

L'aérodynamique des véhicules mus par la force musculaire

La résistance de l'air entrave fortement le mouvement d'une bicyclette et de son conducteur. De nouveaux dispositifs aérodynamiques améliorent l'efficacité des véhicules : ils roulent à 100 kilomètres à l'heure sur route plate sans aide extérieure.

par Albert Gross, Chester Kyle et Douglas Malevicki

Pour augmenter vitesse et rendement, on applique depuis longtemps les principes de l'aérodynamique aux avions, aux automobiles, aux motocyclettes et même aux skieurs de compétition. Or, jusqu'à une date récente, on ne s'est guère, de ce point de vue, intéressé aux véhicules dont le seul moteur est l'énergie humaine, ce qui est paradoxal : la résistance de l'air est, de loin, la force la plus importante qui s'oppose à leur progression. Pour une bicyclette, elle constitue 80 pour cent de la force de freinage totale dès que la vitesse du véhicule dépasse 29 kilomètres à l'heure. Nous verrons ici dans quelle mesure un meilleur carénage améliore les performances de véhicules terrestres à propulsion humaine, que nous désignerons par le terme générique de bicyclette même s'ils ont plus de deux roues.

La bicyclette n'a pratiquement pas changé de forme depuis près d'un siècle. La *Rover Safety Cycle*, qui fit son apparition en Angleterre en 1884, pourrait facilement passer pour une bicyclette moderne ; il ne lui manque qu'une selle et un cadre modernes et quelques accessoires comme les freins et les dérailleurs. Pratiquement depuis le début, fabricants et utilisateurs comprirent l'importance de l'aérodynamisme : il a toujours été évident que les forces de freinage dues au vent étaient énormes pour des bicyclettes de course roulant entre 30 et 50 kilomètres à l'heure, mais un conservatisme structurel a longtemps empêché les améliorations aérodynamiques.

Dès avant 1900, les coureurs cyclistes se couchaient sur le cadre pour réduire la résistance de l'air ; pour établir certains records le coureur était précédé d'une bicyclette de type tandem à plusieurs conducteurs afin de lui couper le vent. En 1895, le cycliste gallois Jimmy Michael parcourut ainsi 46 kilomètres en une heure derrière une bicyclette conduite par quatre per-

sonnes. En 1899, l'Américain Charles Murphy, surnommé « un mile à la minute », acquit une renommée internationale en parcourant un mile à 63,24 miles à l'heure (101,75 kilomètres à l'heure) derrière un train de Long Island Rail Road sur une route en planches construite pour l'occasion. En 1962, José Meiffret effectua le kilomètre à la moyenne horaire de 204 kilomètres à l'heure derrière une voiture.

En 1912, Étienne Bunau-Varilla déposa un brevet sur un carénage profilé, pour une bicyclette et son conducteur, dont la forme s'inspirait de celle des premiers dirigeables. Ce sont des versions de cette bicyclette et ses descendants qui établirent les records de vitesse en Europe de 1912 à 1933. En 1933, Marcel Berthet couvrit 49,97 kilomètres en une heure sur un équipement profilé du nom de *Vélocyne*, soit cinq kilomètres à l'heure de plus que les cyclistes utilisant une bicyclette classique (le record de l'heure était détenue par M. Richard avec 44,7 kilomètres à l'heure). La même année, l'inventeur français Charles Mochet construisit une bicyclette sur laquelle le conducteur pédalait couché sur le dos, appareil qu'il profila par la suite ; conduit par un coureur professionnel, François Faure, ce « Vélocar » établit plusieurs records de vitesse entre 1933 et 1938. Mochet et Faure espéraient que l'Union Cycliste Internationale, le comité international pour la réglementation des courses cyclistes, homologuerait ces records, mais ce ne fut pas le cas.

Une réglementation néfaste

En 1938, l'Union proscrit l'utilisation de dispositifs aérodynamiques et de bicyclettes à position couchée dans les courses ; la règle est encore en vigueur. Cet interdit constitue un sérieux handicap pour le développement de bi-

cyclettes rapides et c'est l'une des deux principales raisons pour lesquelles la bicyclette n'a pas changé pendant si longtemps. (L'autre raison étant que, dans les pays développés, l'automobile a pris la place de la bicyclette.)

En édictant ces règles, l'Union Cycliste Internationale assimila les améliorations de l'aérodynamique des bicyclettes et les autres modifications technologiques à des tricheries. Il est peut-être heureux que l'Union n'ait pas existé quand John Dunlop, vétérinaire écossais et irlandais, mit au point le pneumatique pour les bicyclettes en 1887, sinon nous roulerions peut-être encore sur des bicyclettes, et même dans des voitures, équipées de roues en acier. Il faut cependant accorder à l'Union qu'elle a atténué, petit à petit, ses restrictions sur les modifications aérodynamiques, bien que les équipements à position couchée soient toujours interdits. Depuis 1976, les combinaisons en une seule pièce collant au corps sont acceptées dans les courses cyclistes internationales. Les casques profilés, les tubes du cadre de section en goutte d'eau, les poignées de frein profilées et d'autres composants améliorés sur le plan aérodynamique sont aujourd'hui autorisés. En fait, les changements technologiques fleurissent aujourd'hui au même rythme qu'au temps de l'avènement de la petite reine au XIX^e siècle.

On peut attribuer cette évolution rapide à une série d'événements survenus en Californie. En 1973, C. Kyle (l'un d'entre nous) et Jack Lambie, ingénieur conseil en aérodynamique, construisirent, testèrent les deux premières bicyclettes profilées et surtout mesurèrent la diminution de résistance résultant du profilage. Pour cela, ils effectuèrent de nombreux tests en roue libre (au cours desquels on laisse sans pédaler une bicyclette ralentir sur une surface plane). La décélération du véhicule est alors proportionnelle à la force

totale s'opposant à son mouvement ; des instruments mesuraient soit la vitesse, soit la décélération (qui en est la dérivée par rapport au temps). C. Kyle et J. Lambie publièrent leurs résultats séparément et conclurent tous les deux qu'il serait possible de réduire de 60 pour cent les forces de résistance sur une bicyclette avec un carénage vertical en forme d'aile, entourant la bicyclette et son conducteur. À leur grande honte, C. Kyle et J. Lambie apprirent deux ans plus tard que des véhicules de ce type avaient été construits en Europe il y a longtemps.

