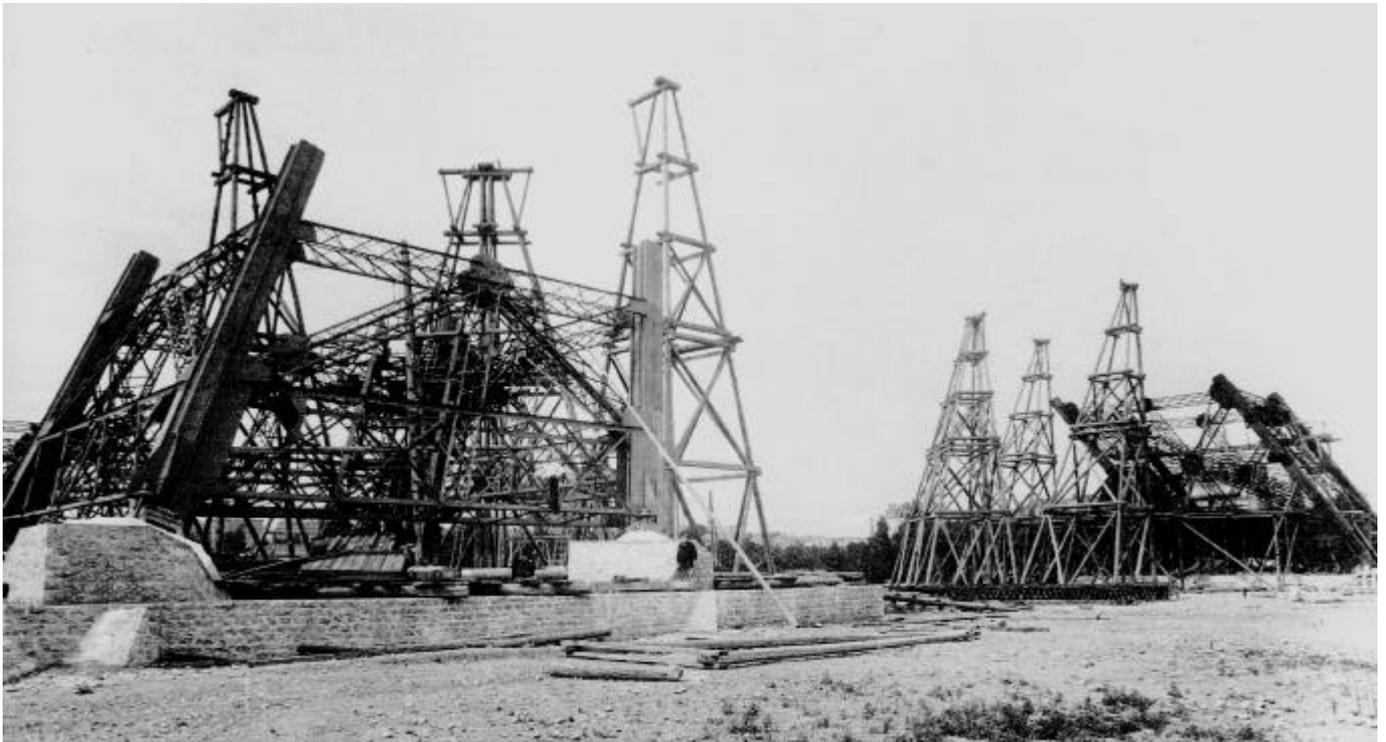


Aérodynamique : les travaux de M. Eiffel

par Gérard Hartmann



La grande tour de mille pieds de l'ingénieur Gustave Eiffel en construction sur le Champ de Mars à Paris. (La Documentation française).

L'ingénieur Gustave Eiffel

Devant un parterre choisi, l'ingénieur Gustave Eiffel donne le 27 mai 1911 une conférence à l'Aéro-Club de France [dont il est membre du comité de direction] : « *la résistance de l'air et l'aviation* », faisant suite à une conférence donnée en mars 1911 à la Société des ingénieurs civils de France [dont il a été le président]. Sa communication porte sur les résultats des travaux aérodynamiques qu'il a menés avec son équipe de 1903 à 1910.

Début 1910, il a publié un volume traitant de la résistance de l'air, des travaux menés à Paris entre 1903 et 1906 aux pieds de la grande tour portant son nom. Les communications de 1911 sont augmentées des résultats sur les tests en soufflerie des modèles (plans de formes diverses), ailes d'aéroplanes de plusieurs industriels français et hélices menés entre 1907 et 1910 aux pieds de la tour dans le laboratoire du Champ de Mars.



