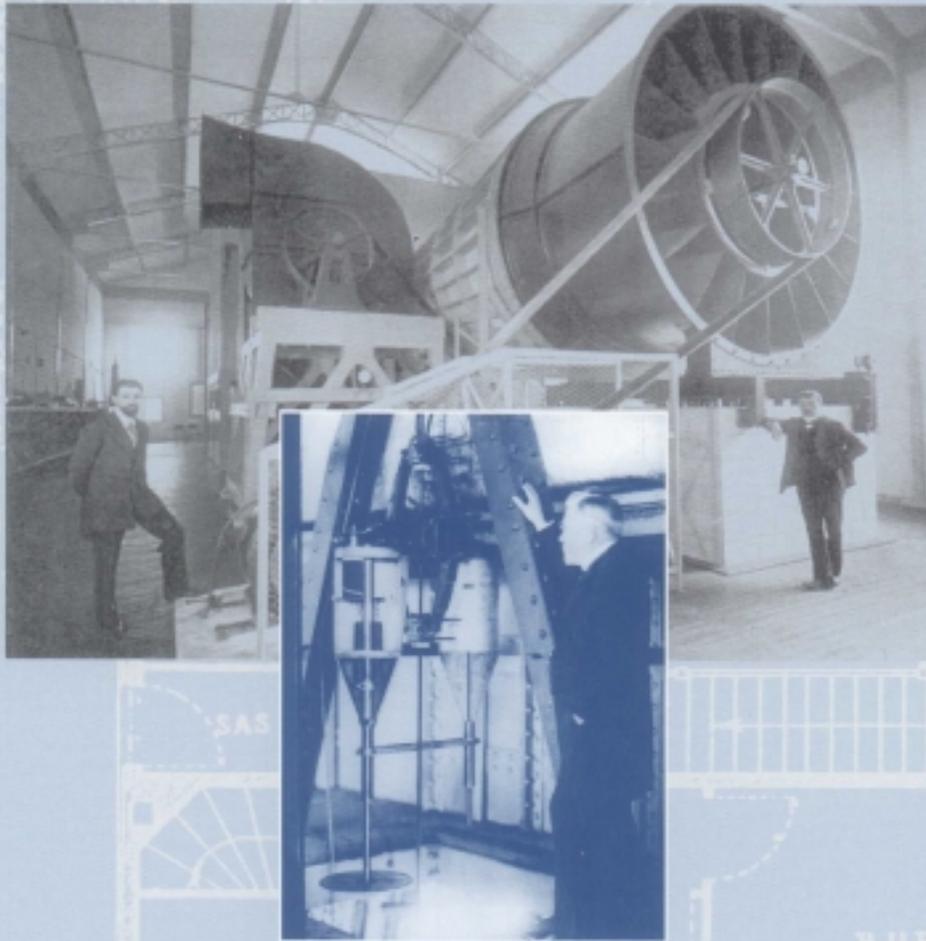


Eiffel 1903 Drop Test Machine and 1912 Wind Tunnel

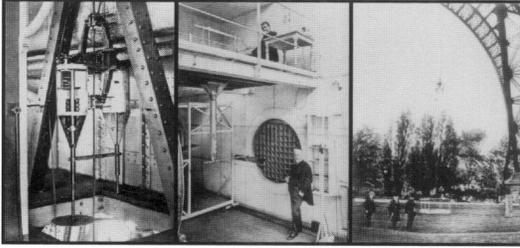


Historic Mechanical Engineering Landmarks



67 rue Boileau - 75016 Paris - France

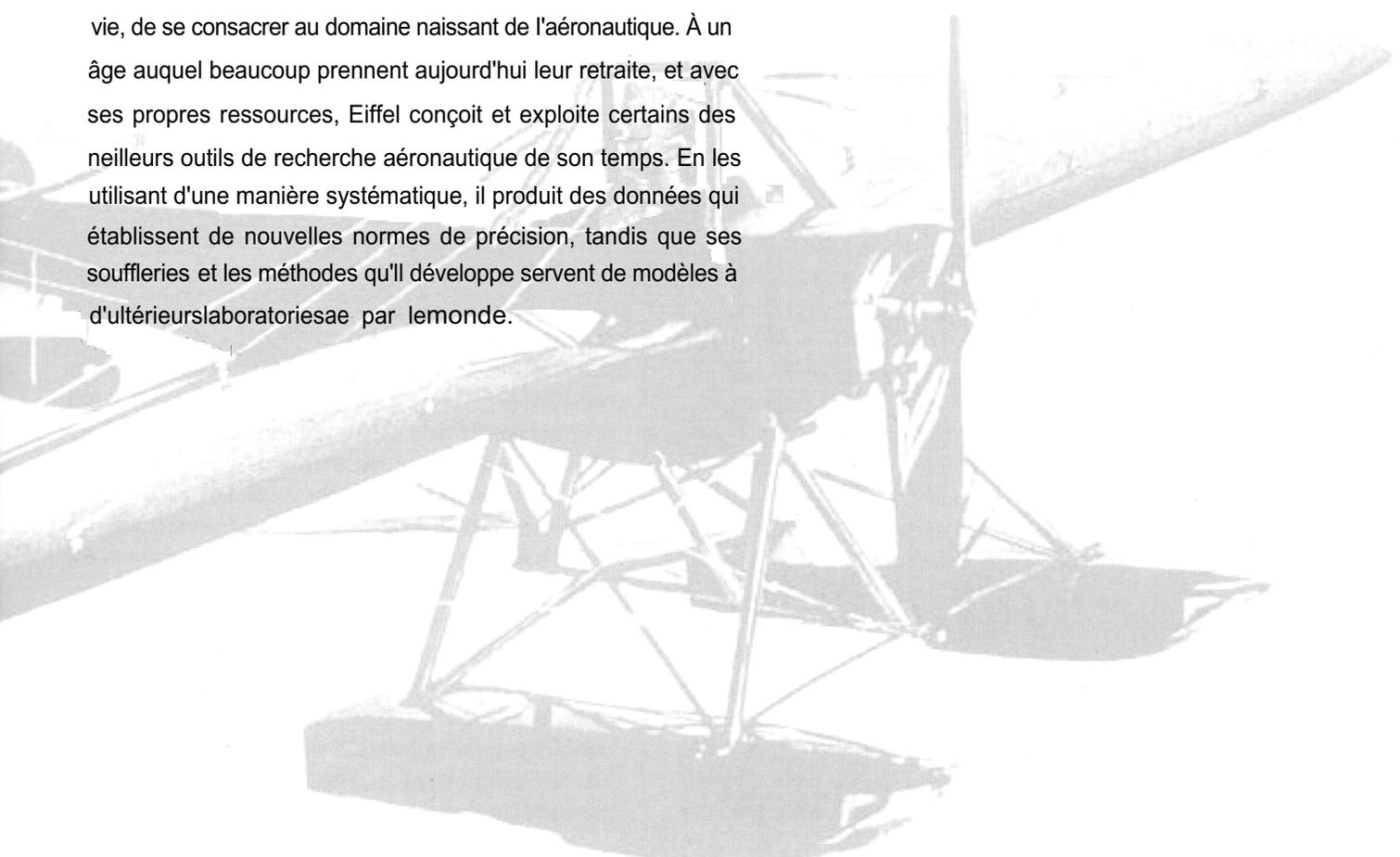
October 27, 2005



Introduction

Gustave Eiffel (1832-1923) is a prominent name in the history of engineering and technology. Educated as a civil engineer at the École Centrale des Arts et Manufactures, Eiffel's career spanned over fifty years, and he designed dozens of legendary iron and steel structures, including the Porto Viaduct in Portugal, the supporting structure for the Statue of Liberty in New York Harbor, and the Eiffel Tower in Paris. This long and successful career brought him considerable wealth, and late in life he decided to invest in the newly emerging field of aeronautics. At an age when many people now retire, and using his own funds, Eiffel built and operated some of the finest aeronautical research tools of his day. Using them in a systematic manner, he produced data that set a new standard for accuracy, and his wind tunnels and methods served as models for subsequent laboratories around the world.

