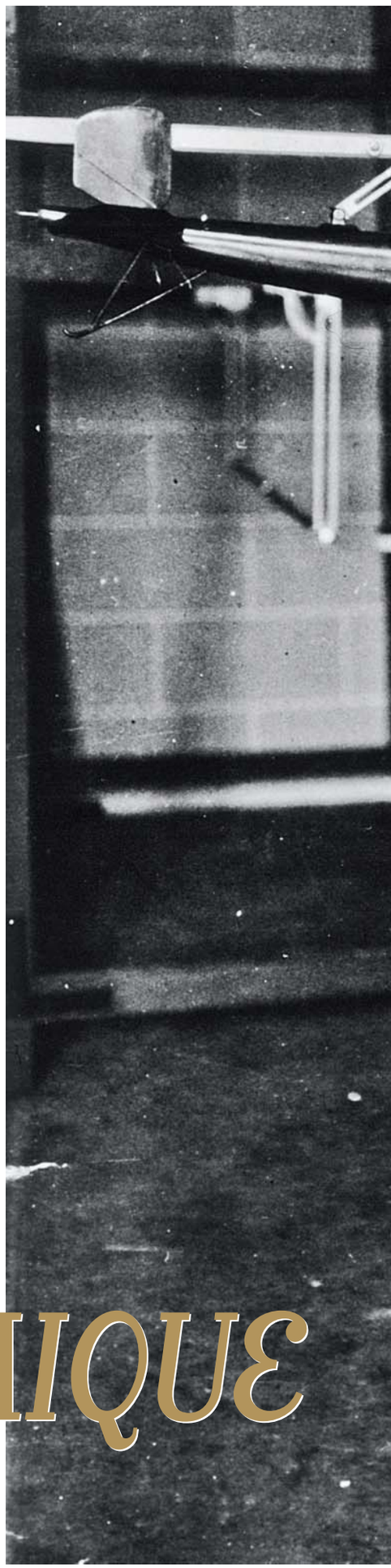
GUSTAVE EIFFEL

LE PÈRE DE *L'AÉRODYNAMIQUE* MODERNE

Personnage digne de Jules Verne, symbole universel de l'ingénieur de la Belle Epoque, Gustave Eiffel est le créateur français de l'aérodynamique contemporaine. La compréhension théorique de la voile, comme celle de l'aviation, découle directement de ses expériences sur la résistance de l'air.



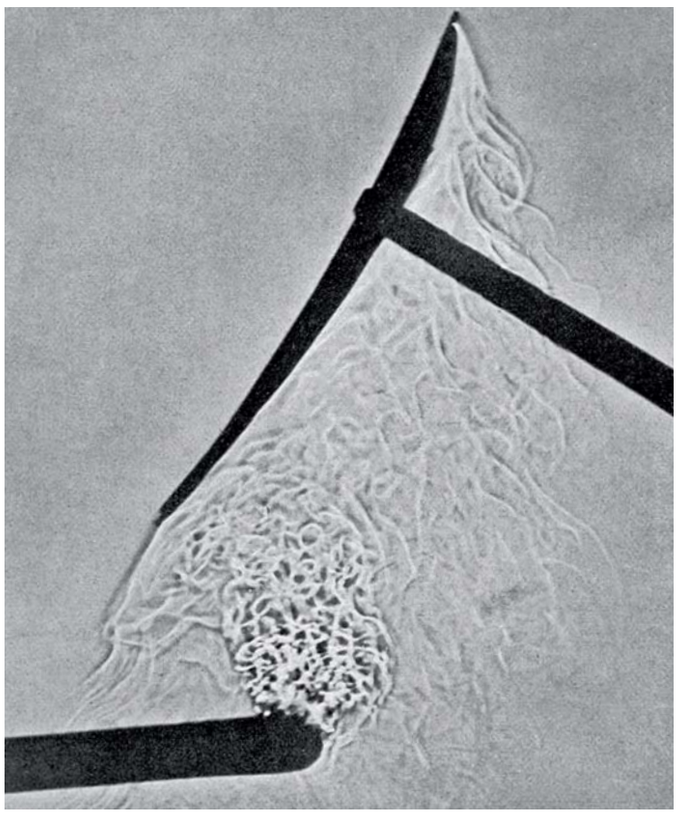
Ingénieur dans le vent. Dans sa soufflerie créée de toutes pièces, Gustave Eiffel teste le modèle au dixième de «l'aéro-torpille Paulhan-Tatin» aux ailes relevées aux extrémités comme celles des grands oiseaux de mer.

