

Eiffel

Gustave pionnier de l'aérodynamique

par Marie-Claire Coët, Bruno Chanetz et Martin Peter

Au début du XX^e siècle, Gustave Eiffel contribue avec Ludwig Prandtl à fonder une science nouvelle, l'aérodynamique, par laquelle il va étudier les forces auxquelles l'ingénieur qu'il fut s'est confronté toute sa vie : la pesanteur et le vent.

Une vie bien remplie

ALEXANDRE GUSTAVE EIFFEL, est né à Dijon le 15 décembre 1832. En 1852, il est admis à l'École Centrale des Arts et Manufactures à Paris où il effectue ses études d'ingénieur. En 1856, il rejoint la « Compagnie des chemins de fer François Pauwels », où il débute une prestigieuse carrière d'ingénieur civil, essentiellement consacrée aux grandes constructions métalliques. Chargé de la construction du pont métallique de Bordeaux, il s'y révèle un remarquable technicien et organisateur, ainsi qu'un excellent meneur d'hommes. De sa mère, femme d'affaire entreprenante, ambitieuse et avisée, il hérite un sens aigu des affaires, qui le pousse à s'installer à son compte dès 1866. Deux années plus tard, il s'associe à Théophile Seyrig, qui vient de sortir major de l'École Centrale. Sous le second Empire, le courant saint-simonien imprègne toujours l'École Centrale, qui a pour vocation de former des entrepreneurs, un tiers des promus devenant chef d'entreprise. C'était plus des deux tiers sous le règne précédent de Louis-Philippe.

La société de construction Gustave Eiffel œuvre dans de nombreux pays. Lorsque débute le chantier de la tour, l'entreprise Eiffel possède déjà une solide réputation, acquise sur des réalisations d'envergure : les viaducs de Douro et de Garabit, la coupole de l'observatoire de Nice, la structure de la statue de la Liberté de Bartoldi... Après le triomphe de la tour pour l'exposition universelle de 1889, Gustave Eiffel est compromis dans le scandale du canal de Panama, ce qui assombrit ses dernières années d'activité et n'est pas étran-



Le laboratoire d'Auteuil est situé à Paris, au 67 rue Boileau. ©Laboratoire Eiffel.

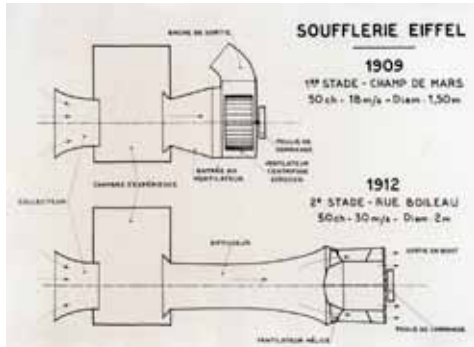
ger à sa décision de se retirer définitivement des affaires, pour se consacrer à la science.

Balbutiements et incertitudes, tel est l'état de l'aérodynamique lorsque Gustave Eiffel, alors âgé de 71 ans entreprend en 1903 ses premières recherches expérimentales sur la résistance de l'air. S'ouvrent à lui les vingt années fécondes d'une seconde carrière de savant aérodynamicien. Gustave Eiffel meurt à Paris le 27 décembre 1923 [7].

De la tour à la soufflerie

La tour a de nombreux détracteurs, principalement des artistes, à qui Gustave Eiffel veut prouver qu'elle peut avoir une utilité scientifique. À long terme, il sait aussi que c'est le seul moyen d'éviter sa démolition à l'expiration de la concession. Elle représente un formidable support pour effectuer des expériences en aérodynamique : Eiffel décide de s'en servir dans l'étude de cette science naissante.

Il conçoit donc un appareil de chute très ingénieux, qu'il installe au 2^e étage, mettant à profit les 115 mètres de hauteur de la plateforme, pour étudier la résistance des corps. Ses premières recherches, saluées par l'Académie des



Le diffuseur est une innovation d'Eiffel qui permet d'améliorer le rendement énergétique des souffleries. ©Laboratoire Eiffel.



Conçue par Antonin Lapresle, la grande soufflerie de l'Onera à Meudon est de « type Eiffel » ; son diffuseur est long de 38 m. ©Onera.