Gustave Eiffel à 53 ans, photographié par Nadar.

Il est accueilli à l'Aéro-Club de France par Rodolphe Soreau (1870-1935), ingénieur des chemins de fer, président de la commission d'aviation de l'Aéro-Club de France, titulaire de la chaire d'aviation au Conservatoire national des arts et métiers. M. Soreau rappelle la déjà longue carrière de M. Eiffel, 78 ans :

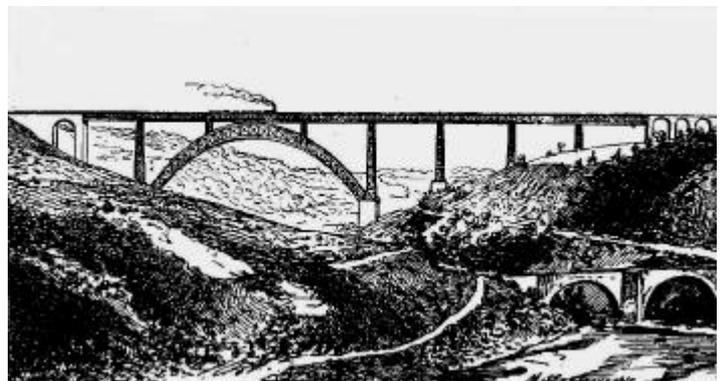
« Né à Dijon le 15 décembre 1832, Alexandre-Gustave Eiffel sort ingénieur de l'École centrale des arts et manufactures de Paris en 1855. La même année, il entre à la grande fonderie de Châtillon-sur-Seine et se consacre à l'étude des grandes constructions métalliques, objet de toute sa carrière d'ingénieur civil ».

« Nommé ingénieur aux Chemins de fer de l'Ouest en 1858, il est chargé de la direction des travaux du grand pont métallique de Bordeaux pour la fondation des piles duquel il est le premier à faire appel à la technique de l'air comprimé. Il supervise ensuite la construction des ponts de la Nive à Bayonne et ceux du réseau central de la Compagnie d'Orléans à Floirac et Capdenac, où il applique un système perfectionné de l'emploi de la presse hydraulique pour le fonnage à l'air comprimé des piles tubulaires ».

En 1867, Eiffel fonde à Levallois-Perret un établissement de constructions métalliques qui fonctionne sous sa direction jusqu'en 1890, avant d'être

transformée en société anonyme, la « Société de constructions de Levallois-Perret ». La société Eiffel réalise alors des travaux remarquables.

En 1868, elle réalise deux très grands viaducs (ceux de Neuviat et de la Sioule) sur piles métalliques pour la ligne des chemins de fer de Commeny à Gannat, puis elle réalise le viaduc de la Tarde (qui comporte une travée de 100 mètres d'ouverture), sur la ligne de chemin de fer de Montluçon à Eygurande, ceux de Cubzac sur la Dordogne, le viaduc de Garabit sur la Truyère, grâce à de nouveaux procédés de mise en place des éléments par *lançage* des ponts droits, une solution hardie expérimentée pour la première fois au monde et considérée jusque là comme irréalisable. Dans les montagnes, Eiffel utilise la méthode de développement *en porte à faux* (pont de Cubzac), ou pour les ponts en arc à grande ouverture (Garabit).



Le viaduc de Garabit : cinq piles de fer, une travée centrale de 165 mètres de portée, pour le chemin de fer de Béziers à Clermont-Ferrand, commencé en 1882 et achevé en 1885. (Nouveau Larousse illustré 1902).

Eiffel invente le procédé de construction des ponts portatifs démontables, utilisés par les militaires aux colonies, pour lequel il reçoit le prix Elphège Baude de la Société d'encouragement à l'industrie nationale.

