

La bicyclette

par Jean-Pierre Vieren

Jean-Pierre Vieren est coureur cycliste amateur. Il est aussi ingénieur au CNRS et travaille au laboratoire de physique de l'Ecole Normale Supérieure.

■ Née vers 1885, dérivée du vélocipède, la bicyclette est redevenue à la mode. Cette nouvelle vague d'intérêt pour le vélo trouve plus sûrement son origine dans la volonté d'élucider le mystère de sa stabilité ou dans le plaisir de la randonnée que dans les économies d'énergie ou dans l'esprit de compétition. La bicyclette actuelle est le fruit de l'ingéniosité et des recherches empiriques de multiples constructeurs et utilisateurs. Par son extrême simplicité et sa quasi perfection, elle défie les analyses des scientifiques.

■ La bicyclette a cent ans et n'en a pas l'air. Symbole de jeunesse et de liberté, on la dirait sans cesse renaissante. Elle n'hésite pas, par exemple, à rivaliser avec la toute puissante automobile, son ennemie de cœur, née comme elle à la fin du XIX^e siècle, sous les cieux de la société industrielle moderne. A l'origine du vélo, on trouvait les noms des constructeurs d'automobiles prestigieux de l'époque comme Peugeot, Clément, Terrot, Hillmann, Olds, Morris, Rover, Daimler, Benz... Aujourd'hui, la bicyclette a beau être le contraire du gadget pour société de consommation, puisque convenablement entretenue, elle doit pouvoir transporter plusieurs générations pour un prix très modique et parcourir ainsi 300 000 km ou même davantage. Renault, Peugeot toujours, Porsche même investissent à nouveau dans le «deux-roues» dont la production mondiale est d'environ cinquante millions d'unités par an. En France, vingt millions d'exemplaires ont été vendus entre 1970 et 1980.

Mais la raison de cette longévité heureuse n'est-elle pas simplement que nous l'aimons tous, passionnément, sans exception ? Nous les enfants fiers de l'avoir conquise, nous les moins jeunes dont elle maintient le cœur en forme, nous les gros mangeurs qu'elle aide à maigrir, nous les géants de la route et nous leurs admirateurs, nous les amateurs d'économies

d'énergie ou d'air pur, et même nous, les scientifiques, intrigués par la simplicité de sa technologie, par sa remarquable efficacité, par les subtilités de son équilibre. De nombreux chercheurs ont tenté récemment d'analyser la bicyclette, comme pour fêter l'anniversaire de cette centenaire en forme, pas vraiment, pour l'instant du moins, pour la transformer radicalement, mais au moins pour la comprendre, tant du point de vue de son histoire que de son rendement énergétique et de sa stabilité.

Histoire d'un mythe.

Bien que l'invention de la roue remonte à 5 000 ans environ, il est difficile de situer les origines de la bicyclette avant 1800. Le célérifère date du début du XIX^e siècle et fut sensiblement amélioré par le célèbre Karl Friedrich von Drais, baron von Sauerbronn, qui inventa la roue avant orientable, un brevet de cinq ans déposé à Paris en 1818 l'atteste, donnant ainsi naissance à la non moins célèbre Draisienne (fig. 1). L'histoire du vélo ne commence réellement en fait que vers 1860, lorsque deux charrons parisiens, Pierre et Ernest Michaux, eurent l'idée de fixer des pédales sur la roue avant d'une Draisienne, la rendant ainsi nettement plus mobile, puisqu'auparavant il fallait pousser par terre avec les pieds (fig. 1).

Amélioration insuffisante, cependant : l'entraînement direct de la roue avant limitait trop la vitesse de l'engin. Une roue de un mètre de diamètre, c'est en effet un développement de 3 mètres et à 30 tours de pédale à la minute cela ne faisait guère que 5 km/h. C'est dire qu'on marchait aussi vite que Michaux sur ses deux roues. Bien sûr on imagina d'agrandir la roue avant motrice et ce fut le «grand Bi» (James Starley, William Hillman, Adolphe Clément) qui n'était pas beaucoup plus rapide, assez instable, et dont le rayonnage posait des problèmes techniques de fabrication (fig. 1).

C'est donc principalement l'invention de l'entraînement par chaîne, plateau et pignon qui lança le vélo. Elle fut l'œuvre de Harry J. Lawson (1879), améliorée par Hans Renold (1880). Ensuite les choses allèrent très vite, puisque tous les détails techniques de l'actuel deux-roues ont été brevetés avant 1900 : la dynamo en 1880, le cyclomoteur en 1885 (Daimler et Benz), les pneumatiques vers 1890 (John Dunlop, vétérinaire à Belfast, fut millionnaire en cinq ans), le frein à disque en 1894, le dérailleur et la roue libre en 1899. Un bicycle Rudge de 1884 ne pesait déjà guère plus de 10 kg et la bicyclette de J.K. Starley en 1885, actuellement au musée de Londres, ne surprendrait personne aujourd'hui dans les rues : son cadre ressemble de très près à celui d'une bicyclette

Figure 1. Quatre grands-parents de l'actuelle bicyclette. La roue avant mobile a été inventée par le baron von Drais (A) et les pédales par P. et E. Michaux (B). Clément trouva une esthétique solution au problème de rayonnage que posait le grand Bi (C). La bicyclette de J.D. Starley, déjà dotée de roues avec cages à billes et rayons croisés, d'une transmission par chaîne et d'une bonne selle, n'a pas l'air, quant à elle, d'être née en 1885 (D).



te moderne: elle comporte des roues avec cages à billes et rayons croisés, une transmission par chaîne et une selle en cuir munie d'une suspension très au point.

Ainsi, à l'orée du XX^e siècle, le vélo avait-il acquis l'âge adulte et sa forme définitive. Les progrès accomplis par la suite furent minimes et concernèrent surtout la rationalisation des techniques de production. Mais contrairement à ce qui a pu se passer dans l'automobile ou l'aviation, ces progrès n'ont que très peu réagi, en retour, sur la structure même du produit. Il est certain que la bicyclette avait acquis très vite de bonnes qualités techniques pour une grande simplicité, vertu à la mode de nos jours. Quant aux raisons qui en font l'un des symboles actuels de liberté ou de paix, tout le monde a en mémoire quelques événements ou images que nous citerons au hasard: la reine Victoria acheta un tricycle vers 1880 et incita ainsi, dit-on, les femmes anglaises à sortir de chez elles. C'est souvent à vélo qu'on partit en congés payés en 1936. C'est à vélo encore que le facteur ou l'hirondelle faisait sa tournée il n'y a pas si longtemps. C'est à vélo enfin que les combattants vietnamiens avancèrent vers leur libération. Le «deux-roues», sorte de moyen de transport minimum, est donc bien ancré dans nos sociétés, quel que soit le niveau de sophistication de leur technologie.

Moins fatigant que d'autres.

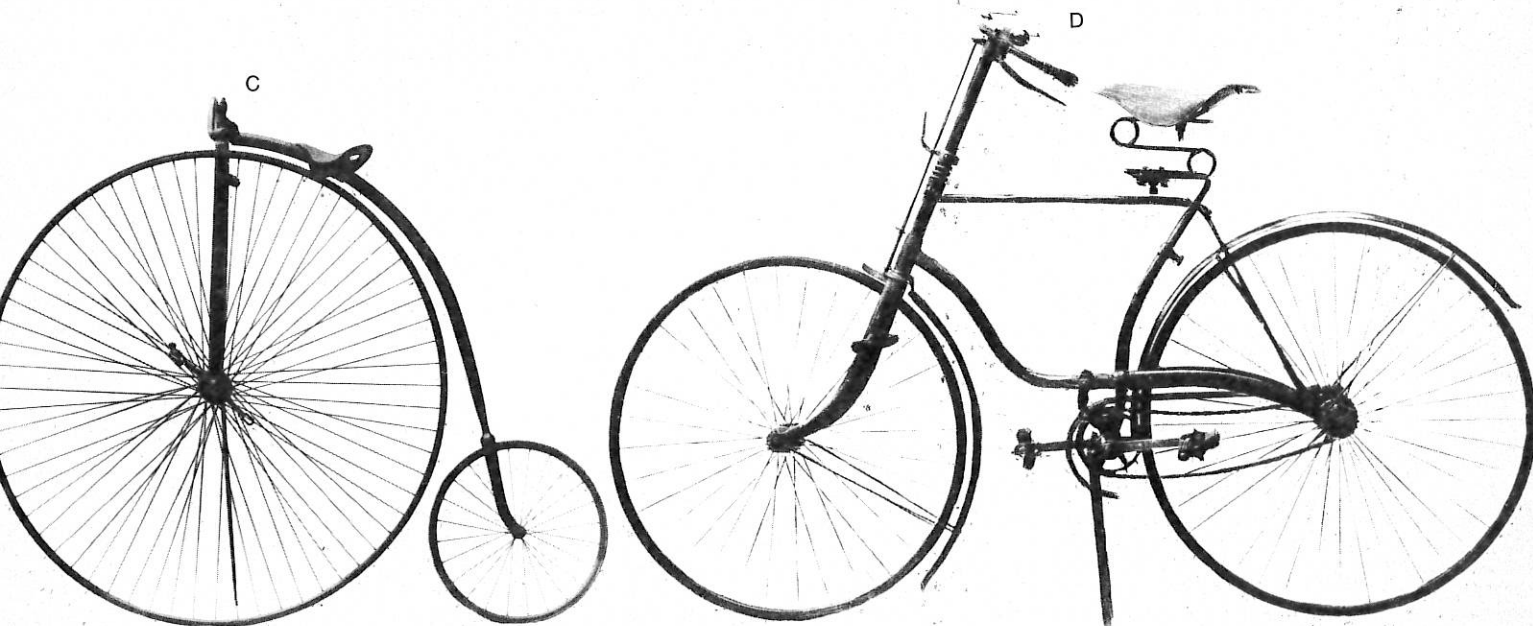
N'en déplaise à ces cyclistes rougeoyant sur les routes en pente de l'été, la bicyclette est un moyen de transport au rendement énergétique remarquable, et c'est l'un de ses aspects les plus intéressants pour le scientifique. L'énergie que dépense un individu, un animal ou un véhicule pour se déplacer dépend de la vitesse à laquelle il le fait et nous reviendrons en détail sur ce point, mais on