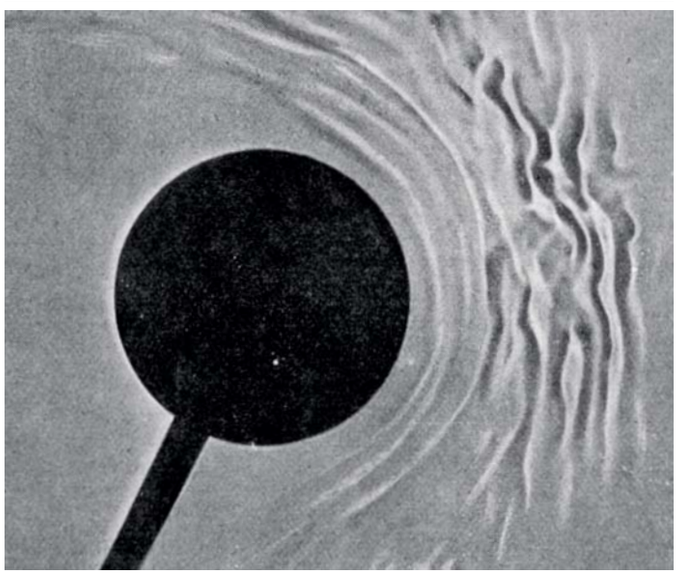
«*Au cours de ma carrière d'ingénieur, le vent a toujours été pour moi un sujet de préoccupation,* confiait Gustave Eiffel à la fin de sa vie. *C'était un ennemi contre lequel j'avais à prévoir une lutte constante, soit pendant la construction, soit après.*» Certes, l'amplitude de l'oscillation du sommet de la tour Eiffel – 70 centimètres maximum – fut soigneusement calculée, mais ponts, viaducs, charpentes métalliques et jusqu'à l'ossature de la statue de la Liberté conçue dans ses ateliers eurent un même impératif : résister au vent.

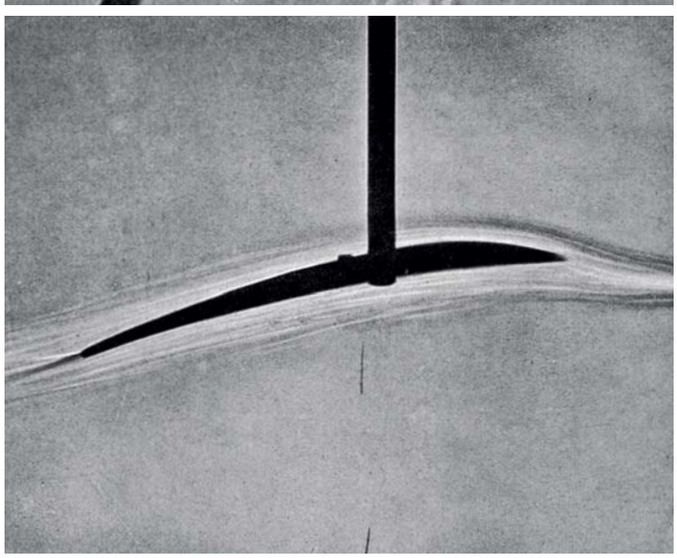
A l'aube du XX[e] siècle et de l'aviation balbutiante, l'aérodynamique est une science à inventer. De Galilée et Newton datent les premiers essais sur la résistance des fluides, mais à l'époque de Gustave Eiffel, les données demeurent toujours incertaines. «*La résistance spécifique, loin d'être connue avec la précision désirable, est représentée par des nombres variant du simple au double,* précise Eiffel. *Cela rend très souhaitable que des études méthodiques viennent apporter quelque clarté dans un sujet où tant de travaux se sont produits, mais devant le résultat desquels celui qui veut en tirer parti reste fort perplexe.*» A 71 ans, Gustave Eiffel, ancien élève de l'Ecole Centrale et richissime industriel, se découvre une vocation nouvelle qui animera les vingt dernières années de sa vie : l'étude de la résistance de l'air.