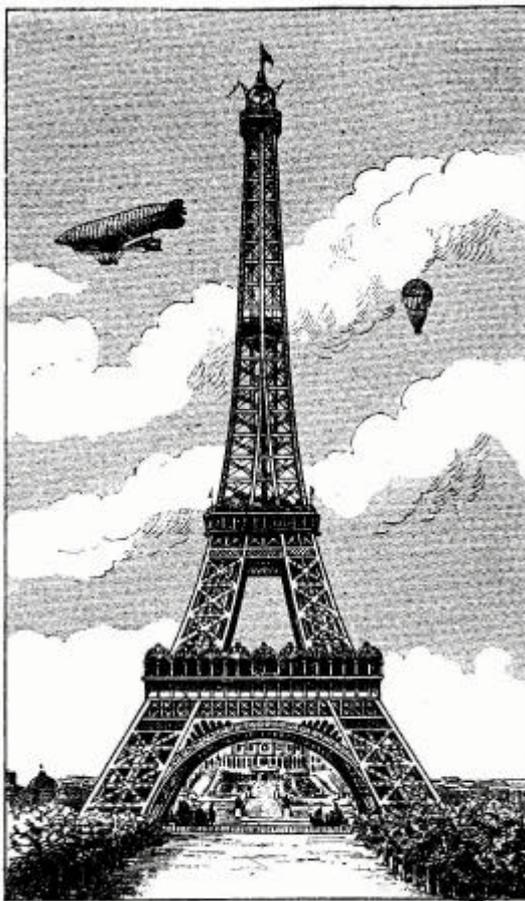


Gustave Eiffel, en 1885, photographié par Nadar.

Parmi les ouvrages d'art les plus remarquables réalisés par Eiffel, il faut citer les viaducs de la Beira Alta et du Douro au Portugal, les viaducs du Tage (ligne de Cacérés) et de Vianna toujours au Portugal, le viaduc de l'Oise sur la ligne de Mantes à Argenteuil, le viaduc des Messageries à

Saïgon, le viaduc de Tan-An et de Ben-Lue sur la ligne de Saïgon à Mytho (Cochinchine), les grands ponts en arc de Szedegin en Hongrie.

On doit citer aussi les nombreuses charpentes en fer d'églises, d'usines à gaz, de gares et de bâtiments exceptionnels, celle de l'École Monge, de l'Hôtel du Crédit lyonnais, du Musée Galliera, du magasin du Bon marché à Paris, les bâtiments de la douane à Arica au Pérou, la structure de la statue de Bartholdi *La Liberté éclairant le monde* (New-York 1886), la gare monumentale de la Staatsbahn à Budapest, la galerie du Grand palais pour l'exposition universelle de 1878, le pont sur la Seine de la Compagnie parisienne du gaz à Clichy, le barrage du Port-Mort et l'écluse de Port-Villez sur la Seine, la coupole du plus grand observatoire d'Europe, le Grand équatorial de Nice pour laquelle Eiffel reçut le prix Monthyon en 1889.



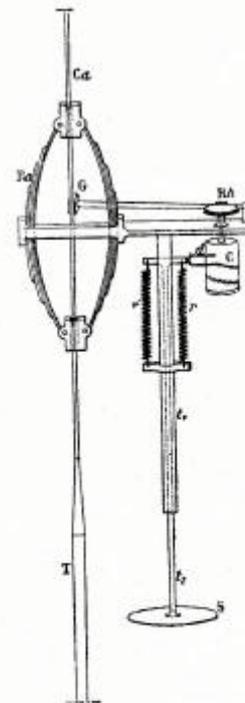
La tour Eiffel en 1910, devait être démontée en vendue. Les expériences scientifiques vont la sauver. (Larousse illustré 1910).

Quand il prend sa retraite d'ingénieur en 1890, sa société a exécuté pour 140 millions de francs-or de travaux de toute nature, installant plus de cent mille tonnes de fer, sans parler de la tour de mille pieds érigée au Champ de Mars à Paris en 1887 construite en vue de l'Exposition universelle de 1889 (centenaire de la Révolution française). Eiffel publie alors de nombreux ouvrages sur la construction des ponts, donne des conférences dans les écoles d'ingénieur à Paris, puis s'adonne à l'étude des phénomènes météorologiques.

Le laboratoire du Champ de Mars

Grâce à sa tour, Eiffel se lance à 72 ans dans l'étude expérimentale de la résistance de l'air (R). De 1898 à 1908, nombreux sont les ouvrages traitant de la résistance de l'air, mais à leur lecture l'ingénieur n'est pas satisfait : « pour la valeur primordiale de la résistance spécifique de l'air sur un plan normal [perpendiculaire] au vent, les chiffres entre Dines, Langley et Lilienthal varient du simple au double, de 1,07 à 1,13 ». Certes, la température de l'air, la pression atmosphérique influent, mais on doit pouvoir établir une mesure exacte tenant compte de ces paramètres. De même, en matière d'aviation, quand on se pose la question de savoir quelle masse soulève une aile d'aéroplane d'une surface donnée (P), « les chiffres avancés par les premières expériences en soufflerie (Wright, Ferber) varient du simple au décuple, de 4 à 40 kg/m² ». Certes, la portance dépend de la forme de l'aile (son allongement, son profil) et de sa surface (en mètres carrés), mais on doit pouvoir établir une courbe exacte permettant de trouver une bonne valeur de portance compte tenu de ces facteurs.