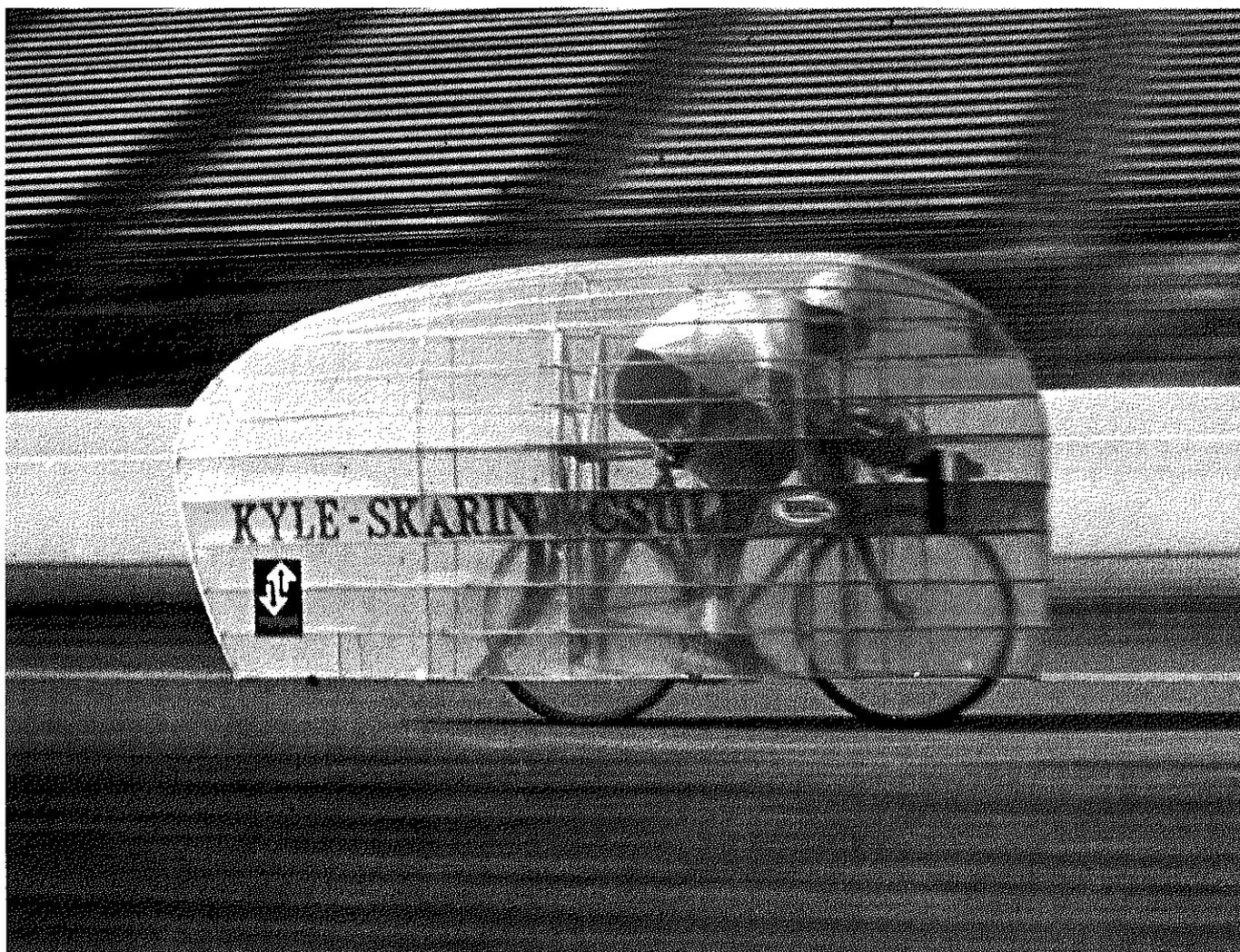
En 1974, Ronald Skarin établit cinq records du monde de vitesse sur la bicyclette carénée de C. Kyle. Forts de ce succès, C. Kyle et J. Lambie décidèrent d'organiser une course ouverte à tous les véhicules non motorisés sans aucune autre restriction. Le 5 avril 1979, à Irwindale, en Californie, 14 véhicules différents entrèrent en lice pour cette première course historique. La plupart des concurrents pédalaient couchés, soit sur le dos, soit sur le ventre.

Certains engins étaient mus à la fois par les mains et par les pieds. Le tandem profilé, réalisé par Philip Norton, professeur dans un lycée à Edgewood en Californie, l'emporta en atteignant la vitesse de 72,2 kilomètres à l'heure. Le tandem était conduit par P. Norton et Christopher Deaton, coureur cycliste de bon niveau, mais pas de renommée mondiale. (Le coureur cycliste soviétique de classe mondiale, Sergei Kopylov, établit en 1982 le record du monde de vitesse instantanée sur une bicyclette de course classique : 69,9 kilomètres à l'heure.)

Les participants à cette course enfrenaient les règlements de l'Union Cycliste Internationale sur les carénages ; aussi créèrent-ils une nouvelle association en 1976, l'Association Internationale des Véhicules à Propulsion Humaine. Elle avait pour but d'enregistrer les compétitions ouvertes à tous les véhicules à propulsion humaine, sans restriction. Depuis cette date historique, des dizaines de courses ont été organisées dans de nombreux pays ; les ma-

chines sont devenues beaucoup plus sophistiquées et les vitesses augmentent régulièrement. Quatre véhicules ont dépassé la limitation de vitesse américaine pour les automobiles, qui est de 90 kilomètres à l'heure et parmi ceux-ci un quadricycle profilé de la troisième génération conçu par P. Norton. Les agents de la circulation ont remis à leur conducteur une contravention honorifique pour excès de vitesse !

À l'heure actuelle, le véhicule à propulsion humaine le plus rapide est le *Tandem Vector* conçu par A. Voigt, machine profilée où les cyclistes sont couchés. Les conducteurs du tandem pédalent, étendus sur le dos et regardant dans des directions opposées. En 1980, après un élan de 1600 mètres, le tandem couvrit 200 mètres sur l'autoroute d'Ontario en Californie à 101, 24 kilomètres à l'heure. Un peu plus tard, cette même année, il couvrit 64 kilomètres sur la Route Nationale 5 entre Stockton et Sacramento, à une vitesse moyenne de 81,3 kilomètres à l'heure, soit 60 pour cent plus vite qu'un cycliste professionnel !



1. UNE BICYCLETTE DE COURSE PROFILÉE, conçue par l'un des auteurs (Chester Kyle) et montée par Ronald Skarin, un coureur cycliste américain, est présentée ici lors de l'établissement du record du monde de l'heure (51,33 kilomètres). Le carénage profilé, qui

réduit la résistance à l'avancement due au cycliste et à sa machine, a permis cette performance. R. Skarin établit ce nouveau record de vitesse en 1979. À part le carénage, le véhicule était une bicyclette de course classique.

Les résistances à l'avancement

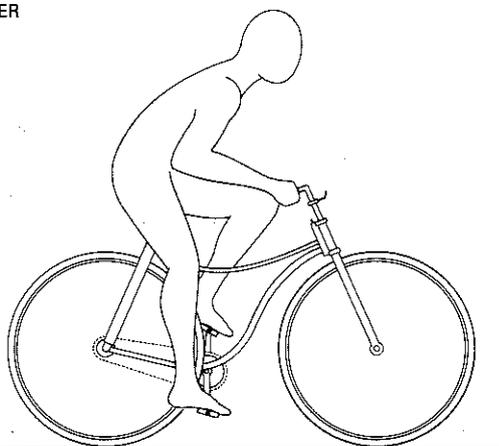
C'est le soin apporté à l'aérodynamique qui permet ces vitesses extraordinaires. Un cycliste roulant à 30 kilomètres à l'heure déplace à peu près 450 kilogrammes d'air par minute : un

cycliste et sa machine, non profilée, engendrent un sillage important qui consomme beaucoup d'énergie.