peut (1, 2) comparer ces différents mouvements à leur vitesse moyenne habituelle. Par kilomètre et par gramme transporté, les moins efficaces sont certainement le serpent, la souris ou la mouche. Viennent ensuite le lapin et l'hélicoptère, l'avion, l'homme à pied, le cheval, l'automobile et le saumon. Le cycliste dépense cinq fois moins d'énergie (0.15 calories par gramme et par kilomètre) que le marcheur (0.75 cal/g.km) et n'est concurrencé, au royaume de l'indice énergétique, que par le train sur rails. Pourquoi? Il nous faut envisager quelle puissance la machine humaine peut fournir et comment elle est utilisée.

L'homme tire bien sûr son énergie de sa nourriture, et le rendement de ses muscles, qui est d'environ 20 à 30 %, dépend du type d'effort accompli et de l'entraînement de l'individu considéré. Lorsqu'une énorme force est exercée lentement contre une grande résistance (râmeurs, haltérophiles) ou lorsqu'une faible force est exercée rapidement sans résistance appréciable (coup de poing dans le vide) le rendement est faible. Le bon cycliste sait bien qu'il existe un rendement optimum, entre ces deux extrêmes, et il le choisit en ajustant sans cesse son braquet, (3) donc la force qu'il exerce et son rythme de pédalage, en fonction de l'effort à fournir, c'est-à-dire du vent, de la pente et de la vitesse. Il utilise, de plus, la masse musculaire la plus puissante de son corps, ses cuisses. Fixons quelques ordres de grandeur: un homme a besoin d'environ 150 watts pour vivre au repos, et au-delà de ce seuil la puissance dont il dispose varie approximativement comme l'inverse de la durée de l'effort qu'il produit. Pendant 10 secondes, un individu moyen peut ainsi dépenser environ 750 watts, c'est-à-dire par exemple monter un escalier de 10 mètres de haut s'il pèse 75 kg. Mais sur des temps plus longs la puissance disponible décroît, bien en-

tendu. Comment le cycliste utilise-t-il cette puissance?

Lorsque la route monte il doit vaincre la gravité et fournir une puissance proportionnelle à son poids (le sien plus celui de sa bicyclette) et au nombre de mètres de dénivelé franchis par seconde. S'il s'agit d'une côte à 10 %, un grimpeur de 65 kg sur une bicyclette de 10 kg aura ainsi besoin des mêmes 750 watts pour vaincre la seule gravité s'il veut rouler à 36 km/h, c'est-à-dire s'élever de 1 mètre par seconde. Mais, sur terrain plat à vitesse constante, le poids ne joue pas de rôle appréciable: le marcheur a besoin de faire monter et descendre son corps à chaque pas (le marcheur de compétition tente de limiter ces efforts inutiles), le cycliste au contraire reste toujours sensiblement à la même hauteur. Néanmoins, en course, la tactique oblige les concurrents à de nombreuses accélérations et le poids joue alors, à nouveau, un rôle non négligeable. Mais les coureurs préfèrent souvent perdre deux kilogrammes de leur propre poids plutôt que d'alléger d'autant leur machine, laquelle ne pèse en général que 8 kg environ et perdrait alors en rigidité. Même dans le cas précédent d'une côte à 10 %, gravie à 36 km/h, une économie de poids de 1 kg ne représenterait qu'un gain de 10 watts, 1 % environ de la puissance nécessaire pour vaincre la gravité, beaucoup moins encore par rapport à la puissance totale réellement nécessaire. Le problème du poids des vélos n'est donc pas réellement crucial, quelles que soient les publicités commerciales qui l'entourent. Les pertes d'énergie dues aux frottements dans les roulements et sur le sol sont en général, elles aussi, négligeables. Sur une bicyclette moderne, on ne perd que quelques watts dans les roulements à billes, la chaîne, le dérailleur, etc. La firme anglaise Exceltoo et la firme italienne Campagnolo ont été les premières à fournir au grand public des moyeux de



Le cycliste dépense la majeure partie de son énergie à vaincre la résistance de l'air.

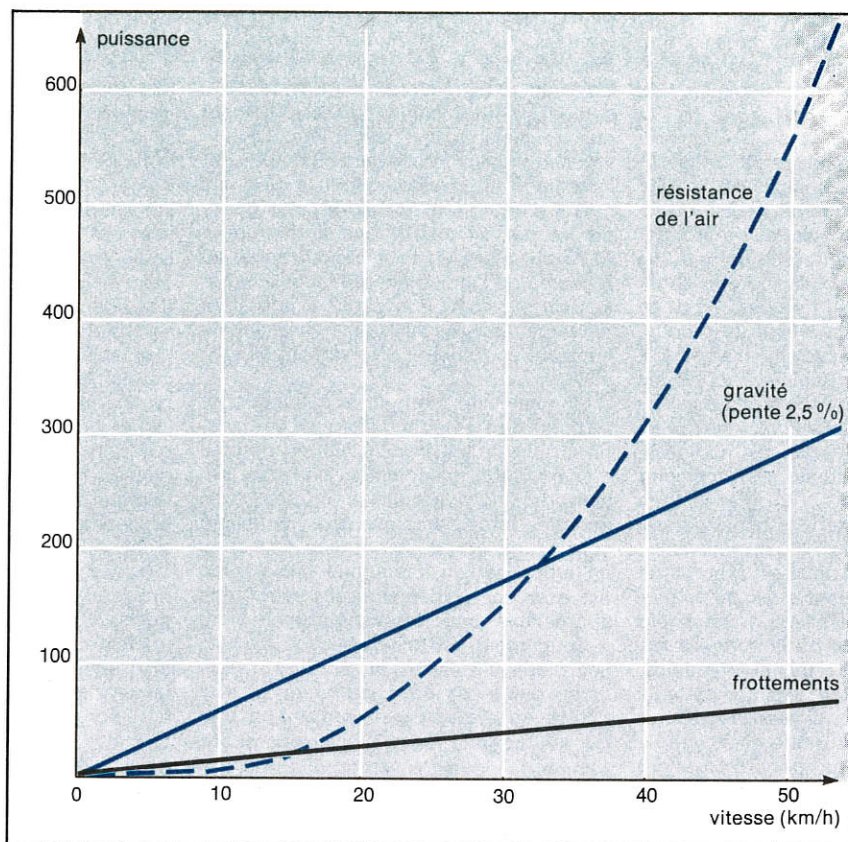


Figure 2. La puissance typiquement utilisée par un cycliste varie en fonction de sa vitesse. On distingue différentes contributions : la résistance de l'air, les frottements, l'effet de la gravité sur route à 2,5 % de pente. La puissance nécessaire pour vaincre la résistance de l'air est de loin la plus élevée, elle varie comme le cube de la vitesse (la force varie comme son carré).

roues dont l'axe, usiné au tour puis traité thermiquement pour en augmenter la dureté (cémentation trempe, test Brinnell), était rectifié ensuite à la meule fine pour présenter enfin un état de surface sans rugosité et un glissement optimal sur les portées de roulement. Il est peu probable que des améliorations substantielles puissent être apportées à de telles techniques.