Gustave Eiffel (1832-1923) occupe une place éminente dans l'histoire des sciences de l'ingénieur et de la technologie. La carrière d'Eiffel, ingénieur civil de l'École Centrale des Arts et Manufactures, couvre plus de cinquante ans pendant lesquels il conçoit des douzaines de légendaires structures en fer et en acier, notamment le Viaduc de Porto au Portugal, l'ossature de la Statue de la Liberté dans la rade de New York, et la Tour Eiffel à Paris. Cette longue et fructueuse carrière lui apporte une fortune personnelle considérable, qui lui permet, vers la fin de sa vie, de se consacrer au domaine naissant de l'aéronautique. À un âge auquel beaucoup prennent aujourd'hui leur retraite, et avec ses propres ressources, Eiffel conçoit et exploite certains des meilleurs outils de recherche aéronautique de son temps. En les utilisant d'une manière systématique, il produit des données qui établissent de nouvelles normes de précision, tandis que ses souffleries et les méthodes qu'il développe servent de modèles à d'autres laboratoires à travers le monde.



Eiffel and aerodynamics

There was much interest in flight as the twentieth century dawned, particularly in Europe and America, but no one had yet flown in a powered craft when Gustave Eiffel began his own investigations into the effects of a solid body moving through the air. Several test methods had been used by various experimenters, including drop testing, whirling arms, and rudimentary wind tunnels (although the term "wind tunnel" would not appear until later), but most of these techniques were very primitive, and they yielded inconsistent results. Eiffel applied his engineering knowledge and experience to two of these methods, and he produced what is arguably the most sophisticated drop-testing apparatus ever constructed and some of the most capable and consistently performing early wind tunnels. Eiffel designed these devices with specific research programs in mind. Unlike many of his contemporaries who tried to build gliders and flying machines based on unproven notions, Eiffel realized that certain basic information about how solid bodies and air interacted would be crucial to success.

The 1903 drop test machine

Eiffel began experimenting with drop tests, where a body was simply dropped from a height, with gravity doing the work. This method was simple and reliable, but it proved very difficult for an observer on the ground to measure and record the body's motion and the forces acting on it. When released, a body would accelerate until the air resistance force equaled the force of gravity, after which it would move at a constant speed until it struck the ground, or was otherwise stopped. To get useful data, it was necessary to know the portion of the fall where the body was moving at a constant speed and the air resistance force, called "drag": was constant.

Eiffel designed a machine that could record the drag on an internal paper graph during the test. Rather than trying to measure velocity during the test, he could examine the chart afterward, when

Eiffel et l'aérodynamique

À l'aube du XX^e siècle l'intérêt porté au vol du plus lourd que l'air, en particulier en Europe et aux États-Unis, est grand, mais personne n'a encore réalisé un vol avec un avion motorisé quand Gustave Eiffel commence ses propres recherches sur les effets du mouvement d'un corps solide dans l'air. Même si plusieurs méthodes d'essai sont déjà utilisées par divers expérimentateurs, notamment les essais de chute, les bras tournants, et les tunnels aérodynamiques rudimentaires (le terme de "soufflerie" n'apparaît que plus tard), la plupart de ces techniques restent très primitives, et ne donnent que des résultats incohérents. Eiffel applique ses connaissances et son expérience d'ingénieur à deux de ces techniques et conçoit ce qui est sans conteste "l'appareil de chute" le plus sophistiqué jamais construit et quelques-unes des souffleries les plus perfectionnées et les plus performantes. Eiffel imagine ces dispositifs en vue de programmes de recherche spécifiques. Contrairement à certains de ses contemporains qui essaient de construire planeurs et machines volantes sur des bases incertaines, Eiffel comprend que le succès de ses projets dépend essentiellement de la compréhension des interactions entre les corps solides et l'air environnant.

L'appareil de chute de 1903

Eiffel commence ses expériences avec des essais de chute libre qui consistent à faire tomber un objet d'une certaine hauteur. Cette méthode est simple et fiable, mais il est très difficile pour l'observateur placé au sol de mesurer et d'enregistrer le mouvement de l'objet et les forces qui s'exercent sur lui. Une fois abandonné, le corps accélère jusqu'au moment où la résistance de l'air compense la force de la gravité, et où le mouvement de chute devient uniforme. Pour recueillir des données utiles, il est nécessaire de connaître la portion de la chute pendant laquelle le corps se déplace à vitesse constante et la résistance de l'air devient constante.

Dans ce but, Eiffel conçoit un appareil embarqué qui enregistre pendant la chute la résistance de l'air sur un papier recouvert de noir de fumée. Au lieu de mesurer la vitesse pendant l'essai, son appareil permet d'analyser le diagramme enregistré après chaque expérience. L'appareil

he could carefully measure points on the line drawn on the graph at his leisure. Eiffel's machine featured two identical parallel cylinders with conical noses. Inside each one was a recording mechanism and a measurement device, which was attached to a rod that protruded out the bottom. Various shaped objects were fastened to it. When released, the amount of drag drawn on the graph would increase as the machine accelerated, but then level off at a constant value once the constant speed was reached. The device recorded the time and distance traveled on the graph as well, so it was easy to compute the magnitude of the constant speed for each test. Eiffel calibrated the device by dropping it with no test specimen attached. This revealed the drag on the machine itself, which could later be deducted from the total drag to get the net result for each test body.

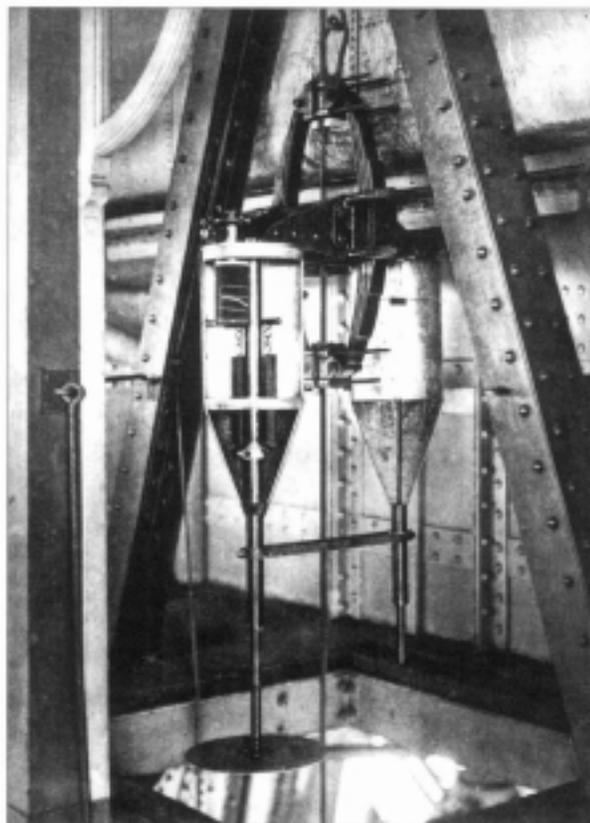
Not coincidentally, Eiffel had an excellent location for his drop testing, the Paris tower that bears his name. He installed a vertical guide wire from the tower's second floor to the ground, a distance of approximately 115 meters (377 feet). Eiffel also included a brake that actuated about 21 meters (69 feet) above the ground. This preserved the machine and test body, and the sudden reduction in drag on the graph indicated the end of the steady-state test conditions.

Eiffel conducted his first drop test at the tower on July 30, 1903. Over the next three years, he tested some 40 different two-dimensional and three-dimensional shapes. All were tested facing directly into the air stream, and several were mounted so that they could be tested at various angles of attack. In 1907 Eiffel published *Recherches expérimentales sur la résistance de l'air exécutées à la Tour*, detailing his methods and results. His speed-versus-drag values were soon accepted as the most reliable data available.