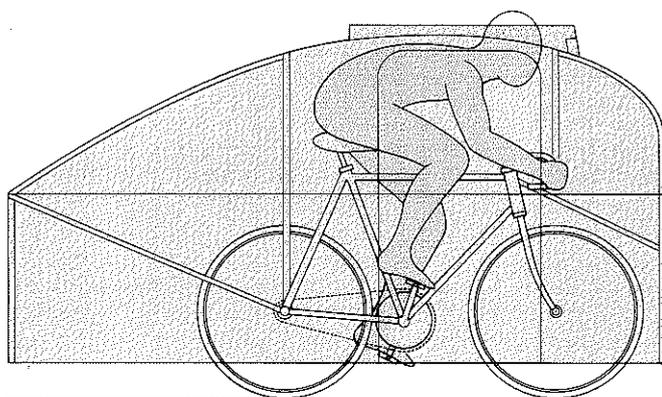
Deux résistances de nature aérodynamique entravent l'avance d'une bicyclette : la résistance due à la pression (reliée à la forme du véhicule) et

la résistance liée au frottement sur la surface du véhicule. La résistance de pression apparaît dès que l'écoulement d'air ne suit plus exactement les contours du corps en mouvement. Le décollement de l'écoulement d'air modifie la répartition de la pression de l'air

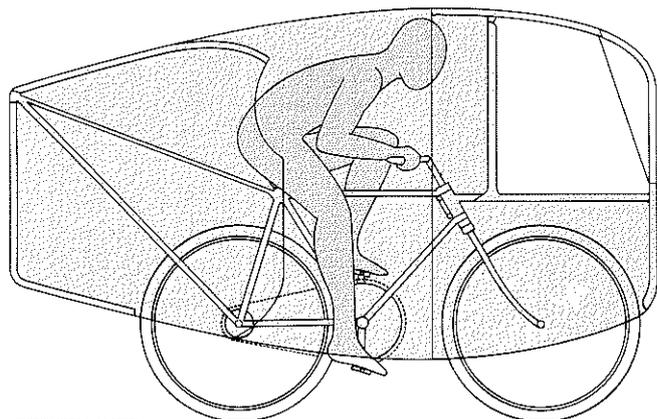
BICYCLETTE ROVER



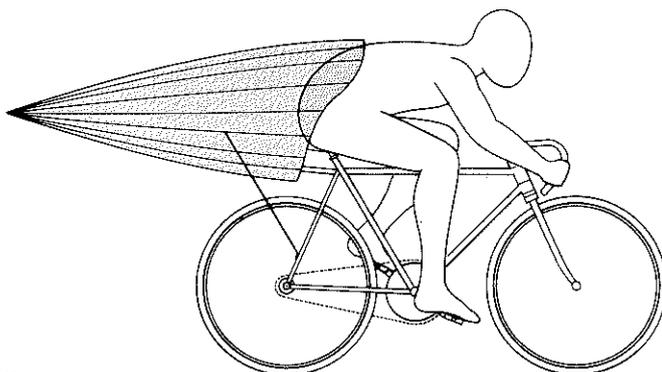
VÉLODYNE



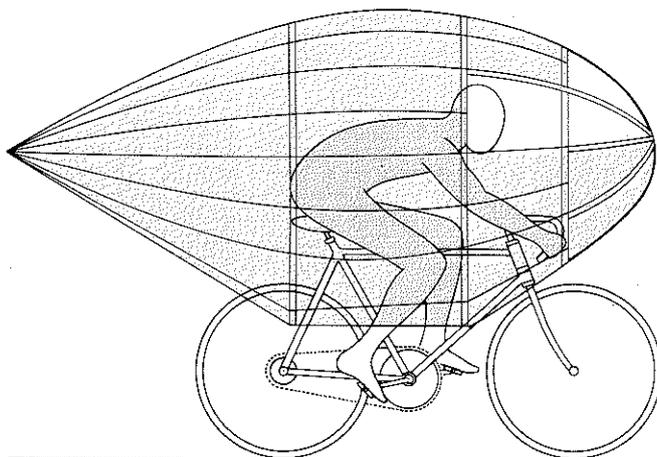
PROTOTYPE DE VARILLA



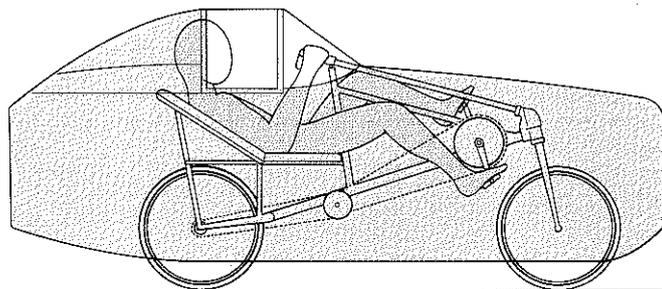
ROCKET



GORICKE



VÉLOCAR



2. LES PREMIÈRES AMÉLIORATIONS apportées aux véhicules terrestres à propulsion humaine apparurent lors de l'introduction de la *Rover Safety Cycle* en Angleterre, en 1884. En 1912 et 1913, le Français Étienne Bunau-Varilla déposa des brevets protégeant un type de carénage ; les bicyclettes munies de ces dispositifs permirent d'établir un grand nombre de records de vitesse. C'est en Allemagne que le

Goricke fut mis au point en 1914. Marcel Berthet établit, en 1933, un nouveau record : il parcourut 60 kilomètres en une heure. La *Rocket*, conçue par Oscar Egg, date de la même année. Un autre véhicule français, le *Vélocar*, établit plusieurs records de vitesse entre 1933 et 1938. La plupart des dessins ont été effectués à partir de données provenant des Archives Wolfgang Gronen à Binningen en Suisse.

sur le corps : en général, la pression de l'air y est plus faible à l'arrière qu'à l'avant, ce qui engendre la force de freinage.

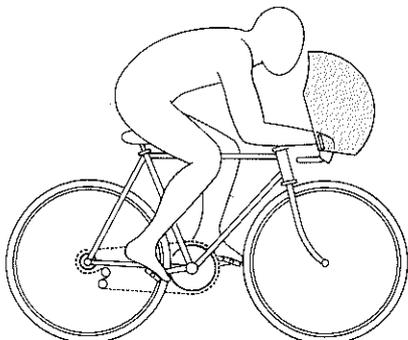
La résistance due aux frottements sur la peau résulte de la viscosité de l'air. Elle est liée aux forces de cisaillement qui ap-

paraissent dans la couche limite, la couche d'air au contact de la surface du corps.

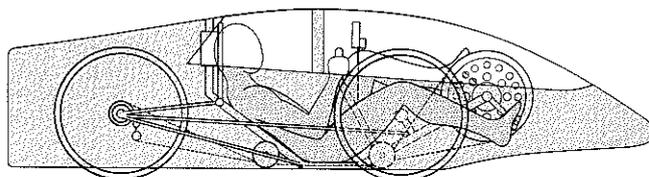
Les structures des éléments d'une bicyclette, des cylindres, des sphères, etc., sont peu efficaces d'un point de vue aérodynamique à cause du phénomène de décollement de la couche d'air : des

régions de basses pressions apparaissent derrière les corps et le freinage résultant est plusieurs centaines de fois supérieur aux forces de friction. En revanche, l'air s'écoule sans décollement autour d'une forme profilée : l'air se referme derrière le corps qui passe, la résistance de

