnes d'équivalent en dioxyde de carbone annuellement. Par contre, l'objectif du Protocole de Kyoto, qui a déterminé une cible globale de réduction des GES pour les pays signataires de 5,2% par rapport aux niveaux de 1990, n'a pas été atteint en 2012.

Au niveau planétaire, les transports représentent environ 24 % des émissions de gaz à effet de serre. L'*Institute for Transportation and Development Policy*, organisme non gouvernemental américain (ONG), affirme que les transports, poussés par une hausse rapide de l'usage de la voiture ont été la source de croissance la plus rapide d'émissions de gaz à effet de serre dans le monde. Cela devrait aller en croissant puisque les 2/3 de la population mondiale vivront dans les zones urbaines d'ici 2050, comparativement à la moitié actuellement.

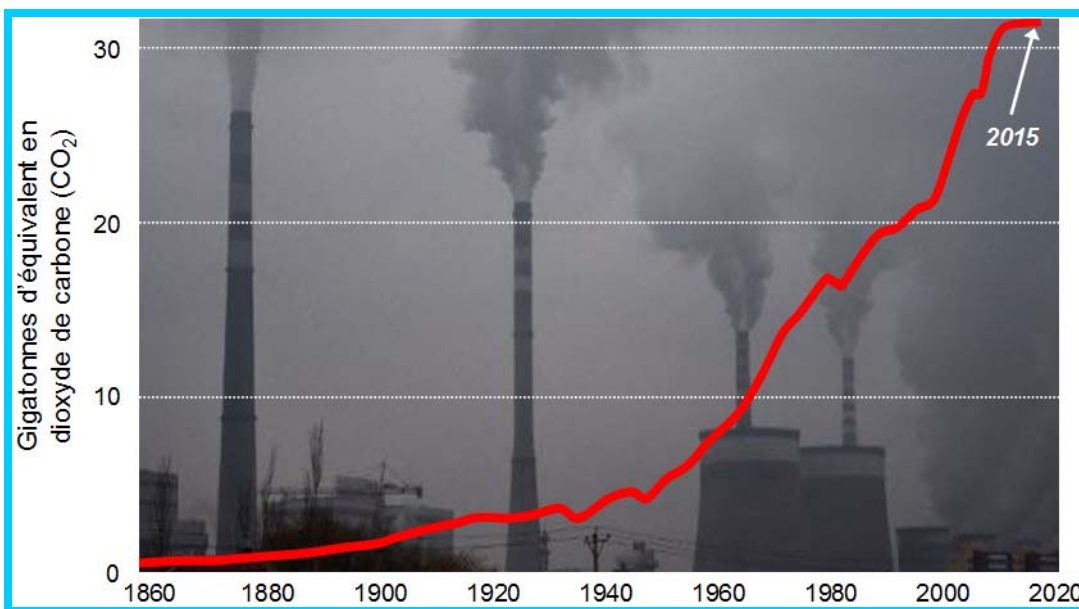


Figure 84 : Évolution mondiale des émissions des GES d'origine fossile depuis la révolution industrielle

L'ONG a également démontré qu'un changement radical dans la manière de se déplacer en ville, notamment en optant pour les transports actifs, pourrait réduire significativement les émissions liées aux transports des personnes. Alors, imaginez les gains en termes de réduction des émissions des GES si les habitants de toutes les métropoles de la planète étaient aussi adeptes du vélo que les habitants de Copenhague, avec 26 % des déplacements qui se font à vélo, ou les habitants d'Amsterdam, avec une part modale du vélo de 33 %.



Figure 85 : 60 personnes, en auto ou en bicyclette? (Réf.: 87)

L'impact de l'usage accru du vélo comme moyen de transport dans la lutte contre le réchauffement climatique est bien réel, à condition qu'il atteigne des parts modales respectables. Il suffit juste de comparer les taux d'émission du CO₂ entre différents modes de transport urbain pour en appréhender les conséquences.

Tableau 13 : Les émissions équivalent CO₂ par kilomètre et par passager, selon le mode de transport utilisé en zone urbaine (Réf. : 88, 89)

	<i>Équivalent CO₂ (g)</i>
Marche	0
Vélo	21
Bus	95 - 113
Voiture	252 - 282

Ces taux moyens tiennent compte des émissions durant tout le long du cycle de la vie du mode de transport, c'est-à-dire durant sa production, son fonctionnement, son entretien et son traitement en fin de vie. Pour les bus et les voitures, plus le taux d'occupation est élevé, plus le taux d'émission par passager est réduit.

Il existe quelques études qui ont quantifiés l'impact d'une augmentation substantielle de l'usage du vélo comme moyen de transport utilitaire dans les zones urbaines. Mentionnons notamment deux études, qui se distinguent par une méthodologie scientifique rigoureuse, l'une européenne et l'autre américaine. Basées sur le cycle de vie du mode de transport utilisé, ces deux études ont évalué les émissions des GES pour les deux phases les plus importantes du cycle de vie des modes de transport, soient la phase de production et la phase de fonctionnement. Cette approche permet de déterminer l'empreinte de carbone totale du mode en question. Elle tient compte non seulement du carburant consommé mais aussi de la matière première utilisée lors du processus de fabrication.

En Europe, l'*European Cyclist Federation* (ECF) a réalisé une étude qui a permis de quantifier les économies de GES permises par le vélo. Dans un premier temps, l'ECF a calculé les taux des émissions des GES exprimés en équivalent CO₂ par passager et par kilomètre. Par la suite, en s'appuyant sur un scénario où la distance moyenne parcourue en vélo en Europe en 2020 sera l'équivalent de celle observée au Danemark en l'an 2000, soit 936 km/an/personne, l'ECF a estimé les économies du GES en conséquence.

Autobus : Un autobus moyen pesant environ 11 tonnes et ayant une durée de vie d'un million de kilomètres avec une occupation moyenne de 10

passagers, génère 6g d'équivalent CO₂/passager-km liés à sa production. Quand aux émissions de l'autobus durant la phase de fonctionnement, elles dépendent entre autres du trajet emprunté et du niveau du trafic. Ces émissions sont évaluées à 95 g d'équivalent CO₂/passager-km. Donc, les émissions totales d'un autobus durant son cycle de vie s'élèvent à 101 g d'équivalent CO₂/passager-km.