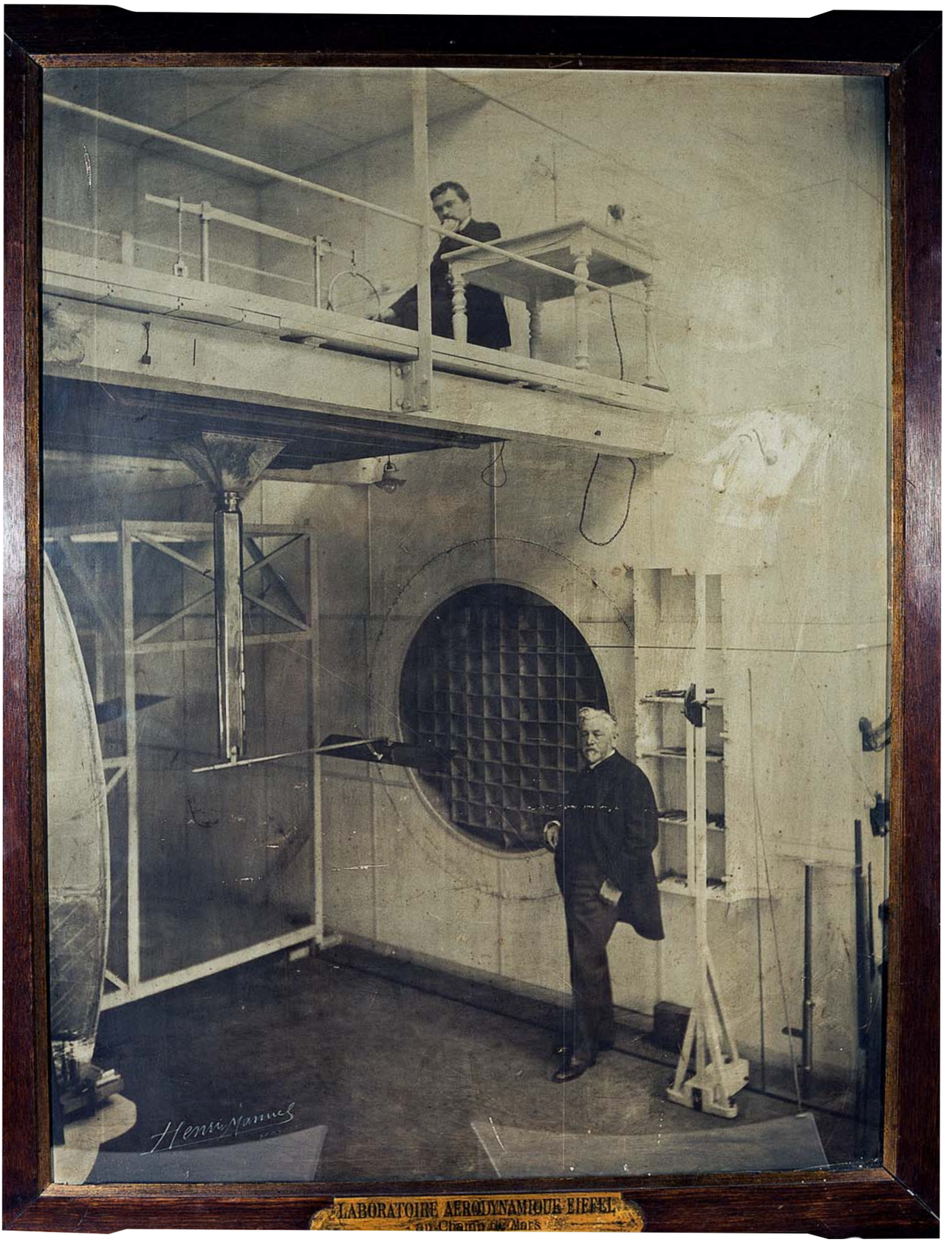
Eiffel rassemble la conséquente littérature scientifique approchant son sujet et se fait traduire les publications étrangères qu'il sou-

Texte **Éric Vibart.**
Photos **collection Aérodynamique Eiffel.**









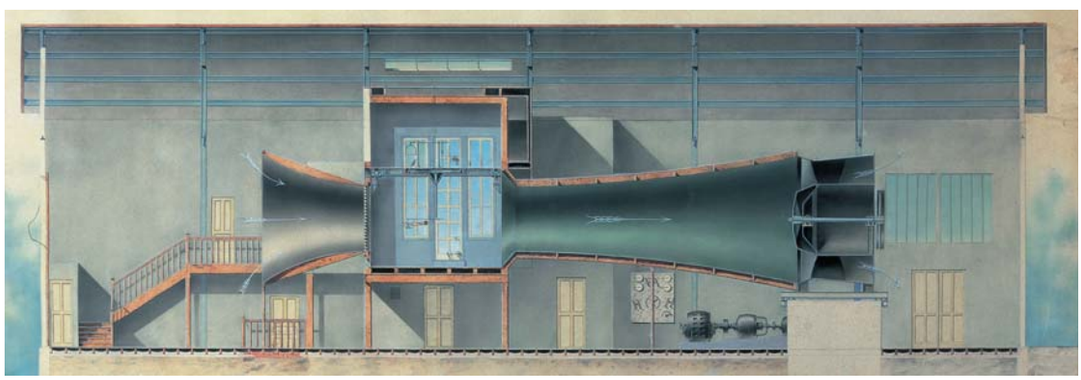
Eole canalisé. Eiffel pose devant la grille du collecteur qui régularise le flux aspiré dans le tunnel dont on devine l'ouverture à gauche de l'image. Ce type de soufflerie se répandit très vite dans le monde entier.