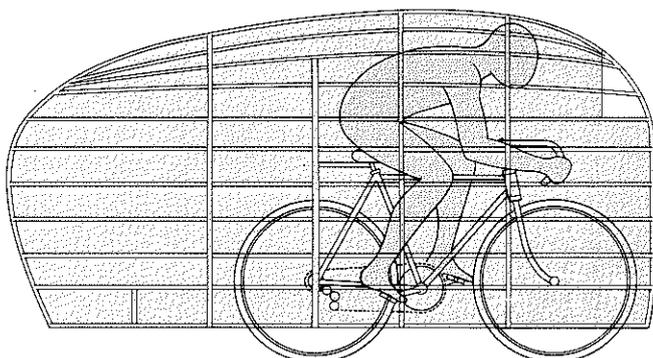
ZZIPPER



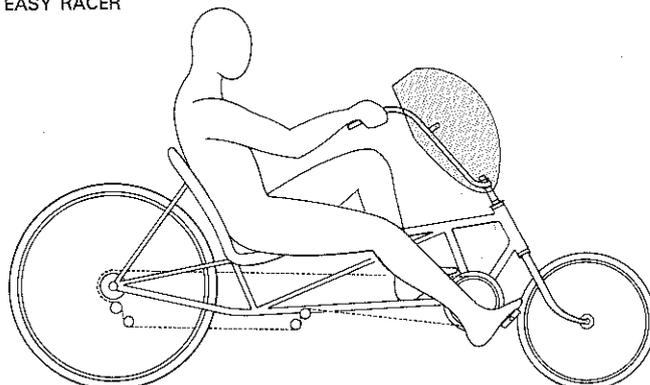
VECTOR SINGLE



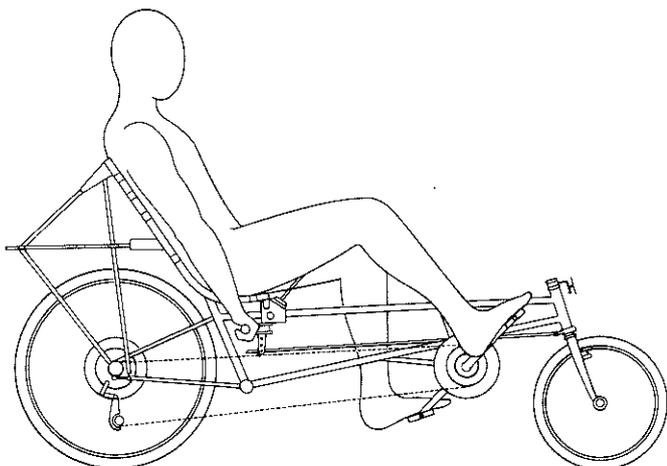
PROTOTYPE DE KYLE



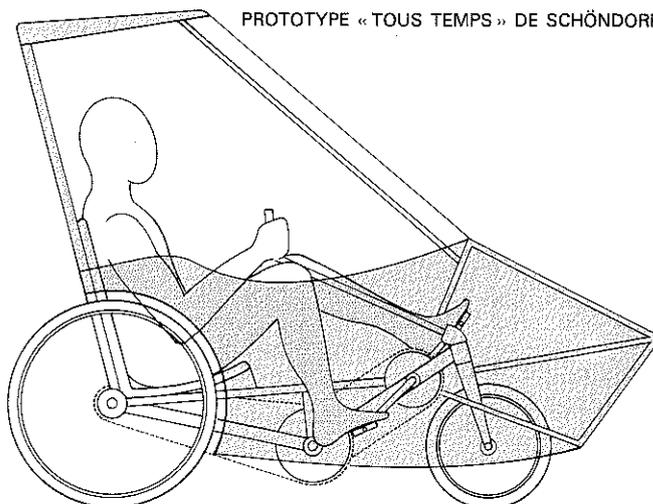
EASY RACER



AVATAR 2000

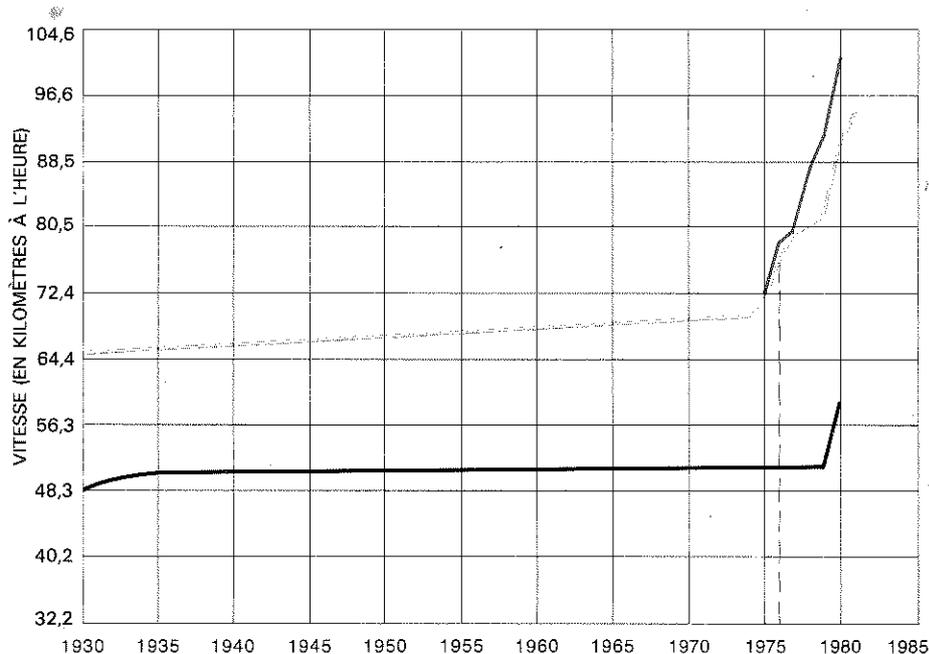


PROTOTYPE « TOUS TEMPS » DE SCHÖNDORF

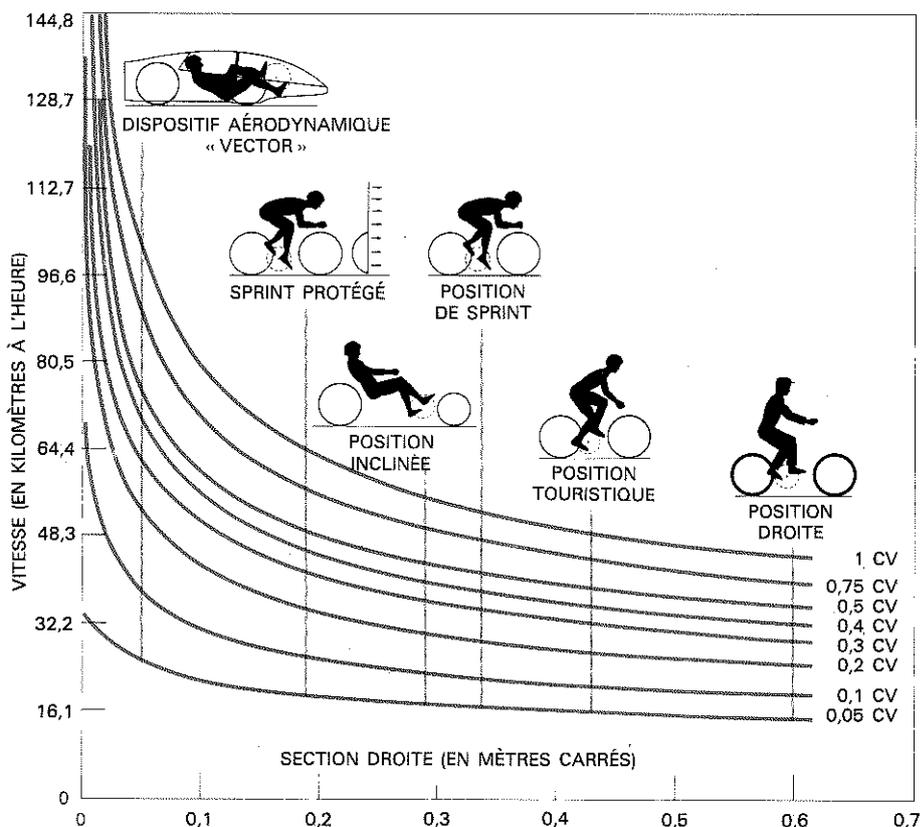


3. LES VÉHICULES MODERNES À PROPULSION HUMAINE sont carénés afin de réduire la résistance de l'air. L'appareil le plus simple est le *Zipper*, constitué d'un carénage partiel placé à l'avant du cycliste. Le *Streamliner* de C. Kyle date de 1973. L'*Avatar 2000* a été conçu plutôt pour les touristes que pour la course ; il tire profit des avantages liés à la position couchée du

cycliste. Le *Vector Single*, muni d'un carénage complet, peut théoriquement rouler à près de 100 kilomètres à l'heure pour une puissance d'un cheval vapeur délivrée par le cycliste. *Easy Racer* est un véhicule à position couchée, conçu principalement pour le cyclotourisme, mais il fut également utilisé en compétition. Le dernier véhicule est un exemple de véhicule à position couchée.