Eiffel generated important data with this apparatus, but he soon realized that it limited the scope of his investigations. If he wanted to study wing lift, propeller action, or just about anything else aeronautical, he needed something better, a device capable of longer duration tests under more carefully controlled conditions. In his characteristic fashion, Eiffel performed a thorough, systematic

d'Eiffel est formé de deux cylindres parallèles identiques à nez coniques contenant chacun un tambour-enregistreur, et un dynamomètre rattaché à une tige faisant saillie à l'avant où l'on vient fixer des objets de diverses formes géométriques. Pendant la chute, la valeur de la résistance de l'air enregistrée par le diagramme augmente avec l'accélération de l'appareil et se stabilise quand la vitesse devient constante. L'appareil enregistre aussi l'espace parcouru et le temps, rendant facile le calcul de la vitesse pour chaque essai. Eiffel a calibré l'appareil en le laissant tomber sans modèle, ce qui lui permet de connaître la valeur de la résistance de l'appareil lui-même et de déduire ensuite de la résistance totale pour obtenir, finalement, celle de l'objet essayé.

Eiffel a un lieu idéal pour ses essais de chute: la Tour qui porte aujourd'hui son nom. Il installe un câble vertical de guidage entre le second étage de la Tour et le sol, soit une distance d'à peu près 115 mètres (377 pieds). Il installe un frein qui s'active à 21 mètres du sol pour arrêter la chute et éviter de détériorer l'appareil ou l'objet essayé. Cabrupte diminution de la résistance de l'air



The drop test machine with one cover removed. The recording cylinder is on the left and the springs of the force gauge are on each side of the rod. Test of a circular plate.

L'appareil de chute avec un cylindre ouvert. Le cylindre pour l'enregistrement est à gauche et les deux ressorts du dynamomètre sont des deux cotés de la tige centrale. Essai d'une plaque circulaire.

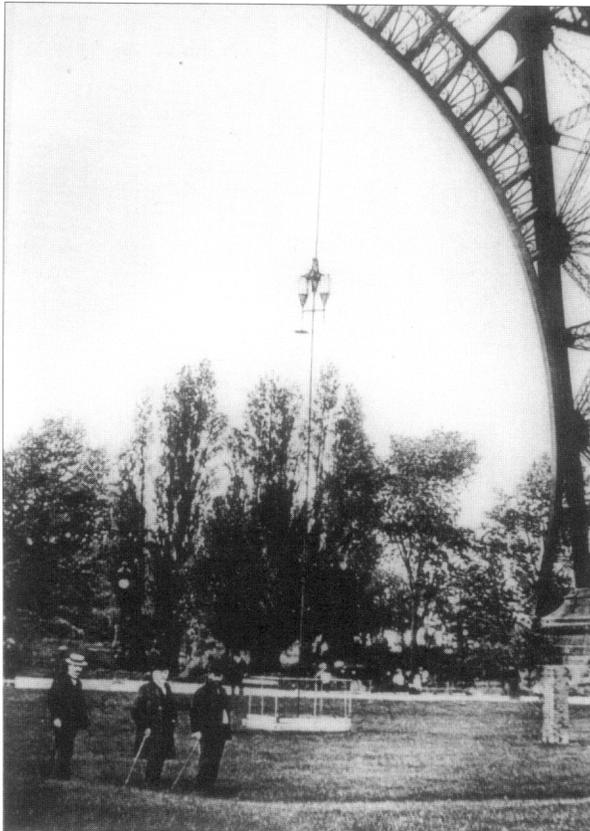
review of existing aeronautical research methods, publishing the results in *La Résistance de l'air: Examen des formules et des expériences* in 1910. By then, Eiffel knew what his next device would be.

Eiffel's first wind tunnel

Eiffel had decided that the device now known as a wind tunnel would best suit his needs, but this decision rested on an important assumption: that the forces on a stationary body from a fluid moving around it are the same as the forces on that body moving at the same speed through still air. This concept, called relative motion, had been postulated at least four centuries earlier by Leonardo da Vinci, and later recognized by such notables as Isaac Newton and Jean le Rond d'Alembert. But no one had ever run physical tests to confirm the theory, and some doubters remained. Having reviewed the

The drop test machine at the end of its drop

L'appareil de chute a la fin de son parcours



indiquée sur le diagramme correspond à la fin des conditions stationnaires d'essai.

Eiffel réalise son premier essai de chute de la Tour le 30 juillet 1903. Les trois années suivantes, il expérimente une quarantaine de surfaces et volumes de diverses formes. Tous les modèles font face au courant d'air, et certains font l'objet de plusieurs essais selon des angles d'attaque différents. En 1907, Eiffel publie les *Recherches expérimentales sur la résistance de l'air exécutées à la Tour* où il décrit ses méthodes et ses résultats. Les valeurs qu'il donne pour les couples vitesse-résistance sont bientôt considérées comme étant les plus précises.

Même si l'appareil de chute donne des résultats très satisfaisants, Eiffel a clairement conscience que les expériences réalisées ont épuisé les possibilités du dispositif. Pour étudier la sustentation des ailes, la propulsion et n'importe quels autres paramètres aéronautiques, Eiffel a besoin d'un meilleur outil: une installation qui permettrait de réaliser des essais de longue durée et dans des conditions contrôlables. Suivant une démarche toute personnelle, Eiffel entreprend l'examen systématique et minutieux des méthodes d'essais disponibles en recherche aéronautique, et publie, en 1910, ses résultats dans *La résistance de l'air: Examen des formules et des expériences*. À ce moment là Eiffel sait à quoi doit rassembler sa future installation.

La première soufflerie d'Eiffel

Eiffel décide que l'installation la plus apte à satisfaire ses besoins, est ce qui est aujourd'hui une "soufflerie aérodynamique". Cependant, sa décision était basée sur une hypothèse importante: que les forces exercées sur un corps au repos dans un courant sont égales aux forces que subit un corps qui se meut à la même vitesse dans l'air au repos. Cette notion de mouvement relatif a été postulée au moins quatre siècles auparavant par Leonard de Vinci, et on la retrouve plus tard chez des savants comme Isaac Newton et Jean le Rond d'Alembert. Pourtant personne ne l'avait corroborée expérimentalement et des doutes persistaient à ce sujet. Ayant fait le point sur la question, Eiffel est confiant dans la validité de la notion de mouvement relatif et est convaincu qu'une telle installation peut lui fournir la répétitivité et les durées d'essais qu'il souhaite.

*The building
for the Eiffel wind
tunnel on the
Champs-de-Mars.*

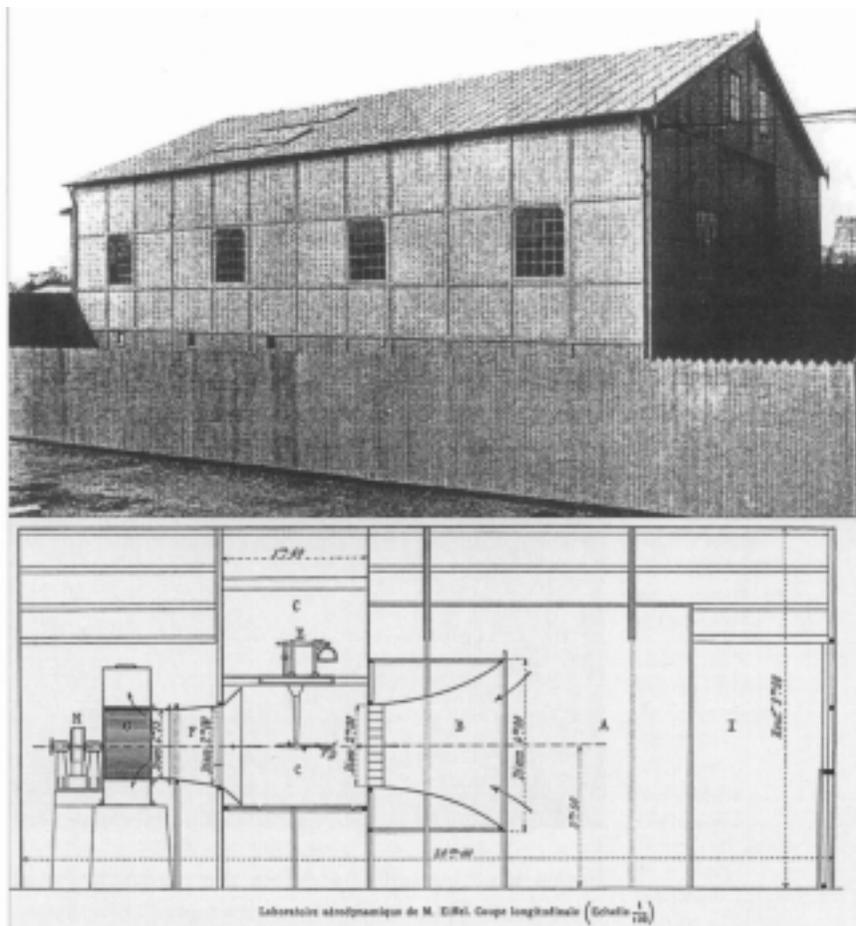
Le bâtiment
de la soufflerie Eiffel
du Champs-de-Mars.