Le frottement au sol, quant à lui, dépend essentiellement du diamètre des roues, du type de pneus et de leur pression de gonflage. Plus le diamètre des roues est grand, mieux on absorbe les inégalités d'un terrain bosselé, diminuant ainsi la résistance au roulement. Mais de trop grandes roues ont une trop grande inertie et trop de prise au vent, un bon compromis est donc réalisé par les roues standard de 700 mm de diamètre. Qui a déjà roulé sur pneus ballons dégonflés (1 kg/cm²) puis sur boyaux fins gonflés à 7 kg/cm² sait que, selon la pression du pneu et le poids du cycliste, la surface de contact avec le sol varie, freinant ainsi plus ou moins le mouvement. Cette surface qui est d'environ 15 cm² pour un pneu demi-ballon typique de 650 mm n'est que de quelques centimètres carrés pour un boyau de pistard gonflé à 12 kg/cm², dont le coefficient de friction au sol est ainsi réduit d'un facteur 3 environ. Il serait intéressant à ce propos d'essayer sur route

sèche des boyaux de cyclo-cross, dont l'enveloppe est constituée de pastilles, et dont la surface de contact avec le sol pourrait ainsi être encore plus réduite. L'élasticité intrinsèque du pneu joue elle aussi un rôle, ainsi que les imperfections de sa forme. Mais, en tout état de cause, ces frottements au sol restent en général négligeables, et l'on peut craindre qu'en diminuant davantage l'adhérence des pneus actuels on ne compromette plus le freinage qu'on n'améliore les vitesses atteintes.

En réalité, le cycliste dépense la majeure partie de son énergie à vaincre la résistance de l'air (fig. 2). Sans elle, il atteindrait des vitesses fabuleuses : après les cinq records qui amenèrent le Français José Meiffret à rouler à 204,778 km/h derrière une voiture de course munie d'un écran, Allan Abbot (Etats-Unis) parcourut en 1972 un mile à 225,307 km/h (fig. 3) ! Sa bicyclette était équipée de roues de 500 mm à l'avant et 600 mm à l'arrière, mais surtout d'un incroyable pédalier (222 dents) qui lui donnait un développement de 30,5 mètres et l'obligeait à se faire remorquer jusqu'à 145 km/h avant de commencer à pédaler. De quoi faire frissonner tout cycliste ayant déjà été bousculé par la turbulence de l'air d'un poids lourd ! Depuis, ce médecin américain avait institué un prix de 3 000 dollars des-

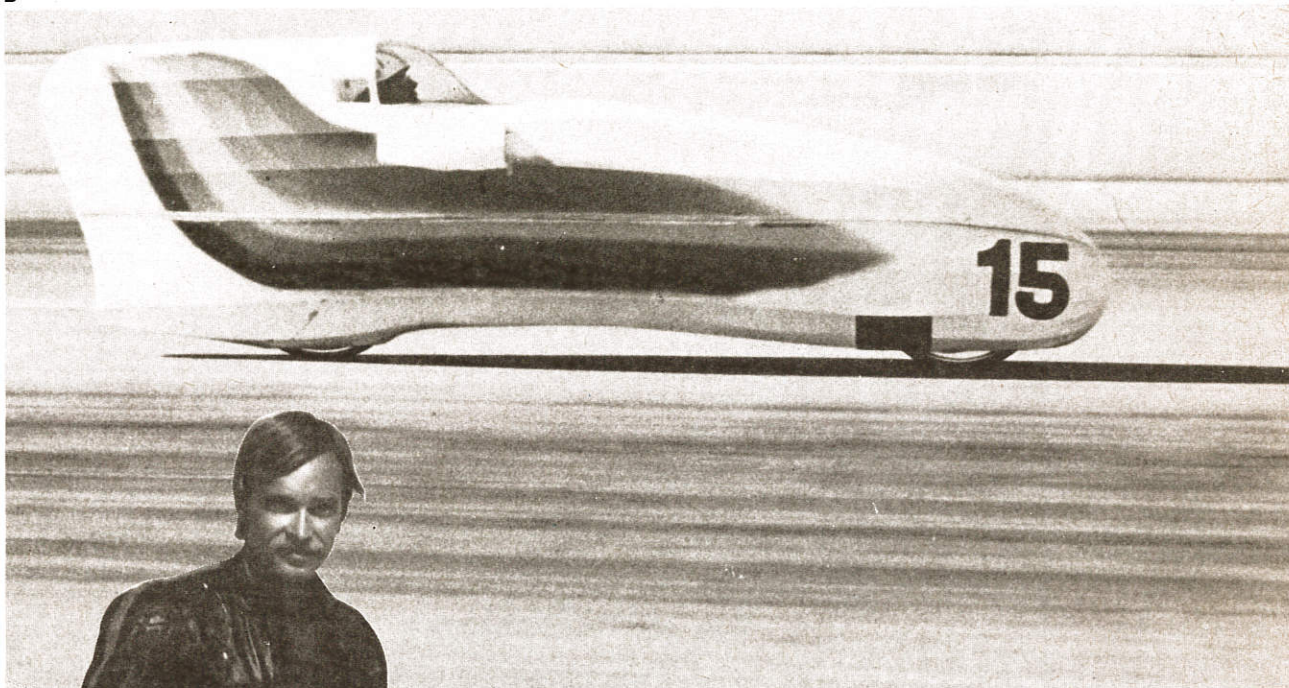
tiné à récompenser le premier véhicule à propulsion humaine qui dépasserait le mur des 55 MPH (88,5 km/h). Les engins aérodynamiques les plus hétéroclites naquirent et le prix fut enlevé en 1979 par l'Eclair Blanc que trois étudiants de Northrop University amenèrent à 89,56 km/h. Un calcul effectué par D.G. Wilson (1) montre que de tels engins, aux formes ovoïdes, où l'on pédale couché sur le dos ou sur le ventre et même éventuellement avec les bras aussi, devraient pouvoir atteindre un jour 125 km/h.

Mais quelle est donc cette forme de résistance de l'air qu'Anquetil tentait de vaincre en courbant l'échine et Roger Rivière en coupant le bout de ses lacets ou en collant du scotch sur les boudins de son casque ? Cette force est proportionnelle à la densité de l'air, à la surface frontale du cycliste, au carré de sa vitesse et à un coefficient, dit coefficient de traînée, qui dépend à la fois de son profil et de la rugosité de ses vêtements. Sur les 600 watts nécessaires à un coureur cycliste classique pour rouler à 50 km/h, 200 sont dus à la résistance de l'air sur la machine, 350 à celle sur l'homme et 50 environ seulement aux différents autres frottements (roulements...). On se souvient sans doute que la firme Renault-Gitane mit en vente en 1979 des vélos de course particulièrement aérodynamiques, et annonça qu'ils permettaient une économie d'environ 70 des 200 watts concernés, bien qu'ils n'aient pas prouvé une réelle supériorité pendant le Tour de France. La firme Porsche fit des recherches analogues avec le constructeur de cycles Puch. Mais il faut souligner qu'à trop vouloir allonger le profil des cadres de bicyclettes, on les rend particulièrement sensibles au vent latéral, et qu'il s'agit là d'un grave inconvénient.

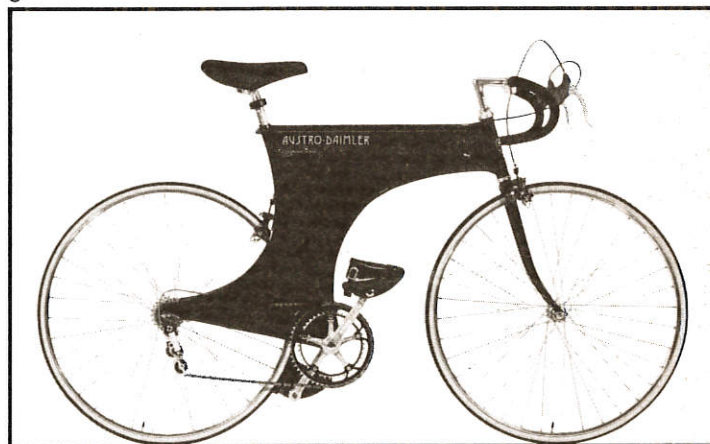
On sait aussi que pour les courses contre la montre les coureurs revêtent des maillots de soie réduisant ainsi leur coefficient de traînée. Mais la soie empêche la bonne ventilation du corps des cyclistes et l'on préfère souvent aujourd'hui des matières synthétiques ajourées car la transpiration joue un rôle essentiel qu'il nous faut maintenant envisager pour conclure sur les problèmes d'énergie. Nous avons examiné à quoi est utilisée la puissance effectivement délivrée par la machine musculaire humaine. Mais nous avons mentionné aussi que le rendement des muscles n'est que d'environ 20 à 30 %, le reste est donc dissipé sous forme de chaleur. Il fait chaud l'hiver dans les pelotons, c'est bien connu ; et F.R. Whitt (1) a estimé en 1974 que, sans ventilation, le corps d'un cycliste produisant 375 watts de puissance mécanique s'échaufferait de 2 degrés, limite tolérable, en 12 minutes seulement. Ce temps est en effet de l'ordre de celui qu'un bon sportif tient sur son «home-trainer». Ce n'est donc pas sans raison que F.R. Whitt (1) propose d'adopter des ventilateurs à ces redoutables engins. C'est bien de chaud qu'est mort l'infortuné

(1) F.R. Whitt et D.G. Wilson, *Bicycling science*, MIT Press, 1974.
(2) S.S. Wilson, *Scient. Americ.*, 228, 81, 1973.
(3) Le braquet, mot d'origine incertaine, désigne le nombre de dents du plateau avant et du pignon de la roue arrière, dont le rapport fixe le développement, c'est-à-dire le nombre de mètres parcourus par tour de pédale. Un braquet de 53 x 13 correspond ainsi à un développement d'environ 9 mètres.