4. LES RECORDS DE VITESSE sur véhicules à propulsion humaine progressent rapidement depuis la création, en 1976, de l'Association Internationale des Véhicules à Propulsion Humaine, qui ne fixe aucune restriction à la structure des « bicyclettes ». La date de la création est indiquée par la ligne discontinue. Pendant toutes les années qui ont précédé cette date, les records de vitesse n'avaient pratiquement pas changé à cause des règles de l'Union Cycliste Internationale qui interdisent aux véhicules profilés de participer aux compétitions cyclistes homologuées. Les courbes représentent l'évolution des records de vitesse pure sur 200 mètres, départ lancé en tandem (*en couleur*), des records de vitesse pure pour cycliste unique dans les mêmes conditions (*en gris*), enfin, l'évolution du record de l'heure (*en noir*).



5. LE CARÉNAGE améliore les performances des véhicules à propulsion humaine, quelle que soit la puissance fournie. Le vélo de tourisme, en haut à droite, est le véhicule le moins bien profilé ; la machine *Vector* est la mieux profilée. Un bon athlète peut développer un cheval vapeur pendant 30 secondes, une personne en bonne santé pendant 12 secondes. Ils peuvent développer respectivement 0,4 et 0,1 cheval vapeur pendant environ huit heures. La section frontale efficace est égale au produit du coefficient de traînée par la surface « au maître couple » (c'est-à-dire la surface qui s'oppose au mouvement).

pression diminue considérablement et c'est la résistance de friction qui devient prépondérante.

Actuellement, les résistances aérodynamiques absorbent de 40 à 50 pour cent de l'énergie consommée sous forme d'essence par une automobile ou un camion roulant à 90 kilomètres à l'heure. Une bicyclette est moins puissante, pèse moins lourd, la résistance de frottement sur la chaussée y est moins importante mais elle est mal profilée : par conséquent, la résistance de l'air intervient pour un pourcentage encore plus élevé dans la consommation d'énergie dès que la vitesse dépasse 15 kilomètres à l'heure.

Le coefficient de traînée mesure l'efficacité aérodynamique d'une forme : le coefficient de traînée d'une sphère est égal à 1,3 et la sphère est peu efficace alors que celui qu'une goutte d'eau, plus adaptée, est inférieur à 0,1 ; l'énergie dissipée par un objet ayant une forme de goutte d'eau sera dix fois plus faible que celle dissipée par un objet sphérique ou cylindrique.

Pour les véhicules de transport terrestre, la résistance aérodynamique est à peu près proportionnelle au produit de l'aire de la surface perpendiculaire au mouvement par le coefficient de traînée. Pour des raisons de commodité, nous désignerons ce produit sous le nom de section frontale efficace. Si l'on désire comparer les résistances aérodynamiques de deux véhicules, il faut donc non seulement tenir compte de leurs coefficients de traînée, mais aussi de leur taille, d'où l'intérêt de ce paramètre qu'est la section frontale efficace. Une bicyclette ordinaire et son conducteur ont une section frontale efficace de 1,3 à 2,2 mètres carrés alors que celle d'un véhicule profilé peut descendre au-dessous de 0,18 mètre carré.

La résistance aérodynamique varie comme le carré de la vitesse ; comme la puissance est proportionnelle au produit de la force de résistance par la vitesse, la puissance nécessaire à la progression d'un objet dans l'air augmente comme le cube de la vitesse : une faible augmentation de la vitesse entraîne une augmentation énorme de puissance. Un cycliste roulant à 30 kilomètres à l'heure n'augmente sa vitesse que de neuf kilomètres à l'heure quand il développe une puissance double.

Réciproquement, une diminution de la force de frottement aérodynamique affecte moins la vitesse que ce que l'on pourrait croire. Si la résistance de l'air diminue de moitié à 30 kilomètres à l'heure, la vitesse d'un cycliste développant la même puissance n'augmentera que de 6,6 kilomètres à l'heure. Bien sûr les résistances de roulement (dues aux frottements sur la piste) restent inchangées, mais même si l'on éliminait ces frottements, on arriverait à la même vitesse, 39 kilomètres à l'heure, en doublant la puissance ou en diminuant

de moitié la résistance de l'air. En résumé, pour atteindre de grandes vitesses, il faut travailler beaucoup l'aérodynamisme. Chaque cycliste du Tandem *Vector* développe une puissance d'un peu plus d'un cheval vapeur et l'appareil atteint la vitesse de 101,24 kilomètres à l'heure. Avec une bicyclette normale, il faudrait fournir plus de dix chevaux vapeur pour atteindre la même vitesse. Il est bien évidemment impossible qu'un homme délivre une telle puissance.

On réduit la résistance de l'air de trois façons. La première consiste à diminuer l'énergie gaspillée par l'interaction du véhicule avec l'air : pour cela on profile (c'est-à-dire on remodèle l'avant et l'arrière des objets afin de minimiser la résistance de pression) et on lisse les surfaces rugueuses afin de réduire la quantité d'air rencontrée par seconde de déplacement en diminuant la surface frontale efficace de l'ensemble véhicule-conducteur. On obtient un effet identique en roulant à des altitudes élevées où la pression atmosphérique est plus faible. La troisième voie consiste à rouler dans le sillage d'un autre véhicule.

Aux altitudes élevées, l'air est moins dense et les cyclistes repoussent donc moins d'air. À Mexico (2250 mètres d'altitude, la densité de l'air est inférieure de 20 pour cent à celle au niveau de la mer), les records de vitesse cyclistes sont supérieurs de trois à cinq pour cent à ceux réalisés à des altitudes plus basses. À la Paz, en Bolivie (3600 mètres d'altitude) il serait théori-

quement possible d'améliorer de 14 pour cent les records établis au niveau de la mer. Sur la Lune, où il n'y a pas d'atmosphère et où la force gravitationnelle est six fois plus faible que sur Terre, un cycliste convenablement équipé pourrait théoriquement rouler à 380 kilomètres à l'heure en fournissant seulement 0,1 cheval vapeur.

Quatre vingt pour cent de la puissance fournie par un cycliste roulant à 30 kilomètres à l'heure sur une surface plane sert à vaincre la résistance de l'air : 70 pour cent de la consommation sert à vaincre la résistance due au cycliste et 30 pour cent la résistance de l'air sur la bicyclette ; pour améliorer les performances d'une bicyclette normale, il faut tout d'abord améliorer l'aérodynamisme du cycliste.