state of the art, Eiffel felt confident in accepting the validity of relative motion, and he realized that such a tunnel could give him the repeatability and long test times he wanted.

Eiffel built his first tunnel on the Champs-de-Mars near the foot of the Eiffel Tower. The tower had a generator to produce electricity that powered the tower's elevators and lights, so he could use power from it to drive the tunnel's blower. A Sirocco blower driven by a 50-kilowatt (68-horsepower) motor sucked air through the test section and then blew it through a hall and back into the building's main room. A flared inlet duct with a honeycomb-type flow straightener streamlined the air flow entering the test section.

The most unique feature of this wind tunnel, and the one most notably associated with Eiffel, was its test section. Like other experimenters of the time, Eiffel had concerns about how walls near the test specimen would affect the air flow around it. Other tunnels had been built with open test sections that had no walls, but open test sections were affected by atmospheric changes, or even movements within the room. Eiffel devised a test section that addressed both issues. He built a room closed off from the rest of the building. The inlet duct fed air in through one wall of this "experimental chamber" and the blower's suction inlet penetrated the wall directly across the test room from it. This allowed a horizontal column of air 1.5 meters (59 inches) in diameter to move across the room, but not come in contact with its walls. The air speed was 20 meters per second (65 feet per second). Since the experimental chamber was closed off from the larger space, the test room conditions remained much more constant than did those in a typical open-section tunnel. The force measuring apparatus, known as a balance, was mounted on a mezzanine in this chamber above the test area. Only the end of the bracket that held test specimens protruded into the air stream. Future tunnels with this type of test section came to be known as "Eiffel type" tunnels.

Eiffel finished this wind tunnel and began his experiments in 1909. One of his test programs was to systematically test the bodies he had drop tested



Eiffel installe sa première soufflerie au Champs-de-Mars, au pied de la Tour Eiffel. Un ventilateur de type "Sirocco", actionné par un moteur de 50 kW (68 CV) alimenté par l'énergie électrique produite pour faire fonctionner les ascenseurs et l'illumination de la Tour, aspire l'air au travers de la veine d'essais et l'évacue dans le hall du bâtiment. Un convergent, équipé d'un redresseur en nid d'abeille, assure le parallélisme des filets fluides à l'entrée de la veine d'essais d'un diamètre de 1,5 m (59 pouces). La vitesse du courant est de 20 mètres (65 pieds) par seconde. Le dynamomètre, appelé couramment balance, repose sur une mezzanine placée au-dessus de la chambre d'expériences. Seule l'extrémité de la tige qui porte le modèle fait saillie dans le courant d'air.

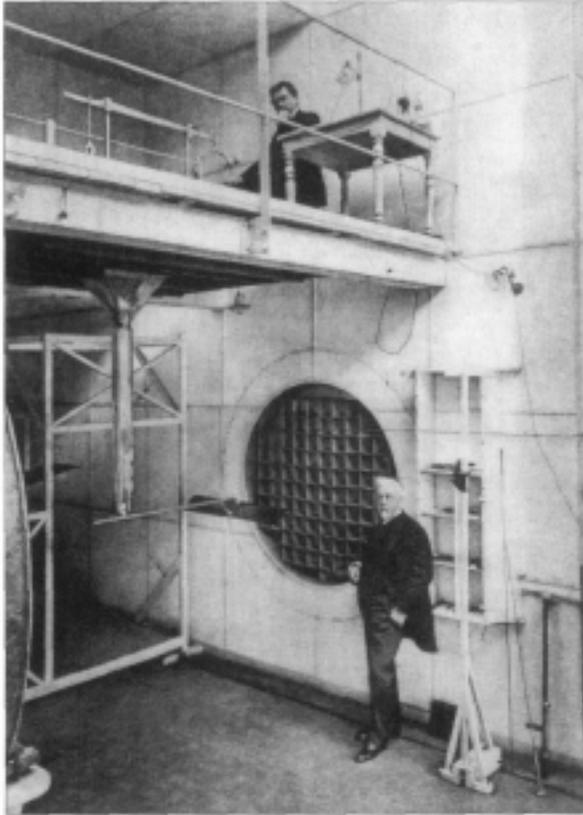
La caractéristique la plus originale de cette soufflerie, et la plus couramment associée à Eiffel, est la veine d'essais. Comme d'autres chercheurs de l'époque, Eiffel était préoccupé par les effets des parois de la veine sur

*Section
of the wind tunnel
at the Champs-
de-Mars.
Note the enclosed
experimental
chamber (C).*

Coupe
longitudinale
de la soufflerie
du Champs-
de-Mars.
La chambre
d'essais
est désignée
par la lettre C.

Eiffel and
a coworker
at the wind
tunnel of Champs-
de-Mars.

Eiffel et un
collaborateur
à la soufflerie
du Champs-de-
Mars.



in the wind tunnel to validate the performance of the tunnel. This was the first true test of the relative motion theory, and the data proved it valid. The forces measured in the wind tunnel matched those obtained during the drop tests.

The Wright brothers had successfully flown their *Flyer* six years earlier, and they had recently demonstrated their improved airplane in France to great acclaim. Aviation fever quickly gripped Europe, and many pioneers pursued a wide variety of concepts for what they hoped would be successful airplanes. Because of Eiffel's reputation, many of these pioneers sought him out to test their wing and propeller designs. Between 1909 and 1912, Eiffel ran over 4,000 tests in this tunnel, and his systematic experimentation set a new standard for aeronautical research. As with his drop tests, Eiffel published his methods and early findings in 1911 under the title *Résistance de l'air et l'aviation: Expériences effectuées au Laboratoire du Champs-de-Mars*. So important was this work that American

l'écoulement d'air au voisinage des objets essayés. Les souffleries construites avec des veines ouvertes, donc sans parois, avaient l'inconvénient d'être sensibles aux modifications des conditions atmosphériques et aux mouvements dans le hall d'essais. Eiffel trouve une solution à ces deux problèmes en construisant autour de la veine d'essais une chambre fermée isolée du reste du bâtiment. L'air y pénètre par l'une des parois et est évacué par la paroi opposée, au travers de la conduite d'aspiration du ventilateur. Par la suite, les souffleries équipées de chambres d'essais étanches seront dites de "type Eiffel".

Eiffel commence les expériences avec la soufflerie du Champs-de-Mars en 1909. Une des premières séries d'expériences consiste à tester systématiquement les corps déjà étudiés avec l'appareil de chute, pour vérifier la validité du dispositif d'essai "au point fixe". Les résultats obtenus dans la soufflerie sont les mêmes que ceux obtenus avec l'appareil de chute, de sorte que ces essais constituent la première vérification expérimentale de la théorie du mouvement relatif.