B



C



D



A

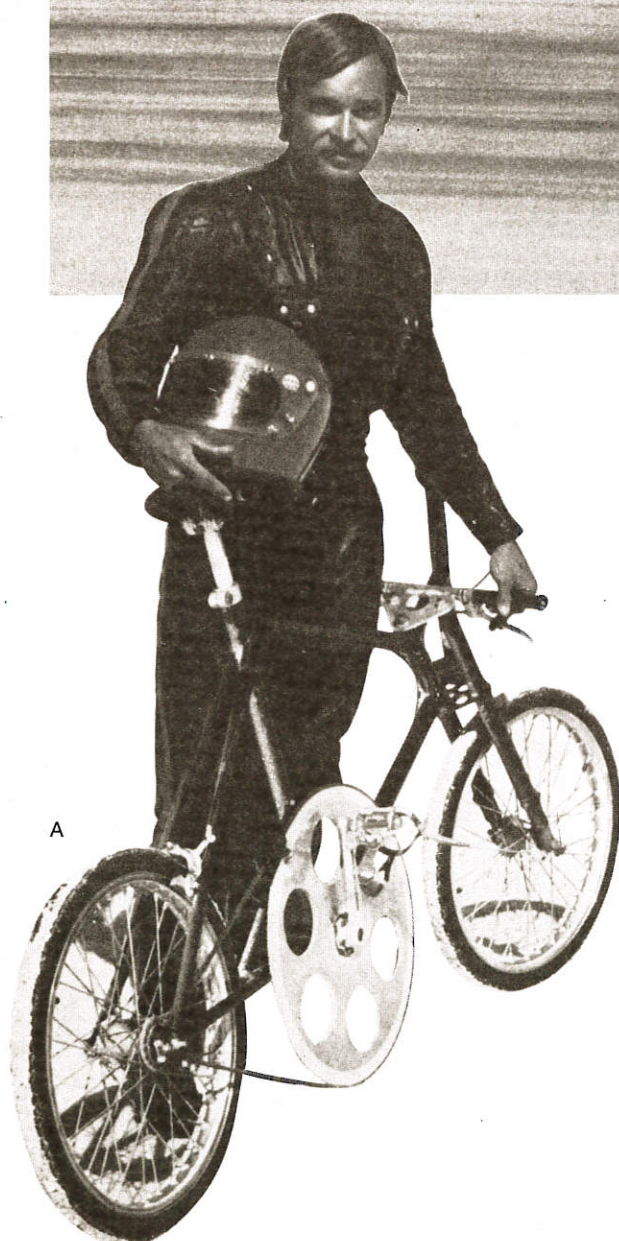


Figure 3. La résistance de l'air est la force principale que le cycliste doit vaincre. Sans elle, puisqu'abrité derrière une voiture de course munie d'un pare-vent, A. Abbott a roulé à 225 km/h avec ce vélo muni d'un plateau avant de 222 dents (A). Conçu pour des sprints le Ontario Motor Speedway (B) a roulé à plus de 85 km/h. Le vélo profilé conçu par Porsche (C) est sans doute trop sensible au vent latéral pour être utilisable sur route, mais le nouveau vélo profilé conçu par Gitane (D) permet, paraît-il, à Bernard Hinault et ses coéquipiers d'économiser 70 watts de puissance à 50 km/h. Ses tubes sont de section allongée, les câbles de freins et leurs patins sont cachés, la forme des pédales simplifiée. (A et B, clichés L'officiel, le cycle, C cliché Revue du cycle, D cliché Gitane).

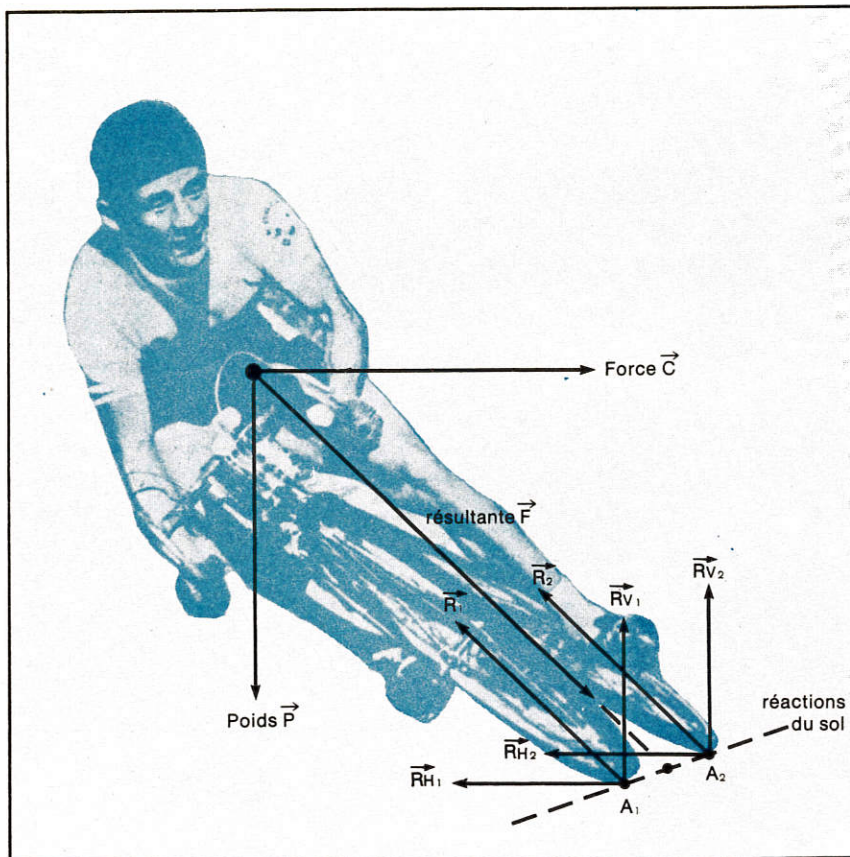


Figure 4. Il faut croire que le cycliste tournait à droite à une vitesse telle que la résultante $\vec{F}$ de son poids $\vec{P}$ et de la force centrifuge $\vec{C}$ passait par l'axe $A_1 A_2$ qui joint les points de contact de ses roues. En ces deux points la réaction du sol équilibre le poids et la force centrifuge. Les composantes horizontales de ses réactions (R_{H1} et R_{H2}) devaient avoir une sérieuse tendance à faire déjanter des boyaux que le sportif avait dû soigneusement coller sinon il serait tombé. (Clichés Cyclisme magazine. Les cahiers de l'Equipe).

Tom Simpson sur les pentes torrides du Mont Ventoux. C'est bien le manque de ventilation aussi qui faillit faire échouer Bryan Allen (Etats-Unis) lors de sa traversée victorieuse de la Manche en 1979. Henry Kramer avait offert 10 000 livres sterling au premier avion qui traverserait la Manche mû par la seule énergie de son pilote. Bryan Allen y réussit, sur un avion à pédales de 37 kg, 10 m de long, 28,6 m d'envergure, nommé Gossamer Albatros, mais ne fut pas loin d'étouffer dans son habitacle, aérodynamique certes, mais mal ventilé. Le vélo est donc un moyen de transport simple et efficace, ce qui ne veut pas dire, et après tout heureusement, qu'il n'est pas fatigant.

Ne pas tomber.

Prendre de l'exercice est bon pour la santé, nul n'en doute, encore faut-il ne pas tomber. Pourquoi la bicyclette exerce-t-elle une telle fascination sur les petits enfants si ce n'est justement parce que sa stabilité semble relever du mystère, de la magie inexplicable ? Malgré différents travaux plus ou moins scientifiques parus récemment, (4, 5) ce problème de notre vie courante n'est toujours pas parfaitement résolu. Il n'est pas simple à comprendre dans le détail et nous essaierons seule-

ment de décrire quelles sont les forces qui peuvent contribuer à la stabilité, sans prétendre détenir « la » vérité.