Sciences en 1908, lui permettent de jeter les bases des lois fondamentales de la résistance de l'air. A cette époque, l'aviation est à ses débuts et Eiffel avance des idées nouvelles : l'étude de l'aérodynamique doit permettre de comprendre les efforts de l'air sur un corps en mouvement relatif par rapport à celui-ci.

Pour mener à bien ses recherches, Eiffel construit ensuite le « Laboratoire du Champ de Mars » qui sera opérationnel de 1909 à 1911 [2], avec une première soufflerie destinée à l'étude de l'aérodynamique. Le principe de l'installation réside dans la mise en mouvement d'air autour de maquettes d'aéronefs, afin de mesurer les forces qui s'y exercent.

Principe d'équivalence entre mouvements relatif et réel

Les premiers essais consistent à s'assurer que le principe de simulation en soufflerie est en cohérence avec la réalité où l'aéronef se déplace dans un air, immobile en première approximation. A cette fin, il compare les ré-

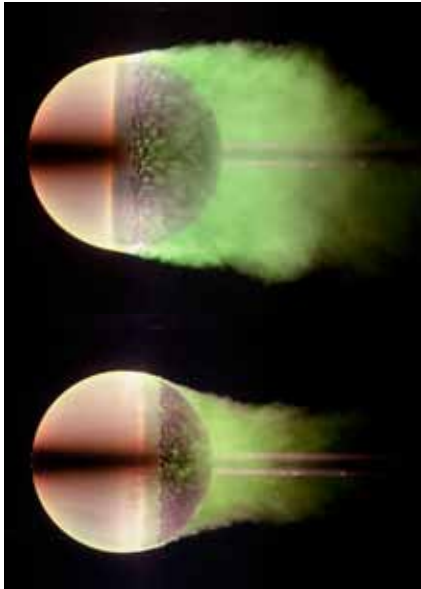
sultats de soufflerie avec ceux qu'il avait obtenus antérieurement avec l'appareil de chute. Cette confrontation étant concluante, Eiffel met sa soufflerie à disposition des pionniers de la conquête de l'air : Farman, Blériot, Voisin, Breguet, etc. Pour autant, le principe de la soufflerie ne fait pas l'unanimité : l'Institut Aérotechnique de Saint-Cyr construit un manège et Armand de Gramont, duc de Guiche adopte lui aussi la démarche inverse d'Eiffel en mesurant la distribution des pressions sur une plaque inclinée disposée sur une voiture en mouvement. Il conteste même le bien fondé des travaux d'Eiffel et ne lui reconnaît pas le droit de transposer ses résultats de laboratoire à la réalité des avions en vol. Pour trancher définitivement la question de l'équivalence entre mouvements relatif et réel – pourtant déjà résolue au milieu du 19ème siècle grâce aux expériences de Duchemin, levant le paradoxe de du Buat [3] – Eiffel fait donc appel au grand mathématicien, Henri Poincaré. Peu avant la disparition de celui-ci

en 1912, il obtient une réponse conforme à son attente : « *Il n'y a pas de raison pour que les efforts exercés sur des plaques par un courant d'air bien régulier diffèrent de ceux que subirait cette plaque en mouvement dans un air calme.* » A la réserve près sur la taille de la plaque qui doit être petite par rapport à celle du tunnel, Poincaré ajoute qu'« *il est clair que le mouvement relatif peut seul intervenir.* »

La chambre Eiffel et le diffuseur

Un programme d'urbanisme de la ville de Paris, prévoyant de récupérer le terrain sur lequel ce laboratoire est installé, contraint Eiffel à quitter le Champ de Mars. En 1912, c'est dans le quartier d'Auteuil qu'il installe donc une nouvelle soufflerie, offrant des performances accrues. Ce nouveau laboratoire est inauguré le 19 mars 1912.

L'originalité de la soufflerie d'Auteuil réside dans la présence des éléments successifs qui la constituent d'amont en aval :



Visualisations en tunnel hydrodynamique de l'écoulement autour d'une sphère en régimes laminaire (en haut) et turbulent (en bas).
© Onera.

Le cas de la sphère est révélateur de la complexité du comportement de la couche limite, qui est parfois le siège de lois antagonistes.