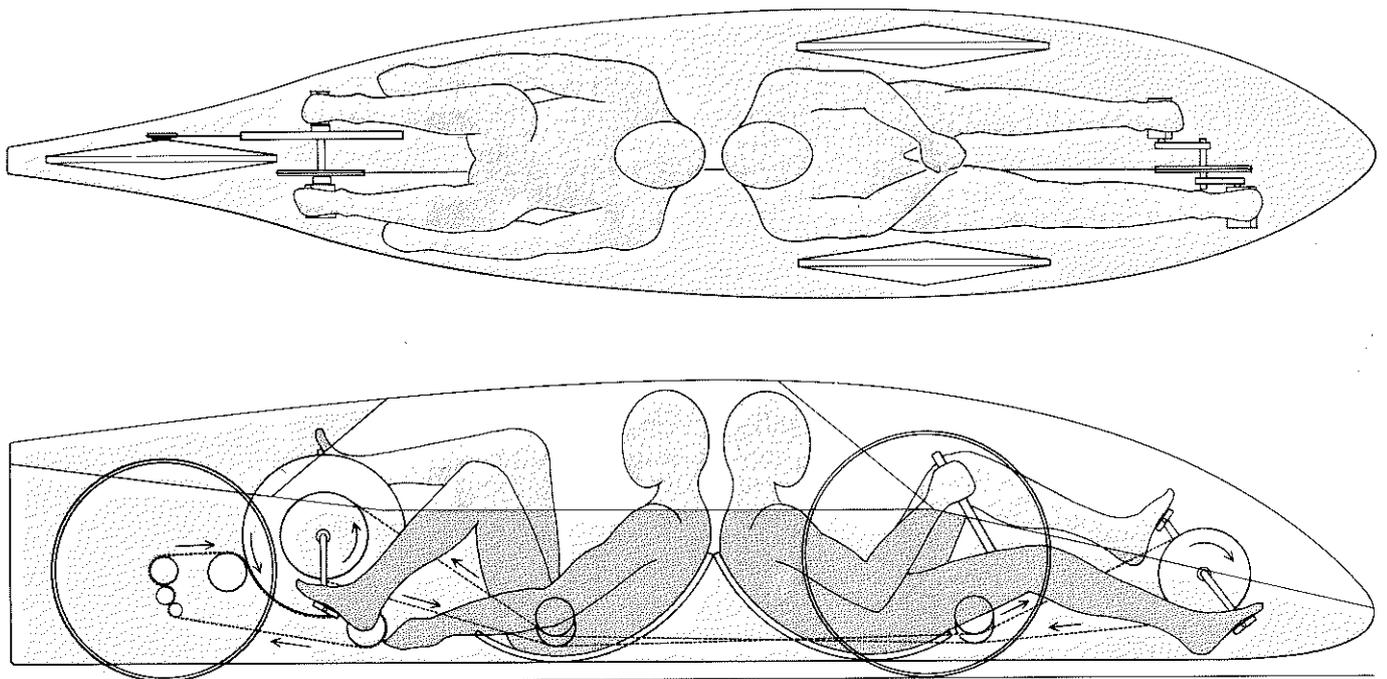
Pour les cyclistes de compétition, étant donné les restrictions de l'Union Cycliste Internationale, il ne reste que peu d'améliorations possibles quand on a adopté la position penchée, le casque profilé, le survêtement moulant et les composants profilés pour la bicyclette. A. Voigt a calculé que, même avec une bicyclette parfaite (pas de résistance aérodynamique sur la bicyclette à quelque vitesse que ce soit et pas de résistance de roulement sur les pneus), la seule résistance de l'air sur le cycliste entraverait sérieusement l'amélioration des performances. D'après A. Voigt, un coureur développant une puissance d'un cheval vapeur sur une bicyclette de course conventionnelle ne pourra pas dépasser la vitesse de 54,4 kilomètres à l'heure. Sur une bicyclette parfaite, le

même coureur réalisant le même effort pourrait atteindre 60,8 kilomètres à l'heure.

Quant aux millions de cyclistes du dimanche qui cherchent seulement à moins se fatiguer en vélo, ils ont à leur disposition plusieurs améliorations possibles. Si on les range par ordre de coût, en commençant par le moins cher, on trouve tout d'abord un carénage partiel, comme le *Zzipper*. Il s'agit d'un petit écran profilé transparent, placé à l'avant du cycliste. Pour environ 500 francs, le cycliste peut abaisser la résistance de l'air d'environ 20 pour cent, ce qui correspond à une augmentation de vitesse de quatre kilomètres à l'heure pour une puissance développée de un cheval vapeur.

La solution couchée

Un autre moyen efficace pour réduire la résistance de l'air consiste à rouler sur une bicyclette à position couchée. (Cette machine coûterait plusieurs milliers de francs de plus qu'une bicyclette de randonnée classique.) Gardner Martin de Freedom en Californie, qui a fabriqué l'*Easy Rider*, et David Gordon de l'Institut de Technologie du Massachusetts, qui construisit l'*Avatar 2000*, sont les pionniers dans ce domaine. Le cycliste en position couchée présente une section frontale efficace plus faible, ce qui abaisse la résistance de l'air de 15 à 20 pour cent : l'augmentation de vitesse est à peu près la même que celle due au carénage *Zzipper*.



6. **TANDEM VECTOR** est un véhicule de la famille du *Vector Single* dessiné sur la couverture de ce numéro de *Pour la Science*. Pour une puissance d'un peu plus d'un cheval vapeur pour chacun des deux conducteurs, placés dos à dos, le *Tandem* établit le record de vitesse,

départ lancé, à 101,3 kilomètres à l'heure sur 200 mètres, en 1980. La même année, *Tandem Vector* réalisait, sur route, une vitesse moyenne de 81,3 kilomètres à l'heure sur un parcours de 65 kilomètres.

	DESCRIPTION	FORCES (EN KG) A 32 KM/H	PARAMÈTRES AÉRODYNAMIQUES			COEFFICIENT DE RÉSISTANCE AU ROULEMENT	TERRAIN		
			COEFFICIENT DE TRAÎNÉE	SECTION DROITE (EN MÈTRES CARRÉS)	SECTION DROITE EFFICACE		PUISSANCE MESURÉE		
BICYCLETTES STANDARDS	BICYCLETTE TOUS TERRAINS	15 KG CYCLISTE 55 KG PNEUS BALLONS 50 CM DIA. 2,8 KG/CM ²		2,5 0,85	1,1	0,45	0,50	0,014	146
	VÉLO DE VILLE	20 KG CYCLISTE 75 KG PNEUS NORMAUX 70 CM DIA. 2,8 KG/CM ²		2,78 0,54	1,1	0,51	0,56	0,006	140
	VÉLO TOURISTE BRAS TENDU	12 KG CYCLISTE 75 KG PNEUS FINS 70 CM DIA. 6,2 KG/CM ²		2 0,37	1	0,40	0,40	0,0045	100
	VÉLO COURSE POSITION COURSE	10 KG CYCLISTE 75 KG BOYAUX 70 CM DIA. 7,3 KG/CM ²		1,57 0,24	0,88	0,36	0,31	0,003	77
MODÈLES AMÉLIORÉS	VÉLO AÉRO- DYNAMIQUE POSITION COURSE	10 KG CYCLISTE 75 KG BOYAUX 70 CM DIA. 7,3 KG/CM ²		1,48 0,24	0,83	0,36	0,30	0,003	73
	VÉLO À COUPE-VENT	10,5 KG CYCLISTE 75 KG BOYAUX 70 CM DIA. 7,3 KG/CM ²		1,34 0,24	0,70	0,38	0,27	0,003	67
	VÉLO À POSITION ARRIÈRE « EASY RACER »	10,5 KG CYCLISTE 75 KG 50 CM AVANT 70 CM ARR. 6,2 KG/CM ²		1,34 0,42	0,77	0,35	0,27	0,005	75
	TANDEM	20 KG 2 CYCLISTES DE 75 KG PNEUS FINS 70 CM DIA. 6,2 KG/CM ²		2,41 1,20 0,73 0,36	1	0,48	0,48	0,0045	66
	VENT COUPÉ PAR UN AUTRE CYCLISTE	10 KG CYCLISTE DE 75 KG BOYAUX 70 CM DIA. 7,3 KG/CM ²		0,87 0,24	0,50	0,36	0,17	0,003	47
DÉTENTEURS DE RECORDS	BLUE BELL	20 KG 75 KG BOYAUX 50 CM AVANT 70 CM ARR.		0,27 0,36	0,12	0,46	0,06	0,004	27
	KYLE (TANDEM)	25 KG 2 CYCLISTES DE 75 KG BOYAUX 7,3 KG/CM ²		0,65 0,32 0,50 0,25	0,2	0,65	0,13	0,003	24
	VECTOR SINGLE (TRICYCLE)	32 KG CYCLISTE DE 75 KG 60 CM AVANT 70 CM ARR.		0,23 0,46	0,11	0,42	0,05	0,0045	29
	VECTOR TANDEM (TRICYCLE)	35 KG 2 CYCLISTES DE 75 KG BOYAUX 6,2 KG/CM ²		0,28 0,14 0,80 0,40	0,13	0,43	0,05	0,0045	23
LIMITES THÉORIQUES	BICYCLETTE IDÉALE	NI RÉSISTANCE DE ROULEMENT NI RÉSISTANCE DE L'AIR		1,39 0	0,8	0,35	0,06	0	59
	SANS RÉSISTANCE DE L'AIR	RÉSISTANCE DE ROULEMENT		0,60 0,36	1,1	0,11	0,28	0,0045	41
	POSITION COUCHÉE SUR LE DOS	RÉSISTANCE DE L'AIR SUR CYCLISTE		0,33 0	0,6	0,11	0,12	0	14
	POSITION À PLAT-VENTRE	RÉSISTANCE DE L'AIR SUR CYCLISTE		0,23 0	0,6	0,07	0,06	0	10
	POSITION À PLAT-VENTRE ET PROFILÉE			0 0,54	0,05	0,13	0,05	0	1
	COURSE DERRIÈRE VÉHICULE MOTORISÉ	20 KG CYCLISTE 75 KG PNEUS BALLONS ÉPAIS 5 KG/CM ²		0 0,06			DÉPEND DE LA VITESSE	0,006	23
	BICYCLETTE LUNAIRE	11 KG CYCLISTE 75 KG SCAPHANDRE DE 7 KG					0	0,0045	3