Les frères Wright avaient déjà effectué six ans auparavant plusieurs vols avec leur *Flyer*, et plus récemment avaient fait avec succès des démonstrations de leur aéroplane en France. L'enthousiasme pour l'aviation ayant conquis l'Europe, de nombreux pionniers travaillent à divers concepts de ce qu'ils pensent être des aéroplanes réussis. La réputation d'Eiffel est telle que plusieurs s'adressent à lui pour essayer leurs ailes et propulseurs. De 1909 à 1912, Eiffel accumule plus de 4000 expériences. Comme pour les essais de chute, Eiffel publie ses méthodes et ses premiers résultats en 1911 dans *La Résistance de l'air et l'aviation: Expériences effectuées au Laboratoire du Champs-de-Mars*. Ce travail est si important que deux ans après il est traduit en anglais par Jérôme C. Hunsaker, un officier de la marine américaine.

Avec son modeste laboratoire du Champs-de-Mars, Eiffel démontre, sans l'ombre d'un doute, la validité et l'utilité des essais en soufflerie et par son approche systématique des phénomènes, établit de nouvelles normes pour la recherche aéronautique. Il est néanmoins conscient que beaucoup plus peut être fait avec des installations plus évoluées. Ainsi, tout en poursuivant les expériences au Champs-de-Mars, Eiffel entreprend la conception d'un dispositif amélioré dont les caractéristiques techniques seront celles des laboratoires aérodynamiques modernes.

naval officer Jerome C. Hunsaker translated it into English two years later.

With this basic laboratory on the Champs-de-Mars, Eiffel had proven the validity and usefulness of wind tunnel testing beyond any doubt, but he realized that still more could be accomplished with more sophisticated facilities. While tests were still being conducted at the Champs-de-Mars laboratory, Eiffel began to design and build a much-improved, permanent laboratory.

The Auteuil laboratory

Eiffel selected a location in Auteuil, then a suburb southwest of Paris, for his new laboratory. There he erected a substantial building with offices and a large hangar. While the hangar included some shop space for model construction and test preparation, its dominant features were two wind tunnels, one with a 1-meter (39,4-inch)-diameter test section, and a larger one with a test section measuring 2 meters (78,8 inches) in diameter. These tunnels shared a common experimental chamber, similar to the one at Champs-de-Mars, so only one could be operated at a time.

While similar in design, the smaller tunnel had a Sirocco blower, but the larger tunnel featured a multi-blade propeller fan. This propeller proved to be very efficient and most subsequent wind tunnels would incorporate one. A 37.5-kilowatt (50-horsepower) electric motor and flat belt drove each fan. A motor-generator set converted commercial alternating current into direct current that allowed operators to easily vary the fan speed.

Eiffel improved the efficiency of these tunnels in another important way as well. He understood that air velocity and its static pressure could be traded off. As air velocity increased, its static pressure decreased. Since fast-moving air experienced turbulence and frictional energy losses, he limited high velocity to the test section. He added a long diffuser between the test chamber and the blower of each tunnel that roughly doubled the tunnel's diameter at the fan. This made the fan inlet velocity approximately one-quarter of that in the

Le laboratoire d'Auteuil

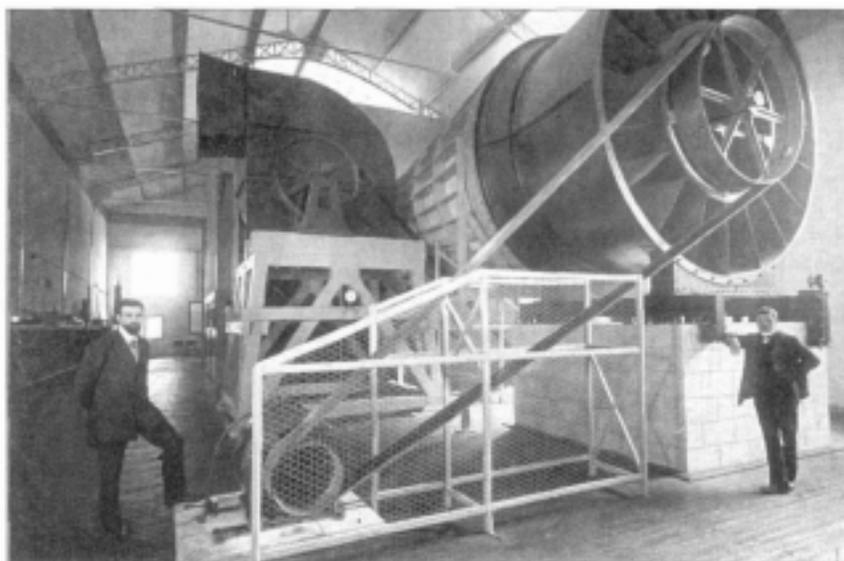
Eiffel choisit d'installer son nouveau laboratoire à Auteuil, un quartier du sud-ouest de Paris. Il y construit un grand bâtiment comprenant des bureaux et un vaste hangar. Hormis quelques ateliers pour la construction des modèles et le montage des essais, le coeur de la construction est constitué par les deux souffleries: l'une avec une veine de 1 mètre de diamètre (39,4 pouces) et l'autre, plus large, avec une veine de 2 mètres de diamètre (78,8 pouces). Elles partagent la même chambre d'expérimentation, similaire à celle du Champs-de-Mars, ce qui limite l'usage à une soufflerie à la fois.

Bien que similaires, la petite est équipée d'un ventilateur de type Sirocco, tandis que la grande est pourvue d'un ventilateur hélicoïdal aspirant. Ce dernier type de ventilateur s'avère être d'un très bon rendement et la plupart des souffleries l'utiliseront par la suite. Les ventilateurs sont actionnés par un moteur de 37,5 kilowatts (50 CV) et une courroie de transmission. Un ensemble moto-générateur permet la conversion du courant alternatif du réseau en courant continu de manière à modifier facilement la vitesse de rotation.

Eiffel améliore encore le rendement des souffleries d'une autre manière. Il comprend que la vitesse de l'air et la pression statique se compensent: l'augmentation de la vitesse provoque une diminution de la pression statique et vice-versa. Puisqu'à grandes vitesses les pertes dues à la

View inside the Auteuil laboratory showing the electric motors and blowers at the discharge ends of the tunnels.

Vue de l'intérieur du Laboratoire d'Auteuil montrant les moteurs électriques et les ventilateurs situés dans la section d'évacuation des souffleries.



test section, and the static pressure of the air correspondingly higher, both of which enhanced fan performance. As with the propeller fan, a diffuser downstream of the test section became a standard part of future wind tunnels.

Each fan discharged into the hangar, where the air moved slowly through the room until it was recaptured by the inlet cone. Each inlet cone was flared so that the entering air would not have to make abrupt, energy-absorbing changes in direction. As the air moved through the converging cone, it accelerated smoothly to test speed. Honeycomb-type flow straighteners at the test chamber wall ensured the smoothest possible flow of air across the test specimen and, thus, the best possible measurements.

As expected, these two wind tunnels outperformed their Champs-de-Mars predecessor. The 1-meter tunnel could produce a maximum speed of 40 meters (131 feet) per second, twice that in the earlier tunnel. The performance of the 2-meter tunnel was even more impressive. Its top speed of 32 meters (105 feet) per second was slower than in the 1-meter tunnel, but still 60 percent faster than the Champs-de-Mars tunnel, and the large tunnel moved three times the volume of air that went through the smaller one. In both cases, these improvements were achieved using appro-

—
Plan of the Eiffel
Laboratory
in Auteuil showing
both wind tunnels.