Séparons pour commencer deux problèmes à la fois différents et reliés : ceux de la stabilité en virage et de la stabilité en ligne droite. Un cycliste qui tourne se penche vers l'intérieur de la courbe qu'il décrit (fig. 4). Il est soumis à la fois à son poids et à une force centrifuge (vers l'extérieur du virage) dont la somme, ou résultante, doit passer par la ligne qui joint les points de contact des deux roues sur le sol s'il veut rester sur sa machine. Il ajuste à cette fin soit l'angle de son cadre avec la verticale, soit le rayon de son virage. Un cycliste qui veut aller en ligne droite mais perd l'équilibre, donc penche, tourne volontairement son guidon dans le même sens, incurve légèrement ainsi sa trajectoire et devient soumis à la force centrifuge déjà citée qui le redresse. Ces deux points semblent clairs, le deuxième ayant le mérite de mettre en valeur l'importance du couplage entre l'homme et sa machine : instinctives ou réfléchies, les réactions de l'un aux mouvements de l'autre sont bien à l'origine de la stabilité de l'ensemble ; « apprendre à faire du vélo » consiste à mettre au point ce couple d'asservissement.

Mais cette théorie n'explique ni pour-

quoi certaines bicyclettes semblent tenir debout mieux que d'autres, ni le rôle joué par la forme de la fourche de la roue avant, ni pourquoi l'on peut lâcher son guidon, ou faire du surplace. C'est à toutes ces questions que D.E.H. Jones tenta de répondre en essayant de construire des bicyclettes impossibles à monter. Il s'attacha en premier lieu à détruire un mythe bien ancré dans nos têtes selon lequel la stabilité serait due à l'effet gyroscopique de la roue avant. Si l'on exerce un couple de moment perpendiculaire à l'axe de rotation d'un gyroscope, pour le faire tourner, celui-ci réagit à angle droit, c'est-à-dire tourne autour d'une direction perpendiculaire à la fois à son axe de rotation et au moment du couple exercé. Un cerceau est un tel gyroscope et s'il penche, il change en effet de direction, incurve donc sa trajectoire et la force centrifuge déjà citée le ramène vers la verticale. Mais la roue avant d'une bicyclette ne possède qu'une faible inertie et n'est pas capable aux vitesses habituelles de maintenir en équilibre le cycliste, qui lui est lourd. D.E.H. Jones construisit d'ailleurs une machine munie d'une deuxième roue avant tournant en sens inverse de la principale pour annuler l'effet gyroscopique et l'engin (qu'il appelle « unridable bicycle Mard I », alias URB I), quoiqu'étrange, était tout à fait utilisable. Il ne faudrait pas croire cependant que l'effet gyroscopique ne joue *aucun* rôle : il est important par exemple dans le cas, certes peu intéressant, où la bicyclette roule toute seule, sans personne dessus, cas où URB I se montra effectivement incapable d'effectuer le moindre tour de roue. Il joue aussi à très grande vitesse, lorsque les roues sont voilées, produisant alors de bien désagréables oscillations. Il semble enfin le seul à jouer dans le cas du sportif qui s'entraîne sur « home-trainer ». Celui-ci tient en équilibre sur des rouleaux fixés sur un châssis et ne peut donc se servir d'une quelconque force centrifuge pour se redresser s'il sent qu'il perd l'équilibre. Il doit pédaler suffisamment vite pour entraîner ses roues à grande vitesse (la liaison par courroie des rouleaux avant et arrière est essentielle) et disposer d'un effet gyroscopique éventuel important. Il ne parvient à rester en selle qu'après une certaine accoutumance, alors que l'équilibre sur route semble nettement plus facile, et il faut en conclure que d'autres forces entrent bien en jeu.

Qui a déjà conduit une bicyclette en marchant à côté et en la tenant par la selle sait qu'en l'inclinant on fait tourner la direction. Lorsqu'on veut tourner, en pédalant sans tenir le guidon, on fait de même. Pourquoi ? Le point de contact de la roue avec le sol est derrière le prolongement de l'axe de la direction sur celui-ci (fig. 5), les spécialistes disent que la chasse linéaire est positive. Cela veut dire qu'en tournant la roue, on abaisse le centre de gravité du vélo, ou inversement que si l'on se penche, la roue avant a tendance à tourner toute seule pour minimiser l'énergie potentielle de gravitation. Notons au-

(4) D.E.H. Jones, *Physics Today*, p. 34, avril 1970.
(5) S. Timoshenko et D.H. Young, *Advanced dynamics*, Mc Graw Hill, p. 239, 1948.

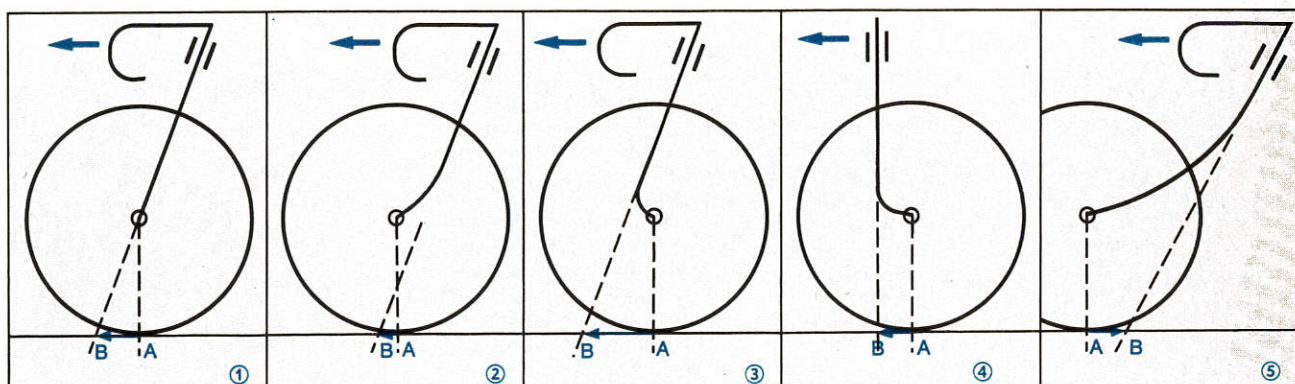


Figure 5. La stabilité d'une bicyclette dépend du signe de la chasse linéaire AB , distance entre le point de contact A de la roue et l'intersection B de l'axe de direction avec le sol. Cette chasse est dite positive si le vecteur $\overrightarrow{AB}$ est vers l'avant. Le cas 1 est stable mais peu souple car les vibrations dues aux irrégularités du sol sont intégralement transmises par la colonne de direction. Il est utilisé pour les vélos de course sur piste. Le cas 2, le plus courant, est stable et plus confortable, la courbure de la fourche jouant un rôle de suspension. Le cas 3 est très stable (trop ?) et se rencontre sur les vélos de course de demi-fond où le coureur cherche à être le plus près possible de la moto qu'il suit et qui l'abrite. Le cas 4, où l'angle de la colonne de direction est inversé, est encore plus stable, utilisé pour les roulettes de chariots lourds. Le cas 5 enfin, dont la chasse est négative, est instable et inutilisable. La réaction du sol au point A , au lieu de stabiliser la bicyclette en ligne droite comme dans tous les cas précédents, a tendance à retourner la direction.