Eiffel et son équipe d'expérimentateurs (Léon Rith et A. Lapresle) va établir des chiffres sûrs et vérifiés expérimentalement, des données de base sur la résistance de l'air utiles aux ingénieurs des Ponts et Chaussées pour calculer la force du vent sur un ouvrage d'art, chiffres qui serviront de base aux calculs dans l'aviation. Pour se faire, il réalise deux instruments performants, un appareil de chute et une soufflerie.



L'appareil de chute, dispositif ingénieux et performant, 1903. Le modèle, placé en S tend les ressorts r et r' la résistance de l'air (R) étant enregistrée par le cylindre C sur du noir de fumée par un stylet. L'appareil est guidé sur le câble et freiné en fin de course. (L'Aérophile 15 juin 1911).

L'appareil de chute

Eiffel installe en 1903 aux pieds de la tour un laboratoire d'études aérodynamiques. Un appareil de mesure qui descend par gravité sur un câble d'acier tendu le long de la tour permet d'étudier la résistance de l'air sur des surfaces diverses (modèles), le bras portant le modèle constituant un dynamomètre, les forces étant enregistrées sur un cylindre. Des modèles de différentes surfaces (de ¼ de mètre carré à un mètre carré) sont réalisés, de formes variées (carré, rectangle, cercle, ovale) et lancés dans l'air depuis le second étage sur le câble qui mesure au total 115 mètres de long. Nulle en haut, la vitesse augmente constamment jusqu'à 40 m/s au sol, ce qui correspond aux vitesses de l'aviation (144 km/h) et aux pires conditions de vent rencontrées en France.

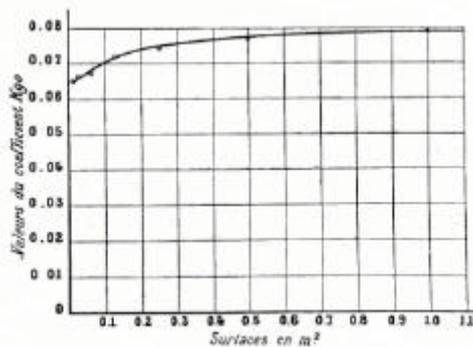


Figure 1. – Premier résultat surprenant : la résistance de l'air est plus faible sur les petites surfaces carrées que sur les grandes.

Eiffel fait de son appareil de chute la description suivante : « L'appareil portant la plaque d'essai tombait en chute libre, et guidé par un câble vertical d'une longueur de 115 mètres, en donnant des vitesses allant jusqu'à 40 mètres par seconde. Il consiste essentiellement en une masse pesante poussant la plaque devant elle, par l'intermédiaire de deux ressorts tarés. Leur action est antagoniste de la résistance de l'air, de sorte que le déplacement, par rapport au reste de l'appareil, de la partie mobile portant la surface permet d'évaluer la tension des ressorts, d'où l'on déduit la résistance elle-même ».

« Dans ce but, un diapason faisant 100 vibrations par seconde, mis en mouvement au début de la chute et solidaire de la partie mobile, est muni d'un stylet qui peut se déplacer le long d'une génératrice d'un cylindre vertical porté par le bâti de l'appareil. Ce cylindre, couvert d'un papier noirci à la fumée, tourne avec une vitesse proportionnelle à la vitesse de chute, grâce à un galet muni de fines dentelures qui roule le long du câble sur lequel il est énergiquement pressé. En même temps, les vibrations du diapason inscrivent sur le cylindre le temps écoulé depuis l'origine de la chute. Comme d'autre part les abscisses sont proportionnelles aux espaces parcourus dans la chute, le diagramme fournit, par une seule et même courbe et à un moment quelconque de la chute, les trois quantités qui nous intéressent : la force, par la mesure des ordonnées représentant la tension des ressorts, l'espace parcouru, par la lecture des abscisses et enfin le temps, par le comptage des vibrations, d'où l'on déduit à chaque instant la vitesse et la résistance ».