met à examen critique. L'éprouvette aérodynamique du temps, c'est la plaque de tôle, surface plane testée depuis des années sur des manèges, en translation sur des rails ou animée de mouvements pendulaires. En 1901, sur une voie de chemin de fer de 23 kilomètres de long, les ingénieurs de la société Siemens et Halske ont lancé une locomotive équipée de tubes-capteurs et de manomètres à eau pour obtenir des pressions en kilo par mètre carré entre 0 à 160 kilomètres par heure. En Angleterre, une automobile Napier de 40 chevaux est surmontée de plaques de différentes dimensions. Partout, au temps de l'aérostation et de l'aviation sautillante, on fait virevolter des tôles planes à l'extrémité de bras rotatifs équipés d'ingénieux systèmes de mesure, pour tenter d'en déduire des principes généraux !

En 1903, année même du premier vol des frères Wright, Gustave Eiffel procède à ses premiers essais : depuis le second étage de sa tour, 115 mètres au-dessus du sol, il lâche un «appareil de chute» de sa conception, guidé

LAURENT CHARPENTIER

Permanence du génie. La soufflerie d'Auteuil établie par Gustave Eiffel en 1912 est toujours en activité aujourd'hui, discrètement nichée dans les beaux quartiers de Paris.



Sous le vent de l'expérience. Schéma aquarellé de la soufflerie à veine ouverte d'Auteuil où les objets sont testés en aspiration.

le long d'un câble et porteur de plaques d'essai. En chute libre, l'engin accélère jusqu'au moment où la résistance de l'air compense la gravité et où le mouvement de chute devient uniforme. L'essentiel consiste à étudier cette fraction de temps pendant laquelle vitesse de chute et résistance de l'air deviennent constantes. Depuis une trappe pratiquée dans le plancher du second étage, Eiffel lance des milliers de fois son appareil «porte-plaques» en forme d'obus. A l'intérieur, sur des cylindres-enregistreurs passées au noir de fumée, un stylet vibrant à cent coups par seconde enregistre les données. En trois ans, Gustave Eiffel et ses assistants testent une quarantaine de plaques et de volumes de toutes sortes. En 1907, l'ingénieur effectue une première publication à compte d'auteur : «Recherches expérimentales sur la résistance de l'air exécutées à la tour Eiffel» où il détaille méthodes et résultats. Les valeurs qu'il donne pour les couples vitesse-résistance sont bientôt considérées plus précises et plus fiables que toutes celles publiées auparavant. Eiffel s'avoue néanmoins insatisfait des résultats obtenus dès l'instant où les plaques sont inclinées par rapport à l'horizontale. Et c'est précisément ce qui intéresse les aviateurs qui ont saisi le parti qu'il y avait à tirer des essais du Champ de Mars.

L'appareil de chute ne suffit plus et c'est une première soufflerie abritée par un hangar de 240 mètres carrés qu'Eiffel construit au pied de la tour. Il prend ses précédentes expériences à rebours : ce n'est plus la plaque qui se déplace dans l'air immobile, mais l'air qui vient frapper la plaque fixe. Il y a des précédents : le Russe Koutchino a déjà procédé à des essais d'ailes et d'hélices dans un tunnel de 1,20 mètre de diamètre, démontrant au passage que la régularité du flux est mieux assurée par aspiration de l'air que par propulsion. A Göttingen, l'Allemand Prandtl a construit quant à lui un anneau d'essai rectangulaire où l'air est régularisé par 400 canaux parallèles.

Pour sa propre soufflerie alimentée par les groupes électrogènes de sa tour, Eiffel innove en disposant en son centre une chambre d'essai permettant d'intervenir manuellement sur les objets testés. La soufflerie, dite «à veine ouverte», type Eiffel est née. Ses plans aussitôt publiés, elle sera librement reproduite dans le monde entier. Renonçant à toutes royalties par esprit scientifique, Eiffel exige juste que chaque chambre d'essai soit ornée d'une plaque précisant en français : «Appareil Aérodynamique Système Eiffel, G. Eiffel, Paris.»