La couche limite laminaire génératrice d'une moindre traînée de frottement que la couche limite turbulente, décolle plus précocement, induisant un sillage induit plus perturbateur et à l'origine d'une traînée de forme plus importante que dans le cas turbulent.

C'est pourquoi en favorisant la transition vers le régime turbulent, on réduit plus la traînée de forme due au sillage qu'on augmente la traînée de frottement due au parcours turbulent plus important sur la sphère.

Le cas turbulent est donc plus favorable au bilan de traînée globale, somme de la traînée de frottement et de la traînée de forme.

Un exemple emblématique est donné par la balle de golf alvéolée afin de déclencher la transition vers le régime turbulent et repousser le décollement plus en aval. Le sillage moindre qui en résulte favorise la pénétration dans l'air et réduit la traînée globale. La portée de la balle est alors augmentée.

Les inventeurs du golf fabriquaient à l'origine des balles en cuir en mettant les coutures à l'envers afin d'avoir une face lisse jugée plus pénétrante dans l'air.

Ils découvrirent plus tard que les meilleures balles étaient les balles abimées, qui présentaient un profil rugueux. Ces rugosités déclenchent la transition et font basculer vers le régime turbulent, à l'origine d'un sillage plus discret [11].

- un collecteur ou convergent, dans lequel l'air est accéléré passant d'une section de 4 mètres de diamètre à l'amont à une section de 2 mètres de diamètre à la sortie;
- une chambre d'expérience étanche, que l'on qualifie de veine libre, alors que les souffleries de l'époque ne comprenaient qu'un tunnel, d'où l'appellation de veine guidée qui les caractérise;
- une reprise située à la sortie de la chambre d'expérience, constituée d'un petit collecteur de section plus grande que celle qui débouche dans la chambre d'expérience en fin du convergent;
- un diffuseur, tube divergent, poursuit la reprise en s'élargissant jusqu'au ventilateur;
- un ventilateur hélicoïdal de 3,80 m de diamètre pesant 8 500 kg, spécialement acquis pour la soufflerie d'Auteuil, le ventilateur de la soufflerie du Champ de Mars étant récupéré pour une petite soufflerie, alignée avec la principale, mais dont la section de sortie du collecteur est d'un mètre de diamètre seulement.

Le diffuseur est une innovation d'Eiffel, qui a fait l'objet d'un brevet, en date du 28 novembre 1911: « adjonction d'un dispositif diffuseur pour améliorer le rendement des machines à produire du courant d'air artificiel ». Cette invention est lourde de conséquence, puisqu'elle permet de diminuer drastiquement la puissance nécessaire à l'installation. L'efficacité de ce dispositif découle de la loi de Bernoulli, qui stipule que pression et vitesse varient en sens inverse. En effet le diffuseur en diminuant la vitesse a pour effet de comprimer l'air. La différence de pression de part et d'autre du ventilateur est alors très inférieure à celle qui règne lorsque le ventilateur est situé directement en aval de la chambre d'expérience. Cette disposition a pour effet de réduire la puissance nécessaire à l'extraction de l'air. « *Le diffuseur économise donc en somme les deux tiers de la puissance. L'avantage de ce système de récupération est manifeste, et c'est ce qui nous a permis de réaliser l'importante installation actuelle* » [6]. Désormais toutes les souffleries seront munies d'un diffuseur.

Les personnes qui visitent la soufflerie d'Auteuil lui donnent le nom de « Chambre Eiffel », mais par la suite, Gustave Eiffel demandera à ce que l'appellation officielle: « Appareil aérodynamique système Eiffel

Paris » soit gravée sur une plaque de 1 m x 0,5 m apposée sur toutes les installations, qui utiliseront ce procédé, sans toutefois exiger de compensations financières.