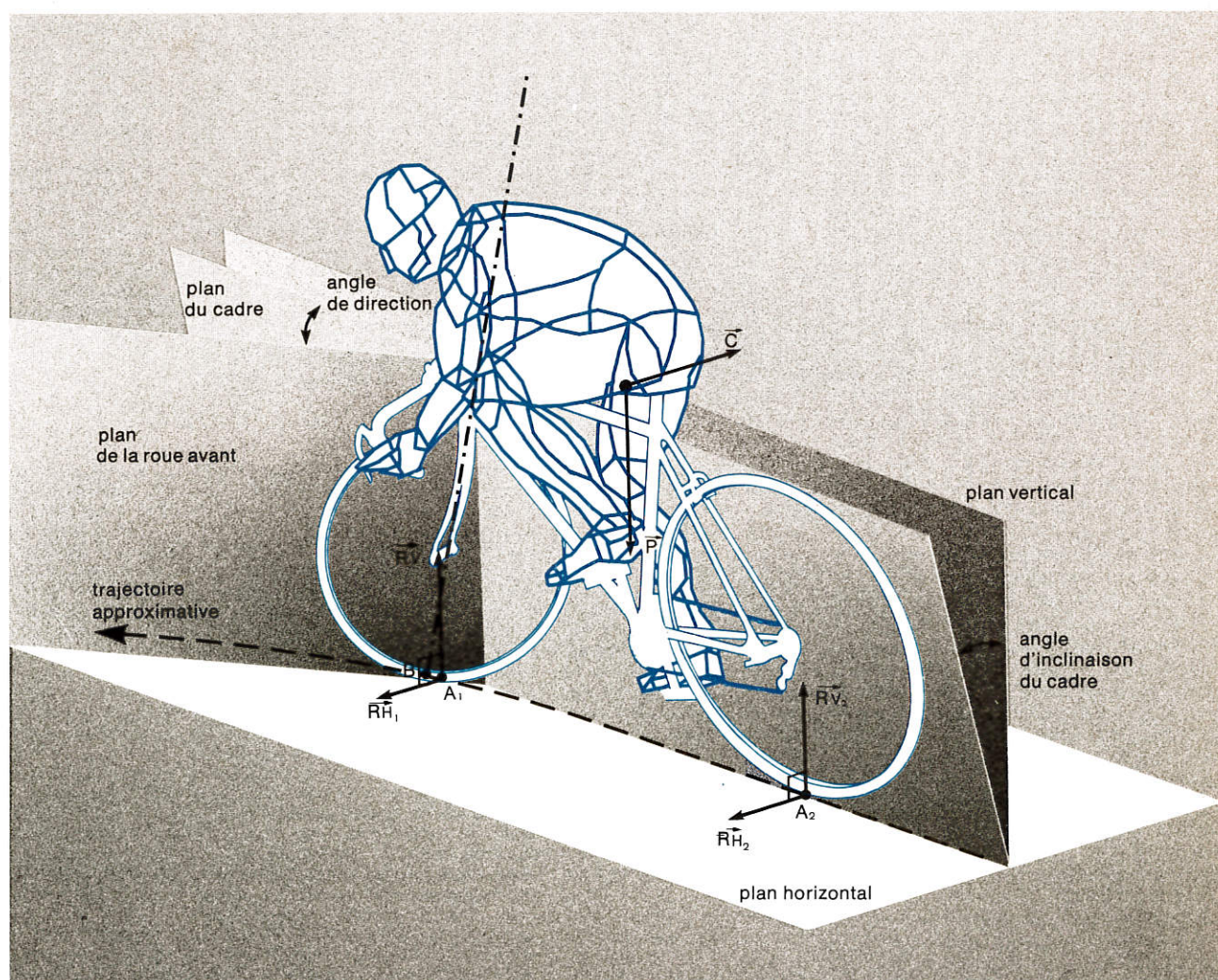


Figure 6. Lorsque le cycliste penche, la roue avant a tendance à tourner, même s'il ne l'y oblige pas volontairement. La trajectoire s'incurve, donnant naissance à une force centrifuge $\vec{C}$ qui redresse le cadre. La composante RH_1 de la réaction du sol sur la roue avant redresse, quant à elle, la direction.

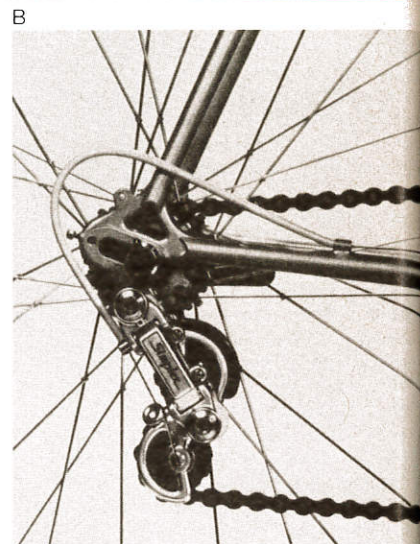
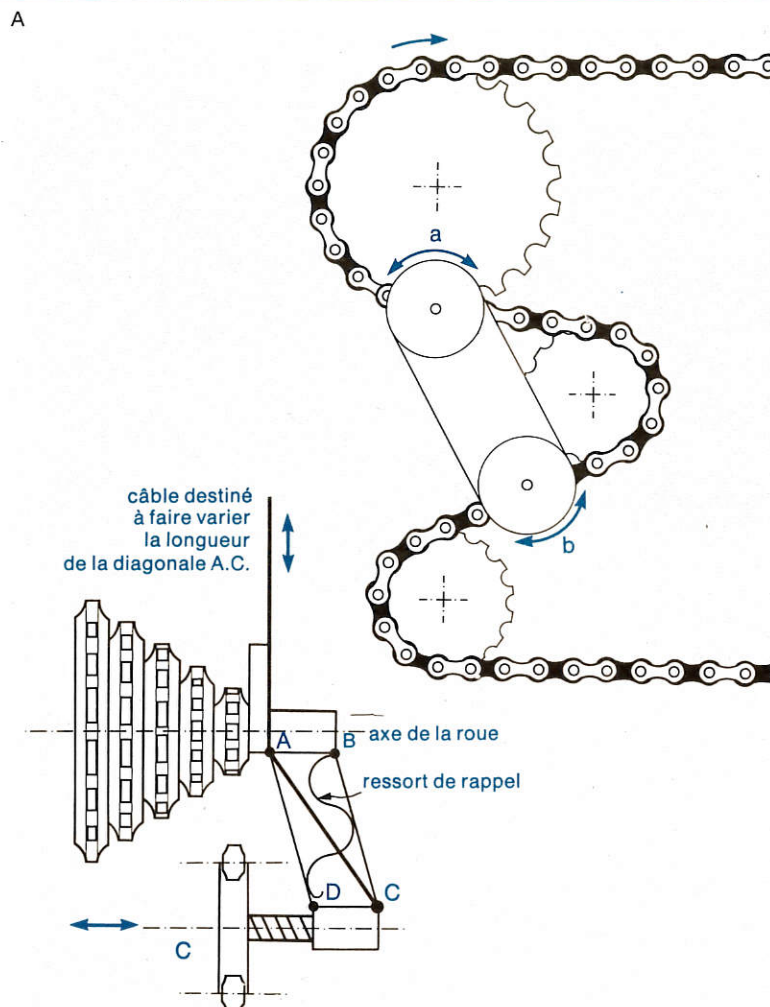


Figure A. La rotation de l'ensemble autour de l'axe a permet de dégager le dérailleur pour faciliter le démontage de la roue. La rotation du support des deux galets autour de l'axe b compense les écarts de diamètre des pignons utilisés et tient le maximum de maillons de la chaîne en prise avec le maximum de dents de la roue libre.

Le système du parallélogramme déformable ABCD rend le système mécanique très compact et accroît la précision dans la sélection des vitesses tout en ayant une grande amplitude de mouvement. Il suffit donc pour déplacer les galets vers le plus grand pignon de réduire la distance AC ; le plan des deux galets conserve le parallélisme avec le plan du pignon sélectionné.

Les changements de vitesse

■ Le changement de vitesse est l'un des perfectionnements les plus importants apportés à la bicyclette depuis son invention. Grâce à lui, le cycliste peut trouver les conditions de rendement optimum de sa puissance musculaire, quels que soient la pente, la vitesse, le vent ou son état de fatigue. Différents systèmes existent dont le rendement mécanique est excellent (environ 5 % seulement de pertes par frottement, alors que sur les machines industrielles de puissance équivalente — 1 cheval ou 750 watts — celles-ci atteignent souvent 25 %) : le dérailleur habituel, la boîte de vitesse intérieure au moyeu arrière, le pédalier expansible en sont les trois exemples principaux.

Le dérailleur est le plus simple, le plus léger (136 g pour le modèle Jubilé Huret), le plus facile d'accès, d'entretien ou de réglage, donc tout naturellement le plus répandu. Son principe consiste à guider et tendre à la fois la chaîne qu'il peut déplacer transversalement pour la faire passer

sur les différentes couronnes (3 à 7) d'une roue libre (fig. A). Le nombre de tours effectués par la roue arrière pour un tour de pédale est bien sûr égal au rapport nombre de dents du plateau de pédalier-nombre de dents du pignon arrière. Un «braquet» de 52/13 correspond ainsi à 4 tours de roue par tour de pédale, soit un développement de 8,50 mètres, alors qu'un braquet de 36/26 ne correspond qu'à environ trois fois moins. Grâce à un système couplé de deux ou trois plateaux et de trois à sept pignons munis chacun de leur dérailleur (fig. B), on obtient ainsi un grand nombre de rapports possibles répartis entre 1 et 3. Le seul inconvénient de ce système est qu'il conduit à un désalignement de la chaîne par rapport au plan des roues dentées (surtout dans les positions extrêmes telles que petit plateau-petit pignon ou grand plateau-grand pignon qui, de ce fait, ne sont pas conseillées) et ainsi à quelques frottements inutiles. C'est l'inconvénient auquel certains remédient en utilisant la boîte de vitesses intérieure au moyeu arrière. Ces boîtes (Torpedo de Fichtel et Sachs ou Sturmey-Archer) fournissent jusqu'à cinq rapports différents et ont l'avantage supplémentaire