Mettant au point une balance de mesure de grande précision, Eiffel en vient très vite à tester des profils d'ailes. Avec de minces fils de soie, l'ingénieur et ses assistants repèrent écoulements et turbulences, puis percent leurs plaques de trous minuscules bouchés par des vis affleurantes, permettant de placer à la demande à la surface du profil de petits tubes d'un

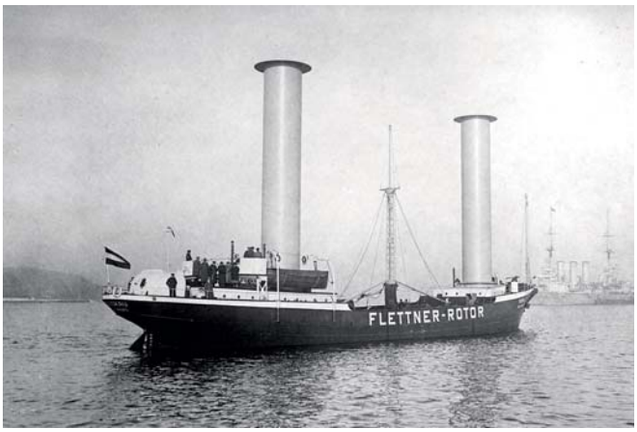
«Avec Eiffel, le temps du pifomètre a vécu. L'ingénieur coordonne expériences et calculs comme aucun aérodynamicien ne l'a fait avant lui.»

Ingénieur et petites mains. Entouré de techniciens mais aussi d'ébénistes et de mécaniciens, Eiffel fut le premier à tester des modèles d'avions entiers.

demi-millimètre de diamètre reliés à des micro-manomètres pour mesurer pressions et dépressions.

Tous les grands noms de l'aviation française se tournent vers Eiffel : le capitaine Ferber, Blériot, Voisin, Farman… L'une des premières avancées est de déterminer que la dépression sur l'extrados d'un profil d'aile est plus forte que la pression sur l'intrados pour assurer la tenue en l'air d'un aéroplane. Découverte considérable, contredisant par l'expérience l'idée populaire que les avions prennent appui sur l'air… et que les voiliers, même aux allures de près, sont «poussés» par le vent ! Cela explique les accidents d'avion causés par la déchirure de l'extrados des ailes et amène à réaliser des entoilages plus forts au-dessus des profils qu'au dessous.

Simultanément, Gustave Eiffel mène des essais sur les hélices, le profilage des mâts des appareils biplans, et travaille à réduire la traînée des roues d'atterrissage. En ce qui concerne les plans porteurs, il met en évidence la propriété «très avantageuse» des grands allongements : «*Pour une sustentation déterminée, la résistance à l'avancement est d'autant moindre que la plaque est plus allongée.*» Un grand principe que confirmera le rendement des quilles étroites et profondes, et dont les voiliers à gréement marconi tireront rapidement parti. Eiffel ouvre ses laboratoires à tous, publie dès qu'il obtient des résultats et coordonne expériences et calculs comme aucun aérodynamicien ne l'a fait avant lui.

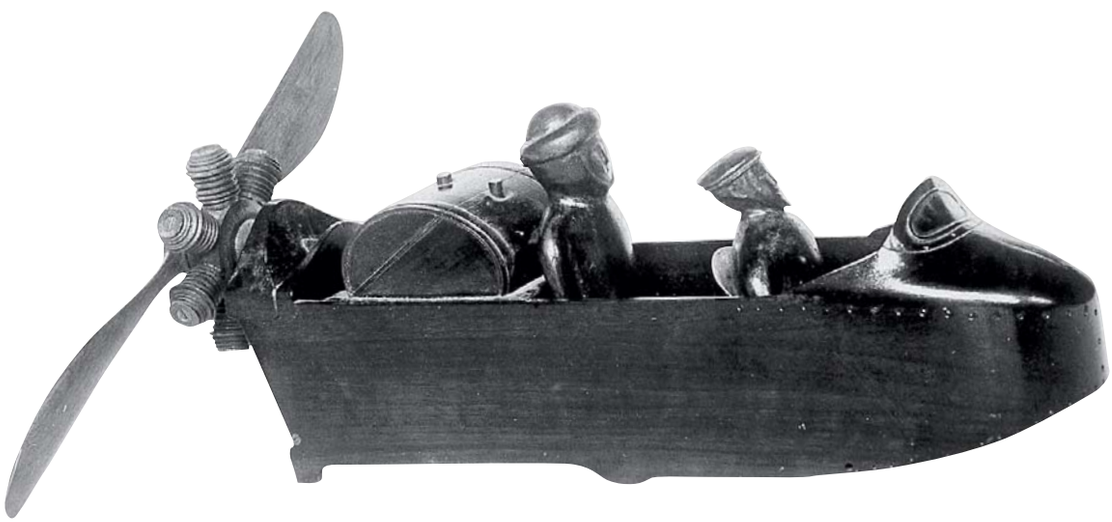


LIBRARY OF CONGRESS

Etat de la Recherche. Voiles à fentes, «en lanières», du capitaine Vassalo (1891), voiles trouées, voiles-parasol de Benjamin Normand (années 1880), rotor Flettner des années vingt (ci-dessus) furent des recherches aérodynamiques connexes à celles d'Eiffel dans le domaine de la navigation.