L'étude de la traînée des sphères

Au laboratoire d'Auteuil, Eiffel reprend ses activités là où il les avait laissées au Champs de Mars. Il s'intéresse à l'aérodynamique des corps dont la résistance à l'air paraissait suivre des lois particulières en fonction de la vitesse, en premier lieu la sphère. Les mesures effectuées jusqu'à présent au Champs de Mars, à des vitesses de 15 m/s laissent apparaître des valeurs du coefficient de résistance inférieures de moitié à celles trouvées pour des vitesses plus faibles par le professeur August Föppl du laboratoire de Göttingen, dirigé par le célèbre Ludwig Prandtl. Föppl n'hésita pas à écrire que les Français avait dû commettre une erreur de calcul! En reprenant à Auteuil les essais avec des sphères de différents diamètres, Eiffel découvre que pour chaque sphère, il y a deux régimes d'écoulement de l'air: l'un aux basses vitesses correspondant au coefficient trouvé à Göttingen (régime laminaire) et l'autre, aux plus fortes vitesses, correspondant au coefficient trouvé au Champs de Mars (régime turbulent), le changement de régime se faisant toujours pour la même valeur du produit vitesse x diamètre. Ainsi, l'étude expérimentale des sphères réalisée au laboratoire d'Auteuil fut la première qui mit en évidence le rôle important du « nombre de Reynolds » en aérodynamique.

Un chercheur qui communique et publie

Cette controverse, riche d'enseignements, met en lumière le rôle essentiel joué par les échanges entre chercheurs pour la progression des connaissances. C'est grâce à ces confrontations enrichissantes que la science progresse et c'était bien le but recherché par Gustave Eiffel: « *Ce sont principalement ces progrès [de l'aviation] que j'ai eus en vue en fondant ce laboratoire où les essais sont absolument gratuits, mais où, par contre, tous les résultats sont, dans l'intérêt général, portés à la connaissance de tous, soit par des comptes rendus... Soit par des communications aux Sociétés scientifiques, indépendamment des publications que les constructeurs ou inventeurs peuvent, bien entendu, faire de leur côté, à un moment quelconque.* »

C'est en ce sens que Gustave Eiffel a fait œuvre de chercheur. Il n'a pas joué à l'inventeur suspicieux et méfiant vis-à-vis d'éventuels concurrents. Il offrait à tous les constructeurs le moyen de tester leurs modèles à condition que leurs découvertes servent à tous. C'était bien l'esprit de la recherche qui soufflait au laboratoire Eiffel sous l'impulsion de ce capitaine d'industrie retiré des affaires.

Il publie « la résistance de l'air et l'aviation » un ouvrage traduit en allemand et en anglais. Son auteur rappelle [6] que les résultats obtenus ont été d'autant plus appréciés, qu'ils étaient publiés au moment où la science de l'Aviation avait le plus grand besoin de données expérimentales. Sa contribution à cette science naissante qu'est l'aérodynamique, sera reconnue aux États-Unis, qui lui décernent la médaille d'or de Langley en 1913, qui n'avait été précédemment donnée qu'à Wilbur et Orville Wright.

Ses collaborateurs Léon Rith & Antonin Lapresle

Léon Rith et Antonin Lapresle, ses deux collaborateurs, œuvrent aux côtés de Gustave Eiffel, contribuant à ses découvertes : « *Toutes ces expériences ont été faites, comme les précédentes, avec le concours dévoué de mes collaborateurs habituels, M. Rith, ingénieur des Arts et Manufactures, et M. Lapresle, ancien élève de l'École Supérieure d'Électricité. Je me félicite d'avoir, encore une fois, l'occasion de les en remercier aujourd'hui.* » [6]

Rith a eu une influence considérable pour la création de la célèbre soufflerie qui a servi de modèle à toutes celles du monde entier. Concernant les problèmes de stabilité des aéroplanes, trop complexes pour être alors résolus par l'approche mathématique, Eiffel identifie les principales variables dont dépend l'équilibre en vol horizontal stabilisé (poids de l'appareil, puissance utile du moteur, vitesse, angle d'incidence). Pour faciliter l'interprétation des résultats des essais réalisés pour le compte des constructeurs, Léon Rith met au point le mode de représentation connu sous le nom de « polaires logarithmiques » et universellement adopté pour résoudre les problèmes relatifs aux avions et aux hélices. Eiffel écrit en 1914 [6] « *J'estime cette méthode très commode et appelée à rendre d'utiles services dans l'étude des aéroplanes.* »

Quant à Antonin Lapresle, à qui Gustave Eiffel confiera ultérieurement la direction du

laboratoire, il apporte un perfectionnement important à la balance aérodynamique à trois composantes, qui permet de mesurer rapidement les efforts aérodynamiques.