Voiture particulière : Pour une voiture représentant les caractéristiques moyennes du parc automobile en Europe, avec une durée de vie de 160 000 km et un taux d'occupation de 1,57 passager par voiture, les émissions liées à la production du véhicule sont estimées à 42 g d'équivalent CO₂/passager-km. Quand à la phase de fonctionnement, les émissions sont fortement corrélées au type du carburant, la cylindrée du véhicule et à l'état du trafic. L'EFC a estimé qu'en moyenne une voiture particulière durant la phase de fonctionnement génère 229 g d'équivalent CO₂/passager-km. Ainsi, l'empreinte du carbone totale de la voiture particulière est évaluée à 271 g d'équivalent CO₂/passager-km.

Vélo électrique : En Europe, le vélo électrique est connu sous l'appellation Pedelec (*Pedal electric cycle*) et il est défini comme un vélo standard équipé d'un moteur électrique d'une puissance maximale de 0,25 kilowatt. L'alimentation électrique est interrompue dès que la vitesse atteint 25 km/h en plus, le moteur ne peut fonctionner que si le cycliste pédale. Les hypothèses sous-jacentes à l'évaluation des émissions des GES sont une durée de vie de 8 ans et une distance moyenne parcourue de 2 400 kilomètres annuellement. Ainsi, il a été évalué que la phase de production du vélo électrique est responsable de 7 g d'équivalent CO₂/km et que la phase fonctionnement est responsable de 9 g d'équivalent CO₂/km pour la production de l'électricité nécessaire à l'assistance du cycliste. À ces émissions, il faut ajouter l'empreinte de carbone résultant de la production supplémentaire des calories requises par le cycliste pour faire avancer son vélo, comparativement par exemple à l'automobiliste (*voir encadré en bas*). Cette énergie, provenant de son alimentation est estimée à 4,4 kilocalories/km et génère 6 g d'équivalent CO₂ supplémentaires. L'empreinte totale du vélo électrique est donc évaluée à 22 g d'équivalent CO₂.

Vélo : Évalué sur son cycle de vie, le vélo n'a pas une empreinte carbone nulle. Selon une hypothèse d'un poids de 20 kg pour un vélo de ville, une durée de vie et une distance parcourue annuellement identiques à celles du vélo électrique, la phase production induit des émissions de GES de l'ordre de 5 g d'équivalent CO₂. Pour la phase de fonctionnement, l'apport calorifique requiert 11 kilocalories supplémentaires par km, ce qui se traduit par des émissions de 16 g d'équivalent CO₂/km (*voir encadré en bas*). Ainsi,

l'empreinte de carbone totale attribuée au vélo durant son cycle de vie est de 21 g d'équivalent CO₂/km.

Une fois que les empreintes de carbone pour différents modes de transport sont évaluées, il est possible de quantifier les émissions des GES épargnées par l'usage du vélo comme moyen de transport.

En 2011, la distance totale parcourue par le vélo en Europe est évaluée à 94 milliards de kilomètres, soit l'équivalent de 187 km par personne et par année. En théorie, cette distance pourrait économiser 24 millions de tonnes d'équivalent CO₂, si tous les cyclistes utilisaient exclusivement des véhicules privés pour leurs déplacements. Mais, il est plus réaliste d'estimer la réduction des émissions des GES en tenant compte d'une distribution qui tient compte de tous les modes incluant la marche. L'impact est ainsi atténué et l'ECF l'a estimé à 11 millions de tonnes d'équivalent CO₂. Cette réduction équivaut à 6% des engagements de l'Europe dans le cadre du protocole de Kyoto.

CARBURANT MÉTABOLIQUE

L'usager du vélo, standard ou avec assistance électrique, doit fournir un certain effort physique pour faire avancer son vélo. Cet effort se matérialise en forme d'énergie, exprimée en calories, que le corps du cycliste doit consommer. Le cycliste doit donc puiser dans ses réserves de graisse pour trouver les calories nécessaires. C'est bien sûr à travers son alimentation que le cycliste fait ses réserves caloriques. Plus le cycliste est actif, plus il accroît son alimentation pour produire les calories requises. Les calories jouent un rôle comparable à celui du carburant dans le cas de la voiture. Dans le cas d'un vélo standard, en se basant sur une vitesse moyenne de 16 km/h, le cycliste brûle environ 4 kilocalories par kilogramme de masse et par heure, comparativement à 1,5 kilocalorie/kg/h pour un automobiliste. Donc, pour un cycliste adulte pesant 70 kg, les calories supplémentaires brûlées sont calculées comme suit :

$$70 \text{ kg} * (4 \text{ kcal/h} - 1,5 \text{ kcal/h}) = 175 \text{ kcal/h}$$

$$\rightarrow 175 \text{ kcal/h} / 16 \text{ km/h} = 11 \text{ kcal/km.}$$

Le cycliste brûlera 11 kilocalories supplémentaires par kilomètre comparativement à un automobiliste. Or, pour obtenir ces kilocalories, le cycliste doit consommer de la nourriture qui produit une empreinte de carbone non négligeable durant le cycle de production des aliments. Ce cycle tient compte de l'utilisation de la machinerie agricole, de l'irrigation, de la production et de l'usage des engrais et pesticides et du transport des produits intermédiaires et finaux. À titre d'exemple, l'apport calorique supplémentaire de 100 calories par la consommation de la viande du bœuf est responsable de l'émission de 1 431 g d'équivalent CO₂, alors que le même apport calorique basé sur la consommation du soja générera seulement 7 g d'équivalent CO₂ (Réf. : 89). En se basant sur l'apport quotidien européen de 3 466 kilocalories et d'un impact de l'alimentation évalué à 1,83 tonne d'équivalent de CO₂ par an et par personne en Europe, il en découle qu'une kilocalorie moyenne génère 1,44 g d'équivalent CO₂. Ainsi, pour un apport supplémentaire de 11 kilocalories, les émissions de GES induites par le « carburant métabolique » du cycliste atteignent 16 g d'équivalent CO₂.