Expulsée du Champ de Mars car jugée inesthétique, la première soufflerie est remplacée à l'orée de 1912 par une autre, plus puissante, établie à Auteuil, au 67 de la rue Boileau, et qui sous l'enseigne «Laboratoire Aérodynamique Eiffel» reste l'un des lieux secrets du Paris scientifique. Secondé par deux ingénieurs, Léon Rith et Antonin Lapresle, Eiffel, «octogénaire juvénile», règne d'une autorité sans partage. En marge des rapports qui lui sont remis, les commentaires cinglent : «*Je veux mieux que cela… Si vous n'avez pas fini samedi soir, vous y travaillerez dimanche ! C'est bien long, c'est très pressé… Je vous avais demandé de vous isoler dans mon bureau pour piocher à l'abri des causeurs qui vous font perdre du temps. Je crains que vous ne l'ayez pas fait !*» Les essais se multiplient : hangars à dirigeables, pylônes de TSF, extracteurs de cheminée et même voitures de course passent tour à tour dans la chambre d'essai en attendant obus et radiateurs d'avions pendant toute la Première Guerre mondiale.

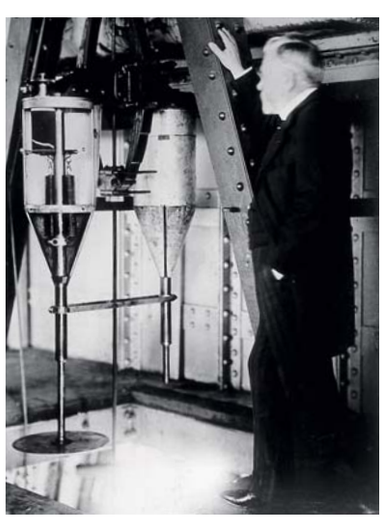
«*Les surfaces inclinées sont, au point de vue du vent, d'un usage beaucoup plus fréquent que les surfaces normales,* écrivait Eiffel en 1910. *Ce sont celles qu'utilisent la navigation à voile, les moteurs aériens, les aéroplanes, et que présentent au vent la plupart des constructions.*» Gustave Eiffel, pour qui la théorie ne vaut rien si elle n'est directement applicable, s'attache à représenter des résultats aisément compréhensibles et développe des diagrammes polaires synthétisant les données pour un profil aérodynamique donné.