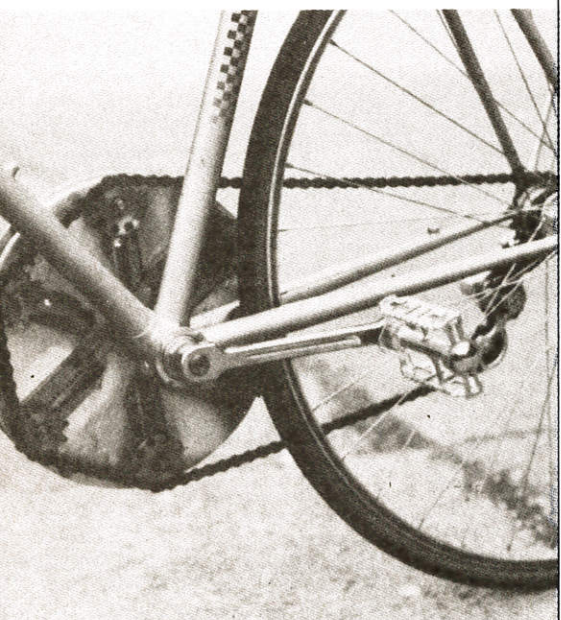
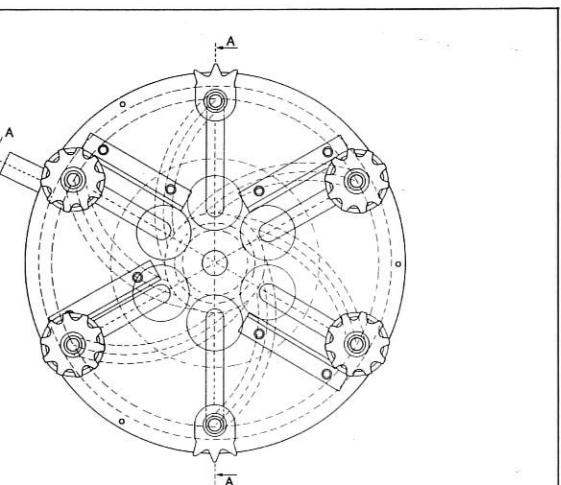
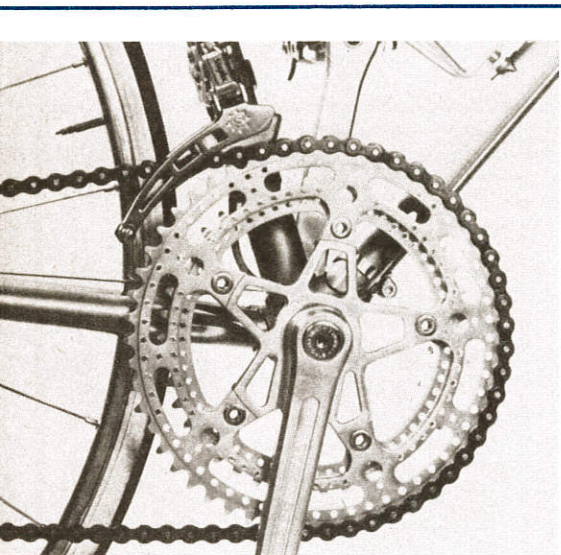
de d'être insensibles aux intempéries.

Mais elles ne sont ni légères ni facilement démontables ou réglables, et comme de plus leurs trop petites roues dentées internes chauffent à grande vitesse, elles sont mal adaptées à une utilisation sportive.

Présenté en 1980, le plateau expansible de Michel Déal (7) est une innovation intéressante (fig. C). Grâce à un système de ressorts, le diamètre effectif du plateau change automatiquement en fonction de l'effort exercé sur les pédales. La chaîne reste, là aussi, toujours en ligne, les temps morts pendant les changements de vitesse sont supprimés, mais les brusques accélérations semblent impossibles. Ce type de plateau tente enfin, comme le plateau ovale d'Edmond Pochlopek, de rendre le couple exercé sur les pédales plus homogène au cours d'un tour de plateau donc l'effort plus continu. Ce couple est en effet, en principe, nul pour les positions verticales des manivelles et maximal dans les positions horizontales mais dépend en fait du mode de pédalage de chaque cycliste. Mais ces systèmes n'ont pas prouvé, à ce jour, une réelle supériorité sur les systèmes classiques.

(6) *L'officiel, le cycle*, n° 55, p. 50, mars 1980.

(7) *L'officiel, le cycle*, n° 57, p. 43 et p. 26, mai 1980.



passage que le poids du guidon joue dans le même sens et que cet effet, dû à la simple gravité, produit le même résultat que l'effet gyroscopique mais est bien différent puisqu'il existe à l'arrêt, à vitesse de rotation nulle de la roue, et dépend de la forme de la fourche. Dès que le vélo fait mine de tomber, c'est-à-dire penche, la direction tourne, la trajectoire se courbe et l'éternelle force centrifuge tend à redresser la situation. Elle tend à redresser à la fois le plan du cadre vers la verticale et la direction de la roue par l'intermédiaire de la réaction due aux frottements sur le sol, dont le moment n'est, lui aussi, dans le bon sens que parce que la chasse linéaire est positive (fig. 6). A partir de raisonnements discutables, le chimiste anglais D.E.H. Jones tenta de fabriquer un engin instable, et n'y réussit qu'en éloignant le point de contact de la roue avant avec le sol pour rendre la chasse linéaire négative. Le résultat s'avéra bien «unridable». La stabilité est donc bien fournie par la géométrie de la fourche et de la colonne de direction. Bien que cette description nous ait paru, à première vue, satisfaisante, nous devons avouer, au risque de saturer l'intérêt du lecteur, qu'elle est incomplète. Les frottements au sol peuvent créer une force perpendiculaire au plan de la roue, même en l'absence de force centrifuge importante à cause du glissement latéral. On peut s'en convaincre aisément en poussant à la main une bicyclette dont la direction est légèrement tournée : si l'on avance, la roue se redresse et si l'on recule elle se met en travers, alors que la force centrifuge jouerait toujours dans le même sens. Il faudrait donc analyser ce frottement en détail, ce qui n'a pas encore été fait scientifiquement.

Il faut noter enfin que plus un vélo est stable, moins il est maniable, et inversement. C'est la raison pour laquelle les constructeurs choisissent une chasse linéaire plus petite pour les vélos de course que sur les vélos de livreurs : l'un a besoin d'être agile, l'autre de ne pas faire tomber ses paquets. Il s'y ajoute le fait qu'une fourche courbée constitue grâce à sa flexibilité une sorte de suspension qui est complétée par l'élasticité de la jante et la disposition des rayons, sans oublier le rôle d'amortisseur joué, lui, par les jambes du cycliste.

Et comment réussit-on à faire du surplace ? C'est plus facile qu'on ne pourrait croire, à condition de disposer d'un pignon fixe, c'est-à-dire de pouvoir avancer ou reculer. Le coureur qui pratique cet exercice tourne son guidon ; il peut ainsi, en avançant ou en reculant, déplacer l'axe des roues à droite ou à gauche et l'amener à la verticale de son centre de gravité. Il peut aussi, inversement, déplacer le poids de son corps à droite et à gauche en prenant appui sur ses deux pédales. Il peut même exercer un couple de rotation sur sa machine de la même façon. Il est vraisemblable qu'il fait un peu tout cela instinctivement pour maintenir son poids à la verticale de sa bien étroite surface de sustentation.

Mode ou progrès.

Nous venons de voir ce qui rend la bicyclette efficace et stable. Il nous faut examiner pour conclure quelles améliorations on peut espérer raisonnablement lui apporter. D'autant que les modes actuelles sont loin d'être toujours justifiées. Nous avons vu que la force essentielle à vaincre, pour le cycliste, est la résistance de l'air, et que le poids de sa machine joue un rôle souvent négligeable. Percer les poignées de frein, les plateaux, les raccords de tubes, etc. revient à créer des turbulences supplémentaires dans l'écoulement de l'air et freine davantage le vélo que cela ne l'aide en l'allégeant. Cette mode récente est d'autant plus condamnable qu'elle diminue la rigidité mécanique des pièces concernées. En revanche, cacher les têtes de vis ou les gaines de câble a un intérêt.