Un modèle souvent reproduit

Le procédé Eiffel est reconnu et en 1914, l'Institut Aérotechnique de Saint-Cyr l'École entreprend la construction d'une soufflerie fonctionnant par aspiration et utilisant le nouveau dispositif mis au point par Gustave Eiffel. En 1929, Albert Caquot, Directeur Technique Général au Ministère de l'Air confie à Antonin Lapresle l'édification de la grande soufflerie de Meudon [4]. Ce dernier dans sa note du 14 mars 1929, émanant du Service des Recherches de l'Aéronautique - section des recherches aérodynamiques, annonce d'emblée « *Nous conservons le dispositif général des souffleries Eiffel.* ». La soufflerie de type « Eiffel » sera également copiée à l'étranger. Du vivant même d'Eiffel, de nombreuses souffleries, partout dans le monde vont être construites selon son modèle : Rome, Moscou, Stanford, Dayton, Tokyo, etc. Mais la volonté d'Eiffel ne sera pas respectée et nulle part la plaque indiquant « Appareil aérodynamique système Eiffel Paris » qu'il avait souhaitée, ne sera apposée sur ces installations !

La soufflerie d'Auteuil aujourd'hui

Un siècle après sa mise en service en 1912, le laboratoire aérodynamique de Gustave Eiffel à Auteuil est encore opérationnel. En 1921 deux ans avant sa mort, Gustave Eiffel confie sa soufflerie aux Services Techniques de l'Aéronautique (STAé), puis c'est le GIFAS* qui en reprend la gestion en 1929. La société « Aérodynamique Eiffel » est créée par M. Peter lorsqu'il rachète en 1983, la soufflerie qu'il dirigeait. Revendu en 2001 au CSTB**, ce laboratoire continue à apporter à l'industrie une contribution scientifique déterminante sur l'aérodynamique des véhicules, en aéraulique industrielle et en ingénierie du bâtiment. ■

M.C. COËT (85),
responsable IST de l'Onera

B. CHANETZ,
professeur associé à l'Université Paris-Ouest

M. PETER, conservateur
et ancien directeur de la soufflerie Eiffel



Gustave Eiffel et son collaborateur Antonin Lapresle devant le tableau de commande de la soufflerie d'Auteuil. ©Laboratoire Eiffel.

*Groupement des Industries Françaises Aéronautiques et Spatiales.

**Centre Scientifique & Technique du Bâtiment.

RÉFÉRENCES

- [1] J.-F. Belhoste « *La rencontre de deux géants : Louis Blériot et Gustave Eiffel* » Centraliens n° 597 - novembre 2009.
- [2] B. Chanetz « *1909, la soufflerie Eiffel* » La Science au Présent 2009. ISBN 978-2-85229-516-2.
- [3] B. Chanetz et M.-C. Coët « *Souffleries aérodynamiques* » Encyclopaedia Universalis - Cd-rom 10 - 2004.
- [4] M.-C. Coët et B. Chanetz « *Meudon, de l'aérostation à l'aérospatial* » La revue pour l'histoire du CNRS n° 20 - printemps 2008.
- [5] C. Fantanon « *La naissance de l'aérodynamique expérimentale et ses applications à l'aviation* » Histoire de la mécanique appliquée - ENS Éditions - 1998.
- [6] G. Eiffel « *Nouvelles recherches sur la résistance de l'air et l'aviation faites au laboratoire d'Auteuil* » H. Dunot et E. Pinat, éditeurs - 1914.
- [7] B. Marrey « *Gustave Eiffel, une entreprise exemplaire* » Histoire d'entreprise - ISBN 2-907904-00-0.
- [8] M. Peter « *La soufflerie de Gustave Eiffel* » AéroFrance n°120 - 1^{er} trimestre 2012.
- [9] M. Peter et J.-P. Cuisinier « *Eiffel, la bataille du vent* » Éditions CSTB - ISBN 978-2-86891-344-9.
- [10] Les cahiers de Science & Vie « *Gustave Eiffel - L'ascension triomphale d'un ingénieur civil* » Hors série n°35 - Octobre 1996.
- [11] B. Chanetz et M.-C. Coët - Cours de Couche Limite, 3^{ème} année, option Air-Espace École Centrale de Paris 2005-2006.