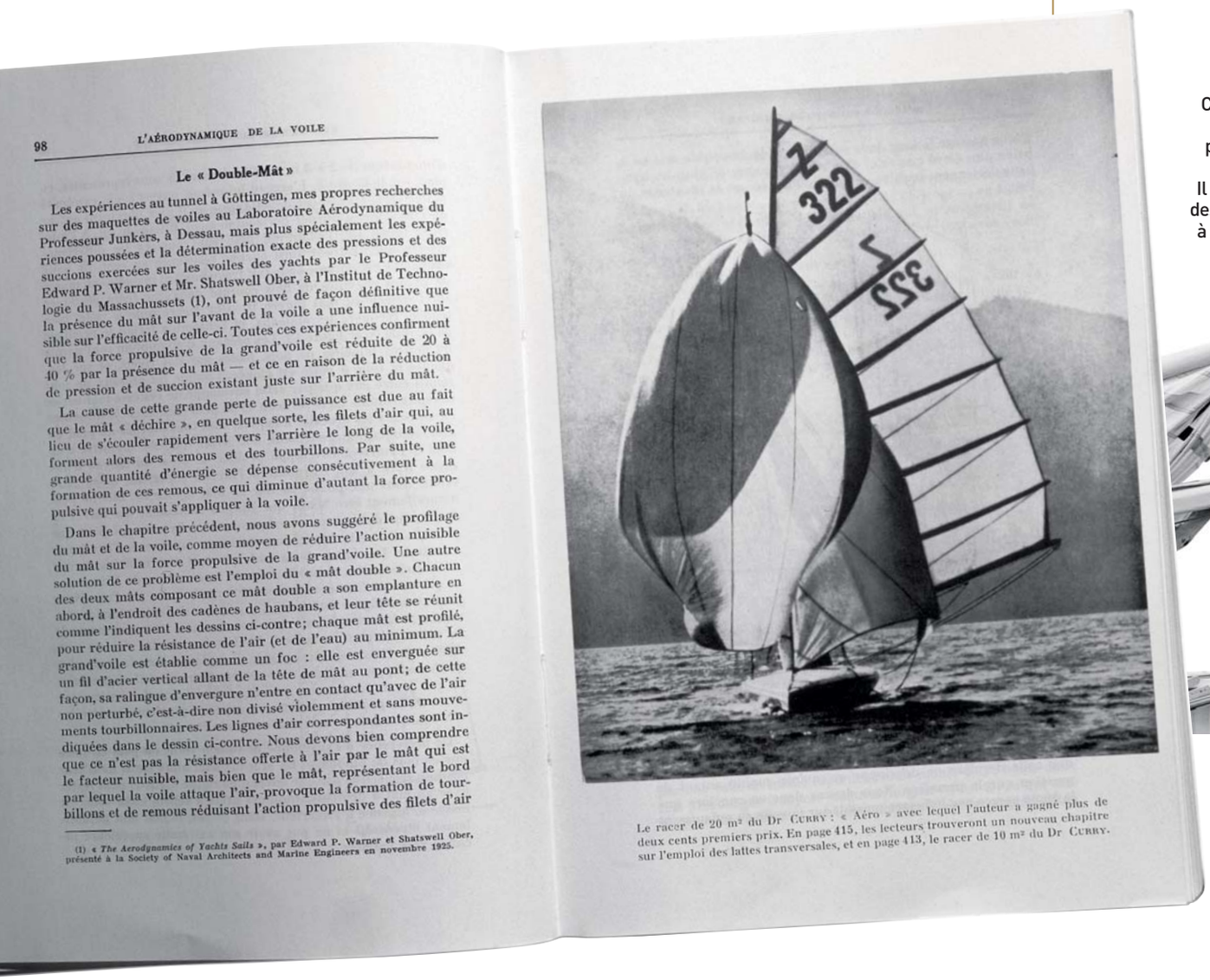
Ce sont ces polaires qui impressionnent un grand adolescent américain établi en Bavière : Manfred Curry. Découvrant grâce à son père, physicien, les traductions des traités d'Eiffel, le jeune régatier en tire à dix-huit ans, deux ans après la mort de l'ingénieur français, une interprétation qui pose un jalon déterminant dans l'histoire de la voile moderne : «L'aérodynamique de la voile et l'art de gagner les régates». Promu gourou avant même sa majorité, ce génie de la régate scientifique reconnaît sa dette envers Eiffel qu'il cite abondamment. Concevant des voiliers expérimentaux, il est invité à mener à son tour des recherches en soufflerie par le professeur Junkers. Curry est le passeur des expériences d'Eiffel auprès des amateurs de voile de compétition. Formes de voiles, interaction des plans porteurs, effet de fente, gréements, appendices, tout est passé au crible, tout dérive des données élaborées sur le Champ de Mars et à Auteuil.

Imaginatif comme Eiffel avant lui, Manfred Curry ne rechigne pas à l'au-

«La compréhension du fonctionnement de nos voiliers a été énoncée, dans ses grands principes scientifiques, par le créateur de la tour Eiffel.»



Ne rien s'interdire. Eiffel testa tout type de mobile : nacelles d'avions, ailes, voitures, obus… Tout découlait des milliers de lâchers mesurés avec «l'appareil de chute» que l'on voit ci-contre équipé d'une plaque en forme de disque.



98 L'AÉRODYNAMIQUE DE LA VOILE

Le « Double-Mât »

Les expériences au tunnel à Göttingen, mes propres recherches sur des maquettes de voiles au Laboratoire Aérodynamique du Professeur Junkèrs, à Dessau, mais plus spécialement les expériences poussées et la détermination exacte des pressions et des succions exercées sur les voiles des yachts par le Professeur Edward P. Warner et Mr. Shatswell Ober, à l'Institut de Technologie du Massachussets (1), ont prouvé de façon définitive que la présence du mât sur l'avant de la voile a une influence nuisible sur l'efficacité de celle-ci. Toutes ces expériences confirment que la force propulsive de la grand'voile est réduite de 20 à 40 % par la présence du mât — et ce en raison de la réduction de pression et de succion existant juste sur l'arrière du mât.

La cause de cette grande perte de puissance est due au fait que le mât « déchire », en quelque sorte, les filets d'air qui, au lieu de s'écouler rapidement vers l'arrière le long de la voile, forment alors des remous et des tourbillons. Par suite, une grande quantité d'énergie se dépense consécutivement à la formation de ces remous, ce qui diminue d'autant la force propulsive qui pouvait s'appliquer à la voile.