PLAT - SANS VENT			EFFET DES PENTES	
	CYCLO-TOURISME	VITESSE MAXIMALE	VITESSE DE MONTÉE	VITESSE DE DESCENTE
	16,2	44,7	19,6	31,8
	18,1	44,4	17,5	38,6
	21	50	19,6	44,6
	23,6	54,5	20,9	50
	24,1	55,6	20,9	52
	24,7	57,4	21	54,5
	23,1	56,6	20,1	54
	24,4	58,9	20,9	56,6
	28,1	66	21,8	67
	36,2	94,3	20	124
	37,4	91	22,5	112
	35	98,4	18,2	145
	41,2	116,6	20,9	174
	26,8	57,7	21,5	55,8
	29,6	73,7	21,4	81
	43,6	93,8	27	107
	48,9	105	37,3	105
	93,8	202	41	280
	47,3	473	20	?
	382	3822	126	?

La bicyclette à position couchée offre cependant d'autres avantages. Elle est plus confortable qu'une bicyclette normale. Dans les accidents n'impliquant pas une automobile, elle est plus sûre car le cycliste est plus près du sol (ce qui rend les chutes moins graves) et les pieds sont à l'avant (ce qui rend les blessures de la tête moins probables lors d'une chute). Un problème est que la bicyclette à position couchée est plus difficile à voir sur une route et est donc peut-être plus vulnérable ; on peut améliorer cet état de choses en installant sur le véhicule un drapeau monté sur un long mât. La bicyclette à position couchée et à carénage total est la plus chère : c'est par exemple la *Vector Single* qui est représentée sur la couverture de ce numéro de *Pour la Science*. D'après A. Voigt, ce véhicule peut théoriquement rouler à 99,4 kilomètres à l'heure pour une puissance d'un cheval vapeur, ce qui représente une augmentation de 45,4 kilomètres à l'heure par rapport à une bicyclette de course normale. Une *Vector Single* coûte à peu près le même prix qu'une bicyclette de compétition.

Un véhicule totalement profilé conserve ses avantages sur une bicyclette normale lors des montées ou des descentes. La *Vector Single* pèse 36 kilogrammes alors qu'une bicyclette normale pèse autour de 11 kilogrammes ; malgré cela, elle peut grimper des pentes douces aussi vite, si ce n'est plus vite, qu'une bicyclette. Si on lui fournit une puissance de 0,4 cheval, une bicyclette peut grimper une côte à 2,5 pour cent à environ 25 kilomètres à l'heure et une côté à 6 pour cent à 17 kilomètres à l'heure. Pour une même puissance, la *Vector* grimpe à 33 kilomètres à l'heure et 17 kilomètres à l'heure.

Dans les descentes, la différence entre les deux machines est remarquable. La bicyclette peut rouler à 47,5 kilomètres à l'heure dans une descente à 2,5 pour cent, la *Vector* à 87 kilomètres à l'heure. Dans une descente à 6 pour cent, la bicyclette peut atteindre 62,8 kilomètres à l'heure et la *Vector* dépasser 160 kilomètres à l'heure. Si les véhicules profilés à propulsion humaine deviennent courants, ces vitesses potentielles imposent que l'on prête une grande attention à la conception des freins, de la suspension et de la stabilité du véhicule.

La résistance aérodynamique étant proportionnelle au carré de la vitesse relative, les vents de face, de derrière

et même de côté peuvent modifier considérablement la résistance de l'air et les besoins en puissance. Par exemple, la puissance développée par un cycliste roulant à 29 kilomètres à l'heure dans un air calme doit augmenter de 100 pour cent si le cycliste désire conserver la même vitesse avec un vent de face de 16 kilomètres à l'heure. Généralement, un cycliste roulant contre le vent ralentit et essaie de transmettre la même puissance en changeant de vitesses : c'est pourquoi il est préférable d'avoir une bicyclette munie de vitesses même en terrain plat.

Pour une même puissance développée, un vent arrière qui pousse le cycliste augmente sa vitesse. D'une manière générale, l'air en déplacement augmente ou diminue la vitesse d'une bicyclette d'une quantité égale à la moitié de la vitesse du vent. Quand un cycliste roule dans le sillage d'un autre, il économise environ 30 pour cent de son énergie : le cycliste de tête crée un vent arrière artificiel. Plus la bicyclette suiveuse est proche, et plus cet effet est important. Un cycliste arrière d'un tandem est extrêmement près et l'effet de « succion » représente une économie de 20 pour cent par conducteur par rapport à deux cyclistes séparés.

Quand des cyclistes roulent en ligne et mènent à tour de rôle, le groupe dans son ensemble peut aller beaucoup plus vite qu'un cycliste isolé : dans une course poursuite de 4000 mètres, une équipe de quatre coureurs roule 6,5 kilomètres à l'heure plus vite qu'un coureur isolé de même force. Typiquement, un groupe de cyclotouristes de même force roule de deux à cinq kilomètres à l'heure plus vite qu'un isolé. Plus le groupe est important (jusqu'à environ une douzaine d'éléments), plus il peut rouler vite.

Les vents artificiels créés par le trafic automobile peuvent augmenter la vitesse d'un cycliste de 1,5 à 5 kilomètres à l'heure pendant des périodes de sept secondes. Plus le véhicule qui passe est grand, plus l'effet est important. Un flot continu de véhicules permet à un cycliste de rouler à une vitesse constante supérieure de cinq à dix kilomètres à l'heure à celle qu'il pourrait atteindre pour une puissance donnée.