$$11 \text{ kcal/h} * 1,44 \text{ g} \approx 16 \text{ g équivalent CO}_2/\text{km}$$

Pour un vélo avec assistance électrique, le cycliste brûle environ 2,5 kilocalories par kilogramme de masse et par heure et les calories brûlées sont évaluées à :

$$70 \text{ kg} * (2,5 \text{ kcal/h} - 1,5 \text{ kcal/h}) = 70 \text{ kcal/h}$$

$$\rightarrow 70 \text{ kcal/h} / 16 \text{ km/h} = 4,4 \text{ kcal/km}$$

Donc, l'usager du vélo avec assistance électrique émettra 6 g équivalent CO₂ par kilomètre parcouru :

$$4,4 \text{ kcal/km} * 1,44 \text{ g} = 6 \text{ g d'équivalents CO}_2/\text{km}$$

Selon un scénario « très optimiste », l'ECF a évalué la réduction des émissions des GES si l'Europe dans son ensemble atteignait la même part modale que le Danemark. Dans ce pays, le danois parcourt en moyenne 936 km annuellement, soit cinq fois la moyenne européenne. Selon ce scénario, la distance totale parcourue en Europe serait de 481 milliards de kilomètres et pourra générer des économies annuelles allant jusqu'à 120 millions de tonnes d'équivalent CO₂. À l'horizon 2020, ces économies pourront représenter 11 % de l'objectif global de réduction des GES de l'Europe par rapport au niveau de 1990 (-20 %). À l'horizon 2050, toujours avec une part modale équivalente à celle du Danemark, la distance totale annuelle parcourue en vélo pourra atteindre 490 milliards de kilomètres. La distance moyenne annuelle par personne se stabilisera autour de 940 km et il en résultera des économies annuelles pouvant atteindre 142 millions de tonnes d'équivalent CO₂. En plus des réductions des GES, l'usage accru du vélo permet aussi de réduire les importations du pétrole. En terme monétaire, ces économies représentent 8,5 milliards \$ US annuellement, soit 9 % de la facture européenne d'importation du pétrole.

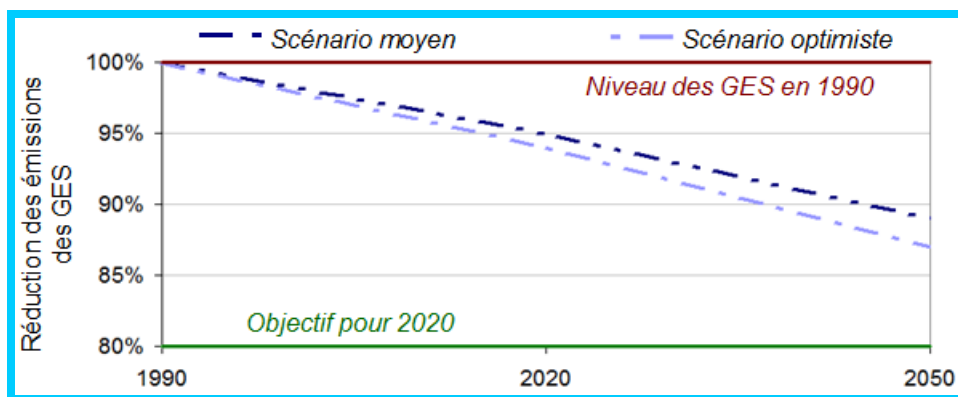


Figure 86 : Le graphique illustre la contribution du vélo dans l'atteinte de l'objectif européen de réduction des émissions des GES, selon deux scénarios

Aux États-Unis, l'organisme non gouvernemental, *l'Institute for Transportation and Development Policy* (ITDP) a évalué l'impact sur les émissions des GES, d'une augmentation de la part modale du vélo et du vélo électrique selon une vision planétaire. L'ITDP a donc compilé les données d'utilisation du vélo et du vélo électrique, qui s'étalent entre 1977 et 2015, dans plus que 800 villes sur les cinq continents, incluant pratiquement 100 % des métropoles.

Globalement, en se basant sur les données recueillies et d'autres informations telles que les volumes des ventes, la part modale pour les déplacements utilitaires en vélo et en vélo électrique estimée en 2015 est de l'ordre de 7 %, dont 5 % pour le vélo et 2 % pour le vélo électrique. L'ITDP a élaboré deux scénarios afin d'évaluer les tendances des émissions des GES. Un scénario tendanciel dérivé des constats passés et actuels et le deuxième scénario plus agressif qui se base sur les potentialités réelles de développement du vélo et du vélo électrique dans les

centres urbains en assumant des actions fortes, à tous les niveaux des gouvernements, pour favoriser l'usage du vélo. Le scénario tendanciel conduit à une part modale stable à l'horizon 2030 et à une légère diminution en 2050. Quant au scénario agressif, il suppose une augmentation de la part modale combinée vélo/vélo électrique de 17 % à l'horizon 2030 et qui continuera à grimper pour atteindre 23 % en 2050. Il en résultera une réduction des émissions du GES de 150 millions de tonnes d'équivalents CO₂ entre 2015 et 2030 et de 300 millions de tonnes d'équivalents CO₂ à l'horizon 2050. Ces réductions représentent respectivement 7 % et 11 % des émissions mondiales des GES liées au secteur des transports comparativement au scénario tendanciel. Cette étude a par ailleurs évalué les économies monétaires liées à l'usage accru du vélo et du vélo électrique. Les économies en termes des coûts des infrastructures (construction et entretien), du coût d'achat et d'opération des véhicules, y compris l'énergie utilisée par les différents modes de transport, sont évaluées à 6 trillions de \$ US entre 2015 et 2030 et pourront atteindre 24 trillions de \$ US à l'horizon 2050.