Dans le chapitre précédent, nous avons suggéré le profilage du mât et de la voile, comme moyen de réduire l'action nuisible du mât sur la force propulsive de la grand'voile. Une autre solution de ce problème est l'emploi du « mât double ». Chacun des deux mâts composant ce mât double a son emplanture en abord, à l'endroit des cadènes de haubans, et leur tête se réunit comme l'indiquent les dessins ci-contre; chaque mât est profilé, pour réduire la résistance de l'air (et de l'eau) au minimum. La grand'voile est établie comme un foc : elle est enverguée sur un fil d'acier vertical allant de la tête de mât au pont; de cette façon, sa ralingue d'envergure n'entre en contact qu'avec de l'air non perturbé, c'est-à-dire non divisé violemment et sans mouvements tourbillonnaires. Les lignes d'air correspondantes sont indiquées dans le dessin ci-contre. Nous devons bien comprendre que ce n'est pas la résistance offerte à l'air par le mât qui est le facteur nuisible, mais bien que le mât, représentant le bord par lequel la voile attaque l'air, provoque la formation de tourbillons et de remous réduisant l'action propulsive des filets d'air

(1) « *The Aerodynamics of Yachts Sails* », par Edward P. Warner et Shatswell Ober, présenté à la Society of Naval Architects and Marine Engineers en novembre 1925.

Le racer de 20 m² du Dr Curry : « Aéro » avec lequel l'auteur a gagné plus de deux cents premiers prix. En page 415, les lecteurs trouveront un nouveau chapitre sur l'emploi des lattes transversales, et en page 413, le racer de 10 m² du Dr Curry.

L'élève dépasse le maître. Manfred Curry testa à son tour en soufflerie des plaques métalliques en forme de voile. Il confirma l'avantage des formes elliptiques à grand allongement.

D.R.

dace, teste bômes souples, safrans déformables, dérives à incidence variable, changeant radicalement la vision du bateau compris dans son environnement aquatique et aérien. Séparant à jamais le voilier de compétition de l'embarcation de plaisance, il laisse une empreinte durable, invente au passage le taquet-coinceur, lance le génois, teste les voiles à tuyères et même… le frein, nageoire commandée à distance plongeant à la verticale de part et d'autre du safran pour casser l'erre du bateau. Découlant des travaux d'Eiffel, ceux de Manfred Curry créent une filiation naturelle entre l'ingénieur français et les spécialistes qui ont affiné la théorie de la voile après les années cinquante, auteurs de «bibles» faisant autorité : Marchaj («Hydro-Aerodynamics of Sailing»), Ross Garrett («Symmetry of sailing»), Frank Bethwaite («High Performance Sailing») ou Bertrand Chéret («Les Voiles, comprendre, régler, optimiser»).

Par une cruelle ironie du sort, la personnalité méconnue et peu avenante de Manfred Curry occulta pour les amateurs de voile la stature du célébrissime Eiffel. Il en alla de même

GILLES MARTIN RAGET

Un souffle de modernité. Lors de l'America's Cup 2007, des essais étaient effectués à Valence par Dave Le Pelley, directeur du Yacht Research Unit de l'université d'Auckland pour Team New Zealand.

au Panthéon des sciences où le créateur de l'aérodynamique moderne fut escamoté au bénéfice du mythique constructeur de ponts, de viaducs, et de l'omniprésente tour de 300 mètres. Impossible, cependant, de réduire vingt ans de travaux d'Eiffel à un point d'histoire. La précision des mesures, des valeurs et des principes qu'il a contribué à fixer constituent une base toujours fiable pour les essais en soufflerie qui n'ont jamais eu autant d'actualité, qu'il s'agisse de véhicules, d'ouvrages d'art, d'architecture… ou de performances à la voile.

L'ordinateur n'a pas tué la soufflerie par la modélisation numérique mais contribue à rendre les essais plus précis, plus directement applicables à la réalité. Comme du temps d'Eiffel, un maximum de paramètres sont pris en compte, comme la pression atmosphérique, l'hygrométrie ou la température. En 1910 déjà, l'ingénieur reproduisait chaque expérience dans différentes conditions climatiques pour affiner ses résultats. Plus que sur l'effet d'échelle, il insistait davantage, comme le font les aérodynamiciens contemporains, sur la valeur comparative d'un grand nombre de mesures «*susceptibles de fournir des renseignements précieux aux techniciens et aux constructeurs, épargnant les tâtonnements que comporte une étude faite uniquement en grandeur, au prix de grands sacrifices de temps et d'argent*».

Gustave Eiffel mérite mieux que son image d'Epinal de bâtisseur spectaculaire : c'est un vrai savant à qui l'approche scientifique du voilier doit les bases de sa connaissance. Et ce n'est pas du vent. E.V. ●