Quand un cycliste roule directement dans le sillage d'un véhicule à moteur, il peut atteindre des vitesses tout à fait remarquables : on appelle cette pratique la course derrière deryn (comme dans la deuxième partie de Bordeaux-Paris).

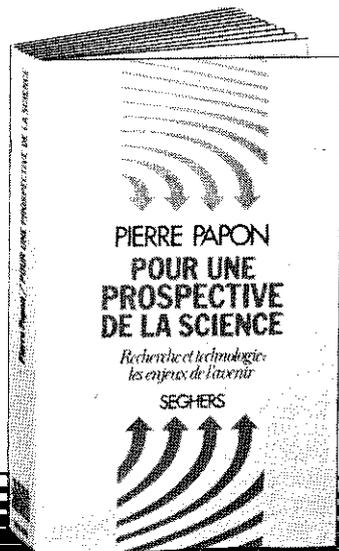
7. RÉSUMÉ DES PERFORMANCES des véhicules à propulsion humaine : les nombres inscrits dans la première colonne de chiffres (sous les forces), pour chaque véhicule, représentent la résistance de l'air et la résistance de roulement. Les cinq colonnes à droite indiquent, de gauche à droite : la puissance nécessaire à 32 kilomètres à l'heure en pourcentage de la capacité d'un cyclotouriste, la vitesse d'un cyclotouriste en kilomètres à l'heure pour une puissance de 0,1 cheval vapeur, la vitesse maximale pour une puissance d'un cheval vapeur, la vitesse moyenne en kilomètres à l'heure sur une pente à cinq pour cent pour une puissance de 0,4 cheval vapeur et la vitesse dans une descente de même pourcentage.

Notre avenir dépend du développement de la recherche et de la technologie. Pour éclairer ce domaine d'une importance majeure, voici les conjectures et les réflexions du directeur général du C.N.R.S.

PIERRE PAPON

Pour une prospective de la science

Recherche et technologie : les enjeux de l'avenir



Déjà parus :
JACQUES LESOURNE
Les mille sentiers de l'avenir

JEAN-PAUL PIGASSE
Le bouclier de l'Europe

MICHEL SALOMON
L'avenir de la vie

Collection
"Les visages de l'avenir"

Seghers

Sur les traces de José Meiffret, Allan Abbott, un médecin californien, établit un record de 223,126 kilomètres à l'heure sur un mile en suivant un véhicule à moteur à Bonneville Salt Flats dans l'Utah. John Howard, cycliste olympique américain, tente de battre le record de A. Abbott et de dépasser les 150 miles à l'heure (241,5 kilomètres à l'heure).

Ces nouvelles bicyclettes sont-elles pratiques ?

Bien que les découvertes que nous avons décrites soient importantes pour elles-mêmes, on peut se demander si elles auront une application pratique autre que l'établissement des records de vitesse. Pour un grand nombre de cyclistes, il semble peu probable que ce travail puisse avoir une utilité immédiate. Dans les pays en voie de développement, par exemple, la bicyclette constitue le principal moyen de transport, mais les cyclistes roulent à dix kilomètres à l'heure et souvent avec des charges importantes ; or la résistance de l'air à bicyclette ne devient prédominante qu'à des vitesses supérieures à 15 kilomètres à l'heure. Même dans ce cas, les travaux sur l'aérodynamisme apportent leur contribution, ne serait-ce que pour prouver jusqu'à quelle vitesse la résistance de l'air ne joue aucun rôle.

Si l'on veut améliorer la sûreté des bicyclettes lentes, il faut diminuer la résistance de roulement en améliorant les pneus et en revêtant les routes, et diminuer le poids des bicyclettes afin de faciliter la montée des côtes. La bicyclette classique restera probablement prédominante pendant encore de nombreuses années du fait de l'habitude, de son bas prix, de sa simplicité et de sa fiabilité mécanique, mais il faut savoir qu'elle est améliorable. Ainsi, comme nous l'avons vu, un simple écran frontal profilé, léger et bon marché améliore notablement les performances et accessoirement... protège de la pluie ; l'utilisation de la bicyclette à position couchée peut prendre essor chez les banlieusards et les touristes grâce à son efficacité et à son confort.

On pourrait également appliquer cette technologie à de petites machines à position couchée équipées d'un petit moteur de faible puissance. Le moteur pourrait faciliter les démarrages et les ascensions de collines. Si on lui ajoutait un carénage convenant à la ventilation et à la stabilité, on obtiendrait un véritable petit cyclomoteur. (Les machines vendues actuellement sous ce nom ne sont pas des véhicules à pédales motorisés, mais plutôt des motocyclettes peu puissantes.)

Des inventeurs ont eu l'idée de mettre au point des véhicules à propulsion humaine pour des utilisations spécialisées. Paul Schöndorf, professeur à la

Fachhochschule à Cologne, a construit toute une série de tricycles à position couchée pour les personnes âgées et handicapées. Des véhicules de ce genre rendraient d'importants services dans les maisons de retraite. Douglas Schwandt construit des tricycles à pédalier manuel pour les paraplégiques. William Warner, paraplégique qui dé tint à une époque le record des véhicules à propulsion humaine dans les courses sponsorisées par l'Association Internationale des Véhicules à Propulsion Humaine, déclare qu'un handicapé peut mouvoir un véhicule de ce type plus rapidement que le classique fauteuil roulant et gagner ainsi une nouvelle dimension de liberté et de mobilité. (Asher Williams du Centre de rééducation de Palo Alto établit en 1981 le record actuel de 40,4 kilomètres à l'heure.)

En principe, grâce à un véhicule à propulsion humaine entièrement clos et profilé, un cycliste pourrait se déplacer à des vitesses allant de 30 à 50 kilomètres à l'heure par tous les temps. Néanmoins ces véhicules, tels qu'ils sont conçus actuellement, ne peuvent pas être utilisés sur la route. Il leur manque une ventilation, une visibilité et une manœuvrabilité adaptées, ainsi que des dispositifs de sécurité comme les lumières et les essuie-glaces ; de plus, pour la plupart il est difficile d'y entrer ou d'en sortir.

Il faudrait pour perfectionner ces véhicules, investir des sommes comparables à celles qui sont nécessaires pour concevoir une nouvelle voiture. Même alors, le véhicule à pédales ne serait pas sûr dans une circulation constituée d'un grand nombre de véhicules à moteur. Les véhicules à propulsion humaine totalement clos seront utilisables seulement quand la plupart des véhicules à moteurs auront quitté les routes par manque d'essence ou quand on aura construit des routes spéciales pour les machines à pédales !

Il est beaucoup plus probable que les techniques que nous avons décrites conduiront à la mise au point d'automobiles plus légères et d'un meilleur rendement. Douglas Malewicki, l'un des auteurs de cet article, a déjà construit un véhicule de ce type, une machine monoplace pesant 114 kilogrammes. Avec cet appareil, il a établi le record de consommation d'essence à 90 kilomètres à l'heure avec un moteur à essence (1,494 litres aux 100 kilomètres) et avec un moteur diesel (1,5 litre aux 100 kilomètres). Le record pour moteur diesel fut établi lors d'un voyage entre Los Angeles et Las Vegas, effectué à une moyenne de 90,64 kilomètres à l'heure. Le développement de ces véhicules permettrait de faire durer les ressources en essence et, paradoxalement, pourrait reculer la date où les véhicules à propulsion humaine s'imposeraient d'eux-mêmes. ■