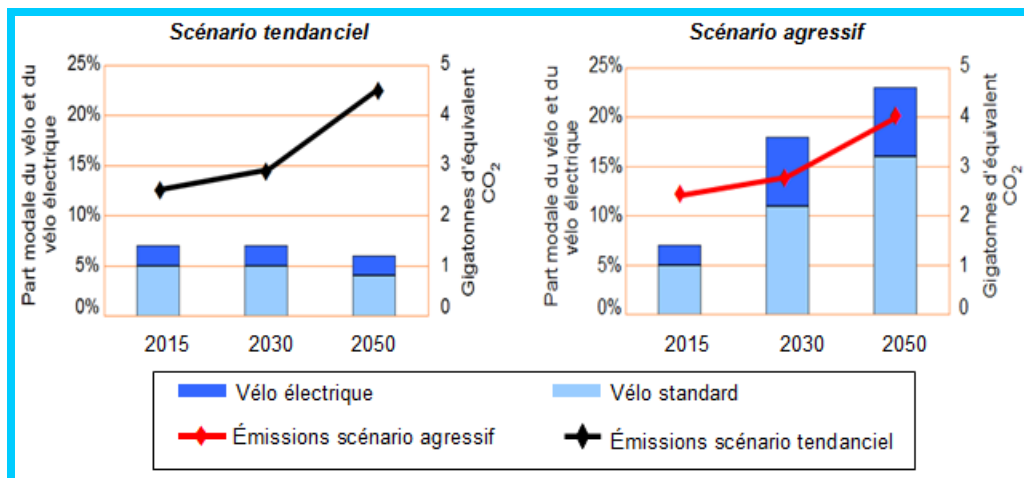


Figure 87 : Impact d'un usage accru du vélo et du vélo électrique sur les émissions des GES

Montréal est sans contredire la capitale nord-américaine de la pratique du vélo. Avec la moitié de sa population qui pratique le vélo, Montréal se trouve au sommet des villes nord-américaines en ce qui concerne la part modale du vélo. Ce sont 2,5 % des déplacements quotidiens sur l'île de Montréal qui se font en vélo selon l'enquête origine-destination 2013, ce qui correspond à 116 000 déplacements par jour. Sachant que le montréalais parcourt en moyenne 49 km par semaine, il en résulte que le vélo contribue à 812 000 km quotidiennement sur le marché des déplacements des personnes à Montréal (Réf. : 90). Alors, quel impact a le vélo sur les émissions des GES à Montréal ?

Sans prétendre mener une étude scientifique, il est possible d'évaluer approximativement les économies des émissions des GES selon le niveau d'utilisation du vélo à Montréal. Sur la base des émissions kilométriques pour des

véhicules nord-américains, citées dans l'étude *Urban Transportation Report card* (Réf. : 88), la voiture émet 282 g/passager-km, et l'autobus 113 g/passager-km. En ce qui concerne le vélo, on reprend la valeur calculée par l'*European Cyclists' Federation* (ECF) qui s'établit à 21 g/km.

En émettant l'hypothèse que les cyclistes auraient utilisé à parts égales la voiture particulière et l'autobus, en 2013, le vélo permettait d'économiser 143 318 kg d'équivalent CO₂ quotidiennement.

Auto et bus :

$$(812\ 000\ \text{km} * 50\ \% * 282\ \text{g}) + (812\ 000 * 50\ \% * 113\ \text{g}) = 160\ 370\ 000\ \text{g d'équivalent CO}_2$$

Vélo :

$$812\ 000\ \text{km} * 21\ \text{g} = 17\ 052\ 000\ \text{g d'équivalent CO}_2$$

Économie :

$$160\ 370\ 000\ \text{g} - 17\ 052\ 000\ \text{g} = \mathbf{143\ 318\ 000\ \text{g d'équivalent CO}_2/\text{jour}}$$

Supposons que l'engouement des Montréalais pour l'usage du vélo atteint des proportions équivalentes à celles du secteur du Plateau-Mont-Royal, dont la part modale en 2013 était 10,8 %. Selon cette hypothèse, la distance parcourue en vélo sera plus que quadruplée et atteindra 3,5 millions de kilomètres quotidiennement. Les économies en terme d'émissions des GES, tout en gardant les mêmes paramètres de calcul que précédemment, seraient de l'ordre de 619 134 kg d'équivalent CO₂ quotidiennement.

Il reste que le défi est d'amener le plus de citoyens à choisir le vélo pour leurs déplacements de tous les jours. Les gains seront encore très substantiels si les nouveaux usagers délaissent leur voiture au profit du vélo ou du vélo électrique. Or, pour que le vélo devienne réellement un mode de déplacement à part entière, il faut viser à développer une vraie « culture de vélo ». La culture du vélo dans une ville ne se construit pas seulement par le développement des infrastructures cyclables, mais par une approche intégrée et participative. Les éléments clés de cette approche sont :

- une volonté politique claire et supportée par la mise en place d'une réglementation en faveur du vélo et visant à augmenter substantiellement la part modale du vélo ;
- une planification stratégique des infrastructures routières permettant de développer un réseau cyclable sécuritaire, cohérent, attractif et direct ;
- un aménagement du territoire plaisant qui favorise les déplacements de proximité et l'intermodalité et redonne au vélo la place qu'il mérite ;
- un éventail de services offerts aux cyclistes, notamment des douches à la destination, des stationnements sécuritaires et protégés des intempéries,

des points de réparation des pneus libre-service et des points d'information aux cyclistes ;

- un fort contenu de marketing social pour donner une image sociale valorisante à la pratique du vélo utilitaire et pour accroître son acceptabilité comme mode de transport à part entière dans le cocktail des transports ;
- des campagnes de communication sur une base permanente permettant d'informer, d'éduquer, de responsabiliser, de sensibiliser, de convaincre, de récompenser les cyclistes et les non-cyclistes. Encourager la cohabitation des différents usagers dans l'emprise routière. Établir des espaces d'échange avec les groupes d'intérêts afin de partager les expériences et les points de vue et d'établir des priorités communes.