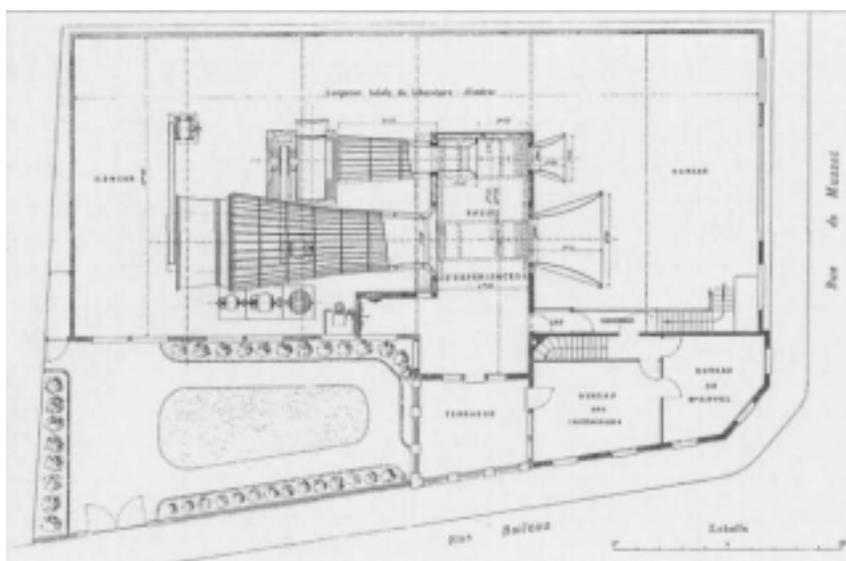
—
Plan
du Laboratoire
Eiffel d'Auteuil
montrant les deux
souffleries.

turbulence et aux frottements sont importantes, Eiffel les confine à la veine d'essais. En ajoutant un long diffuseur entre la chambre et le ventilateur il parvient à doubler le diamètre de la veine à l'entrée de chaque ventilateur. En conséquence la vitesse d'alimentation est réduite au quart de celle de la veine d'essais alors que la pression statique augmente, favorisant l'augmentation du rendement des ventilateurs.

L'air issu des ventilateurs est rejeté dans le hangar où il circule lentement jusqu'à ce qu'il soit aspiré par le convergent d'alimentation profilé de manière à diminuer les pertes d'énergie dues aux changements brusques de direction. La vitesse de l'air augmente le long du convergent et des nids d'abeille sont placés à l'entrée de la chambre pour assurer un écoulement le moins perturbé possible autour des modèles, en améliorant ainsi les résultats. Comme la soufflante à hélice, le diffuseur en sortie de veine d'essais deviendra un équipement standard des futures souffleries.

Comme Eiffel l'avait prévu, la performance de ces deux dispositifs surpasse celle du Champs-de-Mars. Dans la soufflerie d'un mètre la vitesse maximale est de 40 mètres (131 pieds) par seconde (deux fois celle de la première soufflerie). La performance de la grande soufflerie est encore plus spectaculaire. Sa vitesse maximale de 32 mètres (105 pieds) par seconde est inférieure à celle de la petite soufflerie mais toutefois supérieure de 60 pourcent à celle du Champs-de-Mars avec un débit volumique triplé. Dans les deux cas, ces améliorations du rendement ont été obtenues, grâce essentiellement aux diffuseurs, avec un gain de puissance de 25 pourcent par rapport à la soufflerie du Champs-de-Mars. Le brevet d'invention sur le diffuseur, date de 1912. Eiffel n'a jamais reçu de royalties pour l'usage du brevet, mais il demandait qu'une plaque de 1 par 0,5 m indiquant "Appareil Aérodynamique Système Eiffel, G. EIFFEL, PARIS" soit posée au-dessus de l'entrée de la chambre d'expériences.

En 1933, dix ans après le mort d'Eiffel à l'âge de 91 ans, seule la grande soufflerie était pratiquement utilisée pour conduire les essais, de sorte que la petite soufflerie est démontée pour loger une activité expérimental chaque jour plus intense. D'autres souffleries ont été construites en France et à l'étranger par la suite, et la plupart incorporent les perfectionnements introduits par Eiffel. Malgré la multiplication du nombre des souffleries,



ximately 25 percent less power than at Champs-de-Mars, thanks primarily to the diffusers. Eiffel patented his diffuser in 1912. He never asked for royalties but requested that a plaque of 1 by 0,5 meters indicating "Appareil Aérodynamique Système Eiffel, G. EIFFEL, PARIS" was posted at the entrance of the test chamber.

By 1933, ten years after Eiffel's death at age 91, the 2-meter tunnel was hosting almost all of the research at Auteuil, so the 1-meter tunnel was dismantled. This provided greater shop and set-up space for what had become a heavy research load. Other wind tunnels were built in France and throughout the industrialized world during the years that followed, most of them with features introduced by Eiffel. Even with the capabilities of these newer wind tunnels, the Auteuil tunnel remains in useful service, over 90 years after its debut, thanks in part to the installation of a new balance in 1960 and a drive upgrade in 2002. Test programs have included airplanes, buildings, and even Formula 1 racecars. Now a French National Monument, the laboratory's survival is assured.

More than wind tunnels

Eiffel is justifiably remembered for his famous bridges and other landmarks of civil engineering, but his mechanical engineering contributions to aerodynamics are seldom mentioned in today's aeronautical circles. This is unfortunate, not only because of his wind tunnel innovations, but also because of his significant contributions to aeronautical research techniques.

In addition to lift and drag measurements taken with the balance, Eiffel performed the first comprehensive studies of the pressure distribution over bodies in an air stream. While primitive pressure-distribution measurements had been made by two Danes, Johan Irminger and H. C. Vogt, in 1894, Eiffel's were extensive and detailed, and unlike Irminger and Vogt's studies, these were specifically oriented toward airplanes and flight. Eiffel opened a valuable new window of aerodynamic understanding, and pressure-distribution

celle d'Auteuil est restée en service plus de 90 ans après son inauguration, en particulier grâce à l'installation d'une nouvelle balance en 1960 et à la modernisation de la motorisation en 2002. Des avions, des bâtiments, et même des voitures de course de Formule 1 y ont été essayés. Aujourd'hui, la pérennité du Laboratoire d'Auteuil est assurée par son inscription sur la liste des monuments historiques de la France.

Plus que des souffleries

Eiffel est devenu célèbre pour ses réalisations en tant qu'ingénieur civil, mais sa contribution au domaine naissant de l'aérodynamique est rarement évoquée de nos jours, même dans les milieux aéronautiques. Ce fait est regrettable, non seulement en raison de ses innovations dans la conception des souffleries, mais aussi pour ses importantes contributions aux techniques d'expérimentation appliquées à l'aéronautique.

Hormis les mesures de la sustentation et de la résistance faites avec la balance, Eiffel a conduit les premières études systématiques de répartition des pressions produites par les écoulements sur des corps, ouvrant ainsi une nouvelle voie à la compréhension des phénomènes aérodynamiques. Bien que des mesures de pression assez rudimentaires aient été faites en 1894 par J. Irminger et H.C. Vogt, celles d'Eiffel ont été beaucoup plus détaillées et, contrairement à Irminger et Vogt, orientées plus spécifiquement vers l'étude des aéroplanes et du vol. Grâce aux mesures de la répartition des pressions sur différents types d'ailerons, Eiffel a démontré que leur sustentation dépendait plus de la réduction de la pression sur leur surface supérieure que de l'augmentation de la pression sur la surface inférieure, ce qui était âprement disputé à l'époque. Aujourd'hui, l'étude de la répartition des pressions reste l'une des utilisations les plus courantes et les plus importantes des souffleries.

En outre, Eiffel a représenté la distribution des pressions en les traçant normalement à la surface des ailes ce qui rend les diagrammes ainsi obtenus faciles à comprendre et à comparer. De plus, il a mis en évidence la corrélation directe entre la répartition des pressions et les forces de sustentation et de résistance notant que: "La mesure de ces pressions nous a donné un résultat auquel nous attachons un grand intérêt: c'est que leur

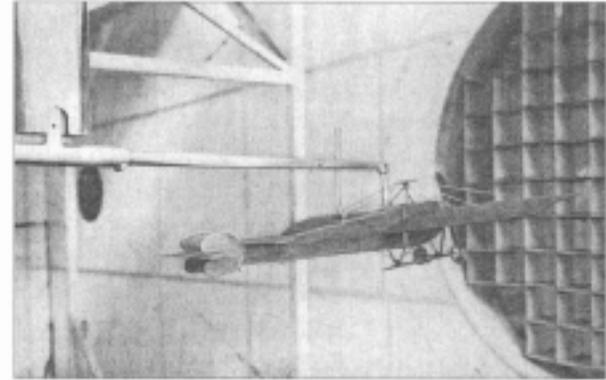
1/10 scale model
of a Nieuport
monoplane being
tested in the
Champs-de-Mars
windtunnel.