A propos de poids toujours, on peut se demander quels sont les avantages respectifs des différents matériaux utilisés : doit-on préférer, par exemple, les cadres en aciers spéciaux, en duralumin, en plastique ou en titane ? Dans l'état actuel des techniques, c'est surtout une question de goût et de prix. Un bon cadre doit être rigide pour bien «répondre» à la pression exercée par les pieds. Le duralumin est léger mais moins rigide que l'acier et doit donc être utilisé en plus grande épaisseur ; il a l'inconvénient de ne pas être facile à souder (les cadres en duralumin sont en général vissés ou collés) ; il est en revanche bien adapté pour des éléments tels que manivelles, pédales etc. Le plastique a surtout l'avantage de bien résister à la corrosion et n'a pas réellement conquis de marché pour l'instant. Les aciers au chrome ou au nickel (densité : 7.8 g/cm³ mais résistance à la traction 150 à 200 kg/mm²) représentent, finalement, la meilleure solution. Ils ont l'avantage d'être tellement rigides qu'ils peuvent être utilisés sous forme de tubes très minces. Chaque marque (Colombus, Vitus, Reynolds) a ses fans, qui les préfèrent davantage pour des différences (minimes) de prix ou de goût personnel que pour de réelles différences de comportement. D'autres matériaux ont vu le jour récemment (titane, zirconium, fibres de carbone ou de kevlar) mais restent à des prix prohibitifs. Le plastique et les fibres de carbone ont l'inconvénient d'être cassants. Le lancement de bicyclettes utilisant ces nouveaux matériaux correspond donc davantage à un désir de créer de nouvelles modes pour vendre plus qu'à une réelle recherche débouchant sur de réelles améliorations.

Plus intéressantes, peut-être, sont les tentatives effectuées récemment pour mieux utiliser encore la puissance musculaire du cycliste. Des chercheurs américains⁽⁶⁾ amateurs de records de vitesse ont construit des machines où l'on pédale avec les jambes et les bras à la fois. Ils n'ont pas réussi à faire la preuve définitive de l'efficacité de leurs inventions (fig. 7). Il ne semblerait pas judicieux en tout cas

Une profusion d'améliorations
qui ne changent en fait
que très peu la «belle» centenaire.

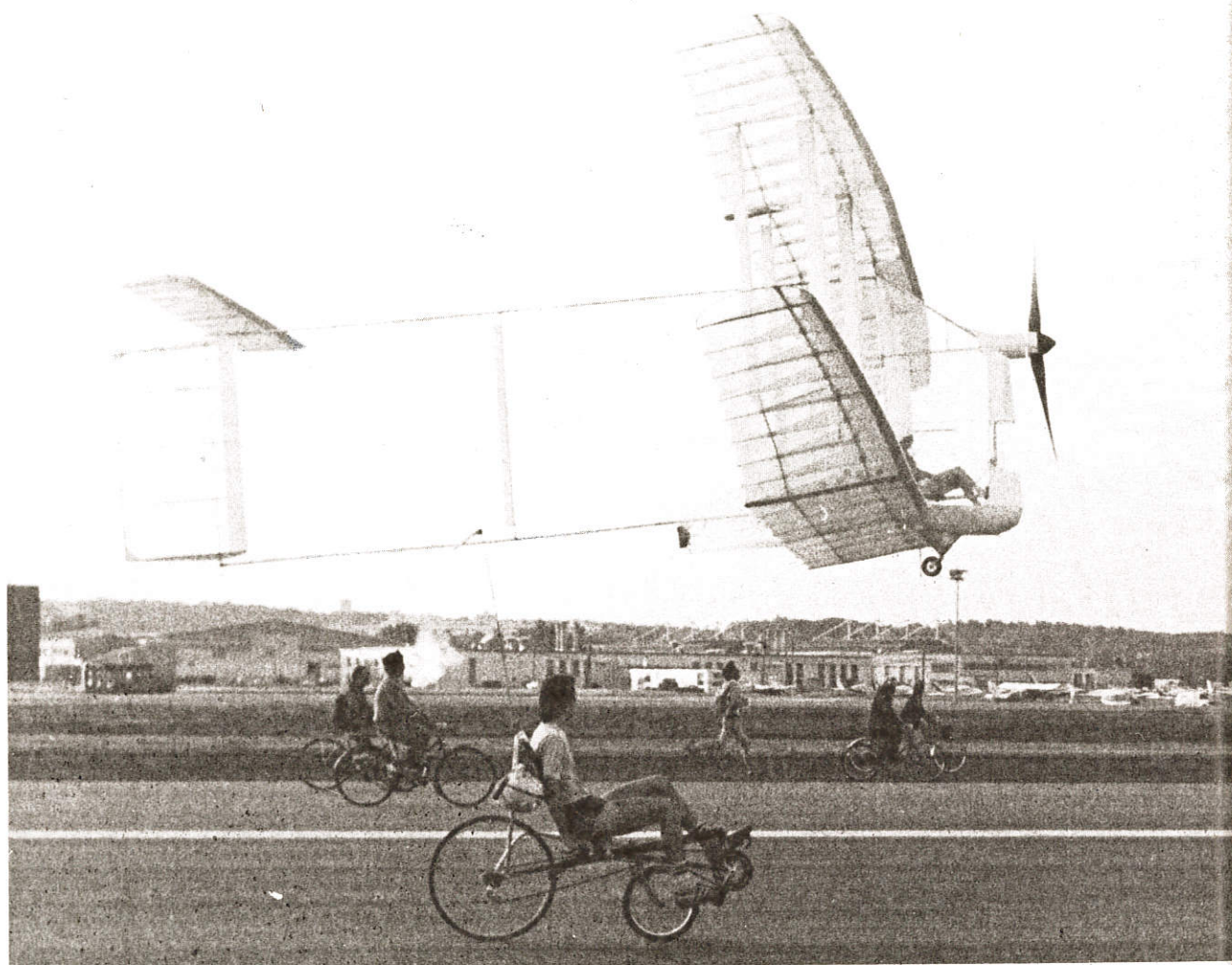


Figure 7. Bryan Allen réussit à traverser la Manche à bord du Gossamer Albatros et pilote ici le biplan Chrysalis du MIT. Au premier plan, un vélo à position allongée, FOMAC-Wilson, monté par le constructeur du Chrysalis, Harold Youngren, étudiant lui aussi au MIT. (Photo Bob Parkes, MIT).

d'imposer ce mouvement supplémentaire aux cyclistes moyens, déjà bien assez préoccupés par le maintien de leur équilibre et de leur ligne droite, pour ne pas parler du fonctionnement de leur changement de vitesse.

D'autres chercheurs ont tenté de changer la forme des pédaliers. Le couple exercé par les pieds est faible dans les positions haute et basse des pédales, et l'effort produit n'est donc pas continu. La société Sterne Cycle a lancé un nouveau type de plateau de pédalier, Cycloïd,⁽⁸⁾ Edmond Polchlopek, coureur à Pontault-Combault, en a lancé un autre, ovale, pour tenter de rendre cet effort plus continu. D'autres solutions, à base de ressorts et de bras de leviers, ont été primées au concours Lépine, mais semblent bien lourdes et compliquées. Or, ce mouvement continu est-il vraiment un but à atteindre ? Pour un bon rendement, les muscles n'ont-ils pas besoin d'un temps de relâchement périodique et de relaxation ? Le problème principal n'est-il pas plutôt pour le sportif de trouver, par un

entraînement approprié, l'utilisation optimale⁽⁸⁾ de sa force et l'adaptation de son tonus à l'effort à fournir ? Les recherches à venir devraient sans doute porter davantage sur la physiologie de l'effort musculaire. Cela pourrait permettre de mieux adapter chaque type de bicyclette à chacun de ses types d'utilisation possible.

Mais quelle est donc l'unique imperfection de notre belle centenaire, l'unique détail que la science moderne pourrait bien tenter d'améliorer ? Le freinage. On freine beaucoup moins bien à vélo qu'en voiture, même par temps sec. Bien des solutions ont été imaginées. Le frein par action directe sur le pneu est brutal. Le frein à disque est plus progressif mais lourd. Le frein à rétropédalage rend le démontage de la roue arrière trop compliqué. Reste le frein classique à étrier sur les jantes qui est progressif et simple mais incertain par temps de pluie, quelle que soit l'ingéniosité des fabricants de patins actuels (Mafac, Campagnolo, Shimano...). Il faudrait inventer un système simple permettant de doser et de répartir le freinage en fonction

de l'adhérence au sol. Des systèmes d'asservissement existent sur les automobiles, mais sont-ils adaptables aux bicyclettes ? Feront-ils mieux que les réflexes du cycliste ? Toutefois l'apprentissage de ces réflexes, au fil d'heures de jeu du cycliste avec sa force, sa vitesse et son équilibre, constitue l'essentiel du plaisir du vélo. Et s'ils devenaient inutiles, il y a fort à parier que le cyclisme perdrait le titre de maillot jaune des loisirs sportifs que Michel Delore lui attribuait récemment,⁽⁹⁾

Pour en savoir plus :

- F.R. Whitt et D.G. Wilson, *Bicycling science*, MIT Press, 2^e éd., 1980.
- La série des *L'officiel*, le cycle.

(8) Voir par exemple les considérations sur l'eutonnie que développe Gerda Alexander dans son livre *Le corps à vivre*, Tchou, 1977.
(9) M. Delore, *Le Monde*, 5 juillet 1981.