La culture du vélo permet de changer les comportements et de transformer l'image des villes. C'est une approche qui nécessite du temps et beaucoup d'audace et de volonté politique. La résistance au changement sera manifeste et les droits acquis, principalement ceux des automobilistes, devront être revus à la baisse.

Une autre façon de faire augmenter la part modale du vélo est de l'utiliser pour les services, principalement dans les milieux urbains denses et congestionnés. Un peu partout dans le monde ont fleuri des entreprises centrées sur la pratique du vélo. Des initiatives toujours écologiques, souvent à vocation sociale, et parfois très originales font leurs entrées sur le marché de transport, traditionnellement réservé aux véhicules motorisés.

Le classique c'est bien sur la livraison du courrier en vélo. Qui n'a pas croisé ces coursiers qui sillonnent les rues du centre-ville de Montréal, quelles que soient les conditions climatiques ? Il y a juste quelques années, la livraison du courrier par les compagnies privées se faisait exclusivement en voiture. La congestion et les économies associées à l'usage du vélo ont vite transformé cette industrie de façon fondamentale.

Depuis quelques années, on peut voir dans les rues de Montréal, durant la période de déménagement, des déménageurs beaucoup moins encombrants que les camions, il s'agit de déménageurs en vélo. Grâce à des remorques robustes spécialement conçues pour transporter meubles, boîtes et appareils électroménagers, le déménagement d'un appartement de deux chambres peut se faire en six voyages. Ces remorques ont une charge maximale d'environ 270 kg, soit l'équivalent d'un volume de 3 à 4 mètres cubes. À Londres, la compagnie *Cargo Bike* permet de réaliser le déménagement sur un vélo, capable de transporter 400 kilos et mieux connu en Flandre sous le nom de « Bakfiets ». C'est une solution efficace pour les déménagements sur de courtes distances.

Le transport de marchandises peut prendre différentes formes selon la nature de la marchandise transportée. Par exemple aux Pays-Bas, Ikea met à la disposition des

clients, des vélos cargos pour transporter la marchandise achetée. La capacité de ces vélos cargos est de 250 kg et ils sont munis de deux sièges afin d'offrir la possibilité à deux personnes de s'entraider dans l'effort. Une compagnie de distribution des aliments biologiques en Allemagne utilise des triporteurs d'une capacité de 300 kg. Ces derniers étant à assistance électrique, ils peuvent aisément parcourir jusqu'à 100 km. La recharge des batteries de ces vélos-cargos s'effectue grâce à des panneaux solaires installés sur les conteneurs.

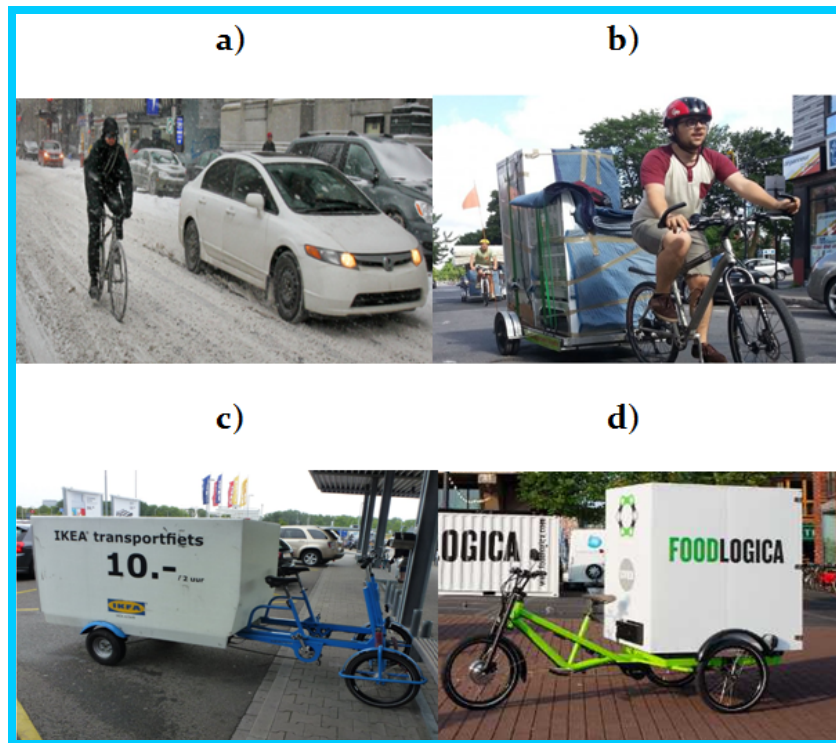


Figure 88 : Un coursier à Montréal durant l'hiver a), déménagement en vélo à Montréal b), location de vélos cargos chez Ikea aux Pays-Bas c), et finalement, la distribution d'aliments biologiques en Allemagne d) (Réf.: 91, 92, 93, 94)

Un autre classique est le vélo-taxi. Bien sûr, on pense instantanément au *Cycle-rickshaw*, ce tricycle utilisé comme taxi urbain dans plusieurs pays d'Asie, notamment la Chine et l'Inde. Dans les pays développés, l'utilisation du vélo-taxi était longtemps cantonnée dans des secteurs touristiques, où l'on offre aux visiteurs un circuit pour explorer l'endroit. Actuellement, les vélo-taxis sont de retour dans plusieurs grandes villes en Europe et aux États-Unis. Il s'agit souvent d'un tricycle à assistance électrique qui peut transporter aisément deux personnes, confortablement installées et abritées. Ces vélos sont idéals pour parcourir des distances en bas de 5 kilomètres et la surface de la coquille permet de rentabiliser davantage ce service, en offrant des espaces publicitaires.



Figure 89 : Transport d'écoliers en Inde et vélo-taxi à Paris (Réf. : 95, 96)

Depuis 2002, une petite entreprise offre aux habitants de la ville américaine de Northampton, au Massachusetts, un service écologique de collecte des ordures ménagères, des matériaux à recycler et du compost. Alors que ce service implique généralement les arrêts fréquents de gros camions bruyants et polluants, l'entreprise locale *Pedal People* utilise des remorques adaptées autant pour la collecte sélective que la collecte des ordures ménagères. Les poubelles peuvent avoir un volume maximum de 60 gallons et le tarif dépend du poids et de la fréquence de la collecte. La compagnie réalise environ 15 000 collectes annuellement et elle détient un contrat avec la municipalité pour la collecte des ordures des poubelles publiques.