Modele en échelle
1/10 du monoplan
Nieuport pendant
des essais
à la soufflerie
du Champs-
de-Mars.

studies remain one of the most common and important uses of wind tunnels. In performing pressure-distribution tests on various airfoils, Eiffel demonstrated that more of a wing's lift came from the pressure reduction on its top surface than from the pressure increase on its lower surface, a question hotly debated at the time. He plotted the pressure distributions as contour plots, graphical representations that were easily understood and compared.

In addition, he showed a direct correlation between pressure distribution and lift and drag forces, noting, "The direct measurement of pressure has given us a result to which we attach great importance; viz., *the summation of the observed pressures was equal in every case to the reaction weighed on the balance.*" [Eiffel's italics] This was no trivial statement, and it became an important foundation stone in the long saga that would ultimately link empirical and theoretical aerodynamics. Although Eiffel was primarily an empiricist who sought understanding through experimentation, the design of his experiments coupled with such insightful analysis of the resulting data also places him solidly among the ranks of the early aeronautical theorists.

Eiffel was the first to test models of complete airplanes in his wind tunnels and show a correlation between test data and the actual performance of a full-size airplane. He understood something of scale effect, where aerodynamic coefficients change with the size of similar shapes. Because air molecules do not "scale down" in size like a model airplane, the forces measured with a model do not precisely "scale up" to those on the full-sized airplane. Even though he did not fully grasp the modern concept of dynamical similarity to account for these scale effects, he did use "augments" as he called them, to adjust model data when predicting full-size performance. He developed these augments from his experiments and concluded that, "the calculations are in each case in complete accord with the actual conditions observed in flight." Although his understanding of dynamical similarity may have been weak and this was something of an overstatement, Eiffel nevertheless pioneered the use



totalisation donne toujours la même poussée totale que la balance" (en italiques dans le texte). Ce n'est pas une remarque anodine; il s'agit d'une contribution essentielle à la longue saga qui reliera finalement l'aérodynamique théorique et expérimentale. Même si Eiffel a été principalement considéré comme un empiriste, cherchant à comprendre les phénomènes par voie expérimentale, sa manière de structurer ses essais associée à sa pénétrante analyse des données conduisent à le placer, sans aucun doute, parmi les premiers théoriciens de l'aéronautique.

Par ailleurs, Eiffel a été le premier à utiliser des modèles réduits d'aéroplanes complets dans ses souffleries et à montrer la corrélation existant entre les données expérimentales issues du modèle et la performance de l'aéroplane en vol. Il comprit l'importance des effets d'échelle, c'est-à-dire le changement des coefficients aérodynamiques suivant les dimensions des objets de forme similaire. Puisque les molécules d'air ne suivent pas la réduction d'échelle du modèle d'aéroplane, les forces mesurées sur le modèle n'augmentent pas en proportion des dimensions de l'aéroplane réel. Bien que n'ayant pas complètement saisi le concept moderne de la similitude dynamique pour expliquer les effets d'échelle, Eiffel a prédit à partir des données du modèle les caractéristiques probables de l'avion en les augmentant par des facteurs multiplicatifs de l'ordre de 10 %. Ces facteurs ont diminué au fur et à mesure que la précision des essais s'améliorait pour pratiquement disparaître. Il concluait que "Les chiffres déduits de nos essais sont d'accord avec la réalité " et " ont été confirmés par de très beaux vols réalisés récemment". Même si sa compréhension de la similitude dynamique a pu être insuffisante, Eiffel a été un fervent partisan de l'utilisation des souffleries pour les essais de modèles d'aéroplanes complets.

of wind tunnels in designing complete airplanes.

Interested in all aspects of applied aerodynamics, Eiffel also did important work on propeller aerodynamics, and he is credited with developing the term "advance ratio" to describe a propeller's basic performance parameters. Realizing that knowledge was worthless unless it could be communicated to, and understood by, others, he devised ways to make aeronautical data clear and understandable. The most significant of these was his "polar diagram" (la "polaire"), a graphical depiction that integrated all important aerodynamic characteristics into a single diagram. And finally, he must get the credit for the tests that proved the validity of relative motion.

Although two prototypes of a monoplane designed by Gustave Eiffel were produced during World War I, he is not primarily known for building airplanes, but his work in applied aerodynamics formed the basis for all subsequent developments in the field. This drop test machine and wind tunnel laboratory form a fitting memorial to one of the world's true pioneers of aviation.

James Lawrence Lee

With the contribution of Claudine Fontanon and Daniel H. Fruman

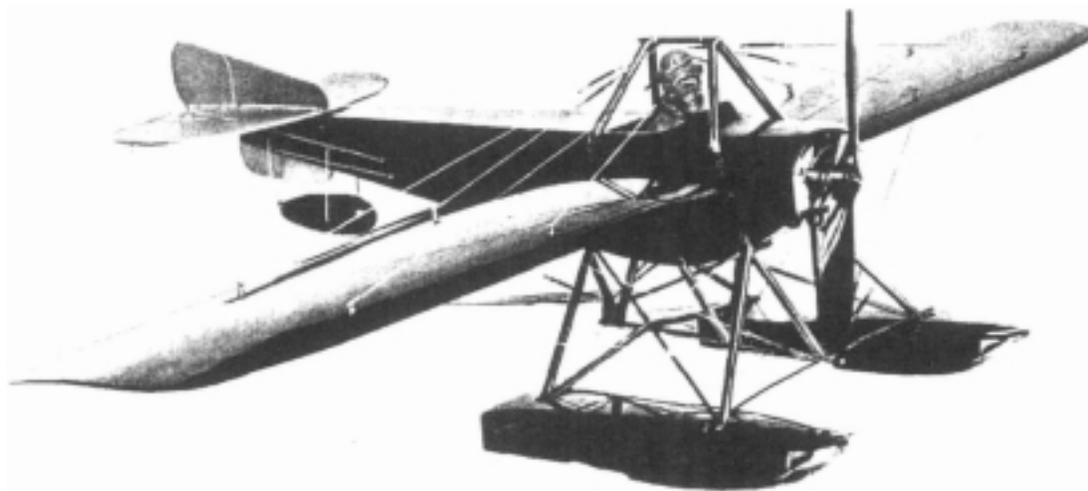
Intéressé par tous les aspects de l'aérodynamique appliquée, Eiffel a aussi contribué à l'étude de l'aérodynamique des propulseurs et est reconnu comme le créateur de la notion "d'avance" pour décrire l'un des paramètres essentiels conditionnant leurs performances. Sachant que la connaissance était de peu d'utilité si elle ne pouvait être transmise et rendue accessible aux autres, il conçoit les moyens de présenter les données aérodynamiques de manière claire et compréhensible. Ainsi, il développe le diagramme "polaire" qui intègre toutes les caractéristiques aérodynamiques importantes dans une représentation unique et synthétique. Enfin, Eiffel doit être reconnu comme le premier à avoir effectué des expériences pour valider la notion du mouvement relatif.

Gustave Eiffel n'a conçu qu'un monoplane qui a été fabriqué à deux exemplaires pendant la Première Guerre mondiale, et n'est donc pas connu comme constructeur d'aéroplanes. Mais ses travaux en aérodynamique appliquée ont établi les bases conduisant au développement ultérieur de l'aviation. L'appareil de chute et le laboratoire d'aérodynamique d'Auteuil sont le témoignage de l'immense talent de ce véritable pionnier de l'aviation.