Figure 90 : La collecte des ordures, du recyclage et du compost à Northampton même en hiver (Réf.: 97)

Outre les usages plutôt standards du vélo, il existe aussi des usages assez insolites. La compagnie *European Sperm Bank*, localisée à Copenhague, a décidé d'effectuer ses livraisons d'une façon respectueuse de l'environnement. La livraison aux cliniques de fertilité de la grande région de Copenhague est faite par le *Sperm Bike*, un vélo adapté ayant la forme d'un spermatozoïde. Les échantillons sont gardés au frais dans le compartiment frigorifique du *Sperm bike* et ce vélo, qui ne peut passer inaperçu, a le mérite de faire la promotion du don de sperme à moindres frais.

Encore plus original : au Danemark, il est possible de remplacer le corbillard par un vélo adapté. Depuis 2014, une entreprise de pompes funèbres propose aux défunts les plus « écolos » de faire leur dernier voyage à vélo. Il s'agit d'un service funéraire à faible empreinte carbone et de plus, le cercueil lui-même est biodégradable. Ce corbillard à pédales est devenu populaire sachant que les personnes engagées dans la défense de l'environnement n'ont vraiment pas envie que leur dernier voyage pollue.

Le vélo peut donc accompagner une personne depuis sa conception, le long de sa vie et jusqu'à son dernier voyage. On peut bien parler du voyage d'une vie !



Figure 91 : Le voyage d'une vie – du transport du sperme au service funéraire, tout est possible par vélo! (Réf.: 98,99)

CONCLUSION

Le vélo est plus qu'un mode de transport. Il représente autant un moyen d'amélioration de la condition physique, un appui à l'environnement et une opportunité de développement de l'économie sociale. Aussi, le vélo est utilisé comme moyen d'engagement politique et comme une manière de se dissocier des générations précédentes qui ont opté massivement pour la voiture. Il n'y a peut-être nul autre mode de transport qui couvre tant de différents domaines d'expérience humaine.

Néanmoins, le vélo comme tout autre moyen de transport remplit la même fonction, soit de transporter des personnes, voir de la marchandise d'un point à un autre. Pour réaliser cette fonction, le vélo doit se maintenir en équilibre, se propulser, se guider et se ralentir. Aussi, le cycliste s'attend, en toute légitimité, que son déplacement soit sécuritaire, confortable et agréable.

Faire du vélo paraît tout naturel aux centaines de millions d'usagers qui le pratiquent à travers le monde. Or, un geste aussi simple que rouler en vélo, obéit à des lois variées et relativement complexes. La physique, la mécanique, la biomécanique et l'ingénierie sont parmi ces sciences qui permettent de mettre sous forme d'équations la dynamique, le contrôle, la conduite et la performance du vélo. En fait, à chaque tour de pédale, une multitude de phénomènes physiques et physiologiques entrent en action. Il n'est pas surprenant que le vélo soit devenu l'outil pédagogique par excellence pour l'enseignement des sciences physiques à tous les niveaux académiques.

Le vélo est extraordinairement efficace tant sur le plan physiologique que sur le plan mécanique. Le vélo, propulsé par la seule force musculaire est le mode de déplacement le plus efficace du point de vue de l'énergie qu'une personne doit dépenser pour parcourir une distance donnée. Le vélo se trouve aussi au sommet en ce qui concerne l'efficacité mécanique. En effet, au moins 85 % de l'énergie que le cycliste transmet aux pédales est acheminée aux roues, contrairement, par exemple, à la voiture dont le rendement mécanique se situe autour de 25 %. Aussi, le vélo peut transporter plusieurs fois son poids. C'est donc un moyen efficace de transport de marchandises.

Cependant, le vélo reste un moyen de déplacement vulnérable face aux modes motorisés. Le cycliste, avec presque aucune protection, subit directement autant les intempéries que les inconvénients dus à la circulation dans un environnement mixte. Ces inconvénients et sa vulnérabilité peuvent avec le temps, faire pencher la balance vers l'abandon du vélo si rien n'est fait pour améliorer la situation.

Le vélo est aussi un formidable allié dans la lutte contre le réchauffement climatique. Comme mode de transport, il génère une faible empreinte carbone, soit moins que le 1/12 des émissions générées par les voitures pour chaque kilomètre parcouru. Incontestablement, le vélo est un moyen de transport très efficace à tous les niveaux. Ne serait-il pas plus équitable d'accorder la priorité, en termes de moyens financiers et d'occupation de la voie publique, à ce mode de déplacement efficace et efficient ?

Pendant plus de 150 ans, la science et le vélo ont fait conjointement beaucoup de chemin. Les processus créatifs et ingénieux qui ont conduit au design moderne des vélos pourraient encore évoluer. Actuellement, les avancées dans le numérique, dans la nanotechnologie et dans les sciences des matériaux annoncent un avenir technologique prometteur pour la fabrication du vélo et des accessoires qui amélioreront autant la sécurité que le confort du cycliste.

*La beauté de la bicyclette réside dans sa sincérité.
Tout son mécanisme est ouvert et visible.*

J. Bertaut, 1936

1. http://quebec.huffingtonpost.ca/2014/05/05/velo-fantome-mathilde-blais-accident-viaduc-saint-denis_n_5265874.html
2. La petite histoire de la bicyclette. <http://cyclos68.free.fr/histoire1.htm>
3. <http://archivisiondirectory.blogspot.ca/2013/11/first-bicycle-ever-invented.html>
4. Retour vers le passé. <http://gpcqm.ca/news/14/98/Retour-vers-le-passe/>
5. Manuel Ausloos-Lalanda. <http://graphitepublications.com/petite-histoire-du-velo-a-montreal/>
6. catalogue été 1899 des Grands Magasins du Tapis Rouge-Paris. http://anciennepedale.blogspot.ca/2013_02_01_archive.html
7. https://www.buzzfeed.com/aishagani/these-iranian-women-are-defying-a-fatwa-by-riding-their-bicy?utm_term=.tnPD7zrVe#.remN9mpwB
8. <http://www.epmagazine.org/storage/201/ro-bicycles.aspx>
9. David E.H. Jones. The stability of the bicycle. Physics today, avril 1970
10. Kooijman J. D. G et al. A Bicycle Can Be Self-Stable Without Gyroscopic or Caster Effects. www.sciencemag.org, november 2011
11. Cooke A. et al. Methods to assess the stability of a bicycle rider system. http://doc.utwente.nl/82222/4/DSC12_8524_FI.pdf
12. Delon C. et al. L'équilibre à vélo. Olympiades de physique, France. Session 2007-2008
13. Moore J.K. Human control of a bicycle. Thèse de Doctorat, University of California Davis, 2012
14. François Piednoir. Pédaler intelligent-La biomécanique du cycliste. <http://www.piednoir.com/index.html>
15. Which Muscles are Really Used During the Pedal Stroke? <https://www.bikejames.com/>
16. Éric Poirier. Influence de paramètres biomécaniques et électro physiologiques sur la technique de propulsion. Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 2009
17. Durand Thibault. Impact d'un entraînement en musculation au niveau des membres supérieurs sur la qualité de force explosive des membres inférieurs. Mémoire de Maîtrise, Université de Montpellier I, 2006
18. Le dopage. Dans [https://fr.wikipedia.org/wiki/Dopage_\(sport\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Dopage_(sport))
19. Christophe Mathieu. Aérobie, Anaérobie Alactique et Lactique. 2015. <http://couloir4.com/aerobie-anaerobie-alactique-et-lactique-quest-ce-quest-cest/>
20. Les besoins énergétiques du cycliste. <http://www.velofcourse.fr/>
21. Dr Guy Thibault. Vélo, santé et performance. Vélomag.com . 2013

22. Chester R. Kyle. The mechanical efficiency of bicycle derailleur and hub-gear transmissions. Human power, 2001
23. Rolling resistance. www.TheEngineeringToolBox.com
24. James C. Martin et al. Validation of a mathematical model for road cycling power. Journal of applied biomechanics, 1998
25. R. Leca. Biomécanique – Résistance à l'avancement, Centre universitaire Condorcet Le Creusot, 2014. <http://www.culturestaps.com/>
26. R. Leca, Biomécanique – La fréquence du pédalage. Centre universitaire Condorcet Le Creusot, 2014. <http://www.culturestaps.com/>
27. F. Grappe. La meilleure façon de pédaler. Sport & vie, Édition Faton SAS-Dijon, 2009
28. AASHTO. Guide for the development of bicycle facilities. Washington DC, 1999
29. [www. Eltis.org](http://www.Eltis.org)
30. Mayer Hillman. Cycling and the promotion of health – Policy studies, vol. 14 (2) 1993
31. Active transports and health. The TAPAS research programme and health impact assessments in Barcelona, Spain, 2015
32. Observatoire régional de santé d'Île-de-France. Les bénéfices et les risques de la pratique du vélo. Évaluation en Île-de-France. 2012
33. Société d'assurance automobile du Québec. Bilans routiers de 2008 et de 2015
34. Société d'assurance automobile du Québec. Portrait « cyclistes » 2008-2013, 2014
35. Nael Shiab. journal Metro 27 juillet 2015
36. Ville de Toronto. Bicycle/Motor-Vehicle Collision Study, 2003
37. Le devoir. Édition du 30 août 2016
38. U. S. Department of Transportation. Literature Review on Vehicle Travel Speeds and Pedestrian Injuries. DOT HS 809021 October 1999
39. Société d'assurance automobile du Québec. Guide sécurité à vélo, 7e édition, 2014
40. Dr Jehane Dagher MD. Comparative Costs and Outcomes of Traumatic Brain Injury from Biking Accidents With or Without Helmet Use. Physical Medicine & Rehabilitation, Montreal General Hospital, 2014
41. Marshall L.F. et al. A new classification of head injury based on computerized tomography. J. Neuro surg 75, 1991
42. Jacobsen P. Safety in numbers: more walkers and bicyclists, safer walking and bicycling. Injury Prevention, 2003
43. Griffin, M. J. Handbook of Human Vibration. 988 p. Academic Press, 1990
44. Ramirez, M.M. Analyse vibro-biomécanique et dynamique en sport/santé. Cas du cyclisme, Thèse de Doctorat, Université de Reims, 2014
45. Gurram, R., A study of vibration response characteristics of the human hand-arm system, Thèse de Doctorat, Université Concordia, 1993