Traduction de l'Anglais(US) par:

Faidra Papanelopoulou

Avec la collaboration de Claudine Fontanon et Daniel H. Fruman



1/5 scale model of Nieuport monoplane on floats tested in the Auteuil wind tunnel on January 14, 1913.

Modèle en échelle 1/5 du monoplane Nieuport sur flotteurs (idrovolante) essayé à la soufflerie d'Auteuil le 14 janvier 1913.

HISTORIC MECHANICAL ENGINEERING LANDMARK

EIFFEL 1903 DROP TEST MACHINE AND 1912 WIND TUNNEL

GUSTAVE EIFFEL (1832-1923) BEGAN AERODYNAMIC TESTING BY DROPPING VARIOUS BODY SHAPES ATTACHED TO A DROP TEST MACHINE GUIDED BY A VERTICAL CABLE SUSPENDED FROM THE EIFFEL TOWER. THIS MACHINE MEASURED AND RECORDED THE DRAG OF THE BODIES AND THE DROP VELOCITY. IT WAS THE MOST ADVANCED DEVICE OF ITS TYPE.

EIFFEL BUILT HIS FIRST WIND TUNNEL BESIDE THE TOWER IN 1909. BY TESTING THE SAME BODIES HE HAD DROP TESTED, EIFFEL VALIDATED THE CONCEPT OF RELATIVE MOTION.

THE 1912 WIND TUNNEL OF AUTEUIL FEATURED AN OPEN JET OF AIR WITHIN A CLOSED TEST CHAMBER AND INTRODUCED A DOWNSTREAM DIFFUSER. THIS INNOVATION, PATENTED IN 1912, IMPROVES THE EFFICIENCY OF THE "EIFFEL AERODYNAMIC SYSTEM" WHOSE FEATURES WERE EMULATED IN MANY LATER TUNNELS.

THE AUTEUIL LABORATORY IS THE MOST COMPLETE EARLY AERONAUTICAL LABORATORY IN EXISTENCE AND STILL IN OPERATION.

GUSTAVE EIFFEL (1832-1923) DÉBUTE SES ESSAIS AÉRODYNAMIQUES EN LAISSANT TOMBER DU DEUXIÈME ÉTAGE DE LA TOUR DES OBJETS DE FORMES GÉOMÉTRIQUES DIVERSES GUIDÉS PAR UN CABLE VERTICAL ET RELIÉS À UN APPAREIL QUI MESURE ET ENREGISTRE À LA FOIS LA RÉSISTANCE DE L'AIR ET LA VITESSE DE CHUTE DES OBJECTS.

L'AVIATION INCITE EIFFEL À CONSTRUIRE EN 1909 UNE PREMIÈRE SOUFFLERIE AÉRODYNAMIQUE AU PIED DE LA TOUR. IL Y TESTE AU « POINT FIXE » LES MÊMES CORPS ET VALIDE LE CONCEPT ESSENTIEL DE MOUVEMENT RELATIF.

LA DEUXIÈME SOUFFLERIE, CONSTRUITE À AUTEUIL EN 1912 SE CARACTÉRISE PAR UNE CHAMBRE D'ESSAIS FERMÉE DONNANT SUR UNE VEINE EXPÉRIMENTALE GUIDÉE À L'AVANT DANS L'ATMOSPHÈRE PAR UN DIFFUSEUR CONIQUE. CETTE INNOVATION, BREVETÉE EN 1912, AMÉLIORE LES PERFORMANCES DU « SYSTÈME AÉRODYNAMIQUE EIFFEL » ET ASSURE SON SUCCÈS AUPRÈS D'INNOMBRABLES LABORATOIRES. LA SOUFFLERIE D'AUTEUIL EST LE PLUS ANCIEN LABORATOIRE D'ESSAIS AÉRONAUTIQUES, TOUJOURS EN ÉTAT DE MARCHÉ.



2005

Further reading

Donald D. Baals and William R. Corliss, *Wind tunnels of NASA*, 1981.

Michel Carmona, *Eiffel*, 2002.

Gustave Eiffel :

- *Recherches expérimentales sur la résistance de l'air exécutées à la Tour*, 1909.
- *La résistance de l'air: examen des formules et des expériences*, 1910.
- *La résistance de l'air et l'aviation: expériences*

effectuées au Laboratoire du Champs-dr-Mars, 1911 (English translation. *The Resistance of Air and Aviation*, by Jerome C. Hunsaker, 1913).

- *Nouvelles recherches sur la résistance de l'air et l'aviation faites au Laboratoire d'Auteuil*, 1914.
- *Résumé des travaux exécutés pendant la guerre au Laboratoire aérodynamique Eiffel (1915-1918)*, sd.

Claudine Fontanon,

"La naissance de l'aérodynamique expérimentale et ses applications à l'aviation," Cahiers d'histoire et de philosophie des sciences, no 46, 1988: *"Histoire de la mécanique appliquée en France après 1880"*, 57-88.

James Lawrence Lee,

Into the Wind: A History of the American Wind Tunnel, 1896-1941, 2001.

The History And Heritage Program Of Asme

The History and Heritage Landmarks Program of ASME (the American Society Mechanical Engineers) began in 1971. To implement and achieve its goals. ASME formed a History and Heritage Committee initially composed of mechanical engineers, historians of technology and the curator of mechanical engineering at the Smithsonian Institution, Washington, D.C. The History and Heritage Committee provides a public service by examining, noting, recording and acknowledging mechanical engineering achievement of particular significance. This Committee is part of ASME Center for Public Awareness. For further information, please contact Public Awareness at ASME. Three Park Avenue, New York, NY 40016-5990. 1-212-591-8614.

Designation

Since the History and Heritage Program began in 1971, 236 landmarks have been designated as historic mechanical engineering landmarks, heritage collections or heritage sites. Each represents a progressive step in the evolution of mechanical engineering and its significance to society in general. Site designations note an event or development of clear historic importance to mechanical engineers. Collections mark the contributions of a number of objects with special significance to the historical development of mechanical engineering. The Landmarks Program illuminates our technological heritage and encourages the presentation of the physical remains of historically important works. It provides an annotated roster for engineers, students, educators, historians and travelers. It helps establish persistent reminders of where we have been and where we are going along the divergent paths of discovery. The 120,000-member ASME is a workbridge engineering society focused on technical, educational and research issues. ASME conducts one of the world's largest publishing operations, holds some 30 technical conferences and 200 professional development courses each year and sets many industrial and manufacturing standards.



ASME

Gene E. Feigel, *President*
 Nilufer Egrican, *Vice President, Region XIII*
 Shlomo Carmi, *Senior Vice President*
 Virgil R. Carter, *FAI A, Executive Director*
 Michael Michaud,
Director, International Field Office

Asme History And Heritage Committee

R. Michael Hunt,
P.E., History and Heritage Chair
 John K. Brown
 Robert Friedel
 J. Lawrence Lee, *P.E.*
 Richard I. Pawliger, *P.E.*
 Paul J. Torpey, *Past President*
 Herman Viegas, *P.E.*
 Marina Stenos, *Manager, Public Awareness*
 Wil Haywood, *Communications Coordinator*

Asme French Section

Daniel H. Fruman, *Chair*
 Bernard Gindroz, *Secretary*
 Michel M. Fillon, *Treasurer & Webmaster*
 Didier Geiger, *External Relations*
 Yves Marez, *Codes & Standards*
 Cyril Coeq, *Bulletin and Web site*
 Benyebka Bou-Said, *Bulletin*
 Vijayakumar Sahadevan, *Student Relations*

Laboratoire Aérodynamique Eiffel

Alain Maugard,
*Président du Centre Scientifique
 et Technique du Bâtiment*
 Jacques Gandemer,
Directeur du Laboratoire Aérodynamique Eiffel
 Martin Peter,
*Conservateur du Laboratoire Aérodynamique
 Eiffel*

HANGAR

13m 00

Longueur totale du la

4° 35



With the financial support of:

Avec le concours financier de :