46. Dettori, N. J. et al. Non-traumatic bicycle injuries: A review of the literature. *Sports medicine, Auckland*, volume 36, 2006
47. European Agency for Safety and Health at Work, Directive 2002/44/EC, Official Journal of the European Communities, 2002.
https://osha.europa.eu/legislation/directives/exposure-to-physical-hazards/index_html
48. <https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/5830>
49. www.Dytran.com
50. <http://www.pezcyclingnews.com/features/lees-lowdown-cycling-in-the-smog/>
51. Organisation Mondiale de la Santé. Qualité de l'air ambiant et santé, 2016.
<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/fr/>
52. Direction de santé publique, Agence de la santé et des services sociaux de Montréal. Le transport urbain, une question de santé, Rapport annuel 2006 sur la santé de la population montréalaise, 2006
53. Rich D.Q. et al. Differences in Birth Weight Associated with the 2008 Beijing Olympic Air Pollution Reduction: Results from a Natural Experiment, *Environ. Health Perspect*, 2015
54. Steve Hankey. Measuring air pollution using mobile bicycle-based platform. Université de Minnesota, 2013
55. Oramip. À pied, en vélo, en métro, en bus, en voiture, quel air respirons-nous?, 2008. Oramip.org
56. À Paris à vélo..., Airparif Actualité No 32, 2009. <https://www.airparif.asso.fr>
57. James F. Pankow et al. Evaluation of Bicyclists Exposure to Traffic-Related Air Pollution along Distinct Facility Types. Portland State University, 2014
58. N. Good et al. The Fort Collins commuter study: Impact of route type and transport mode on personal exposure to multiple air pollutants. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 2015
59. Fareell, W.J. et al. Evaluation air pollution exposures across cycling infrastructure types: Implication for facility design. *JTLU*, vol.8, No. 3, 2015
60. Panis L. et al. Exposure to particulate matter in traffic: A comparaison of cyclists and car passengers. *Atmospheric Environment*. 44, 2010
61. <https://alchetron.com/Matt-Hope-622495-W>
62. Institut universitaire en santé mentale Douglas. Stress : causes et conséquences, <http://www.douglas.qc.ca/info/stress>
63. <http://montgomeryplanningboard.org/blog-news/2016/04/05/taking-stress-management-to-the-next-level-montgomery-county-planning-department-releases-an-online-roadmap-for-bicycle-stress/>
64. <http://inhabitat.com/the-mindrider-is-a-bike-helmet-that-turns-brain-waves-into-traffic-signals/mindrider-red/>
65. <http://dukodestudio.com/MindRider/>
66. Feng Liu et al. Utilizing Egocentric Video and Sensors to Conduct Naturalistic Bicycling Studies. Portland State University. Report NITC-RR-805, 2016

67. Manar A., Desmarais J.P. Cyclist Behavior on exclusive Bicycle Facility – A Longitudinal Analysis. Presented at the TRB 92nd Annual Meeting, Washington, DC, 2013.
68. Manar A., Cao G. Adapting Car Traffic Models and Concepts To Bicycle Traffic. Symposium Celebrating 50 Years of Traffic Flow Theory Portland, Oregon August 11-13, 2014
69. Evans, L., and R. Rothery, Detection of the Sign of Relative Motion when Following a Vehicle. In Human Factors, Vol. 16, No 2, 1974, pp. 161-173
70. Allen, D.P. et al., Operational Analysis of Uninterrupted Bicycle Facilities. In Transportation Research Record, 1630, Washington D.C., 1998, pp 29-36
71. www.citylab.com/commute/2016/01/germany-launches-its-national-bike-autobahn-cycle-network/422451/
72. <http://www.tuvie.com/wincycle001-futuristic-bike-by-younes-jmoula/>
73. <https://www.vanhawks.com/>
74. <https://www.kickstarter.com/projects/1106460188/smarthalo-turn-your-bike-into-a-smart-bike?lang=fr>
75. <http://newatlas.com/costelo-smart-bike/39481/>
76. <http://newatlas.com/samsung-smart-bike/32482/>
77. <http://10000km.com/2012/10/31/ruin/>
78. <https://www.electricbike.com/audi-ebike/>
79. <https://www.electricbike.com/bmw/>
80. <http://www.treehugger.com/bikes/ford-rides-into-frankfurt-with-e-bike.html>
81. <https://electricbikereview.com/fr/smart/ebike/>
82. <http://www.popularmechanics.com/cars/a10562/volvos-new-wagon-will-automatically-brake-to-avoid-cyclists-16744283/>
83. <http://www.lesnumeriques.com/electromanager/livall-bling-casque-velo-intelligent-n52079.html>
84. https://www.folksam.se/media/folksam-bicycle-helmet-test-2015_tcm5-24933.pdf
85. http://www.bybike.fr/casque-hovding-airbag-velo_p3646.html
86. <http://socialbicycles.com/#bike>
87. www.cyclingpromotion.org
88. Urban Transportation Report Card. www.transalt.org
89. European Cyclists' Federation. Cycle more Often 2 cool down the planet! Quantifying CO₂ savings of Cycling, 2011
90. Vélo Québec. L'état du vélo à Montréal en 2015. http://www.velo.qc.ca/files/file/expertise/VQ_EDV2015_Mtl.pdf
91. Benjamin Shingler, La Presse Canadienne 2013
92. The Gazette. Édition du 12 janvier 2012
93. http://1.bp.blogspot.com/-OF0o1ZlmwPY/T_DXP1LnpGI/AAAAAAAAAPEk/kPexvgdk_Qk/s1600/freight%2Bbikes%2Bfrom%2Bikea.JPG
94. FoodLogica.com
95. Terragaleria.com

96. Travelaway.me
97. www.pedalpeople.coop
98. www.copenhagenize.com/2011/04/sperm-bike-in-copenhagen.html
99. www.bededamerne.dk/rustvogncyklen

À PROPOS DE L'AUTEUR



M. Abdelaziz Manar détient un doctorat (Ph.D.) spécialisé en circulation routière de l'école Polytechnique de Montréal (Québec, Canada). Durant sa carrière, il a traité divers sujets notamment, la sécurité des déplacements, la psychophysique du conducteur, la modélisation et la simulation du trafic et les systèmes de transport intelligents. M. Manar a commencé sa carrière professionnelle il y a 30 ans comme chargé d'enseignement et associé de recherche à l'école Polytechnique de Montréal simultanément à ses études doctorales. Au début des années 90, M. Manar est entré au service du ministère des Transports du Québec et depuis 2009, il travaille pour la Ville de Montréal. Il a aussi agi à titre de consultant indépendant auprès de la Banque Mondiale et de la Banque africaine de développement. M. Manar, a publié plusieurs articles scientifiques et a donné des conférences autant au Canada qu'à l'international. Cet ouvrage se veut une tentative de dévoiler le côté peu connu du vélo par le grand public, soit la dynamique du vélo et les interactions du couple cycliste-vélo avec son milieu de conduite. Un traitement scientifique du cyclisme qui, on le souhaite, donnera au lecteur un aperçu sur la complexité invisible du fonctionnement de cette machine, d'apparence tellement simple.

Veillez adresser vos commentaires à: LeVeloEnMouvement@gmail.com