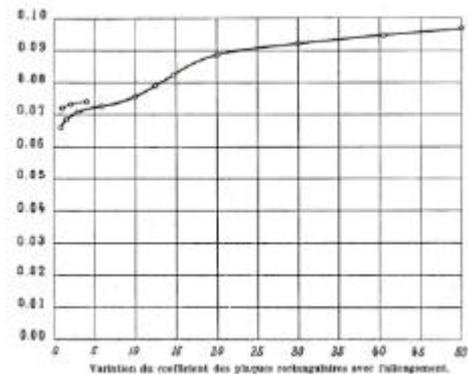


Figure 2. – Second résultat surprenant : à surface égale, la résistance à l'air est d'autant plus grande que l'allongement de l'aile est grand.

R étant la résistance de l'air, V la vitesse, S la surface du modèle, K est un coefficient, proportionnel à la densité de l'air, dépendant de la forme du modèle, croissant avec S et est indépendant de V, selon la formule :

$$R = K S V^2$$

Ce coefficient K est la résistance unitaire, c'est-à-dire la résistance, exprimée en kilogrammes, qu'éprouve, par mètre carré de surface, un corps solide se déplaçant avec une vitesse de un mètre par seconde dans l'air de densité moyenne (15°C et 760 mm de mercure). Si la valeur de K est 0,08, ceci veut dire que le corps éprouve de la part de l'air une résistance de 80 grammes par mètre carré. Eiffel établit que pour des surfaces frappées normalement par le vent (perpendiculairement) ayant une surface de 1 m², K vaut de 0,066 à 0,079 (figures 1 et 2).

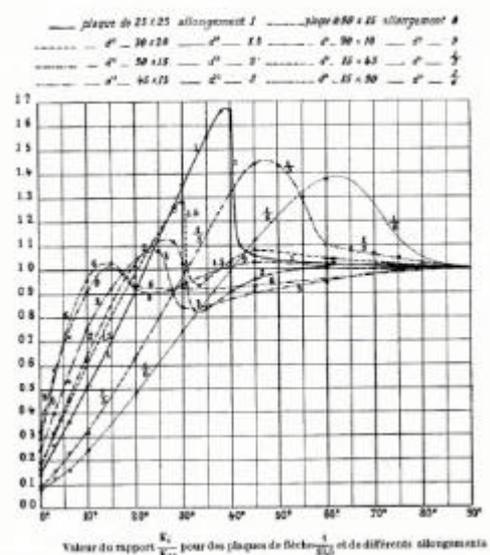


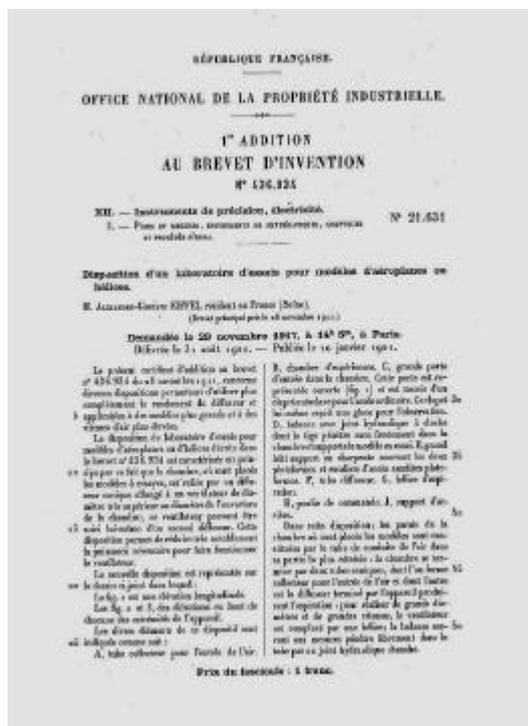
Figure 3. – Par ces graphes étudiant des rapports entre allongement et traînée sur des surfaces inclinées, Eiffel fournit des résultats d'une très grande précision.

Les ailes en flèche sont testées après les ailes droites. Les modèles sont calés sur le support avec différents angles, correspondant à l'incidence d'une

aille d'aéroplane. Les résultats des expériences donnent lieu à des graphes qui sont publiés en 1907 à Paris dans un ouvrage fondamental *Recherches expérimentales sur la résistance de l'air exécutées à la Tour Eiffel*. Ces graphes sont proches des résultats obtenus au *National Physical Laboratory* de Teddington par le physicien anglais Stanton et collent avec les résultats obtenus dans les souffleries privées par les Wright, Ferber, Blériot et Tissandier. Mais, pour certains, c'est une énorme surprise : les expériences démontrent exactement le contraire de ce que chacun pense intuitivement.

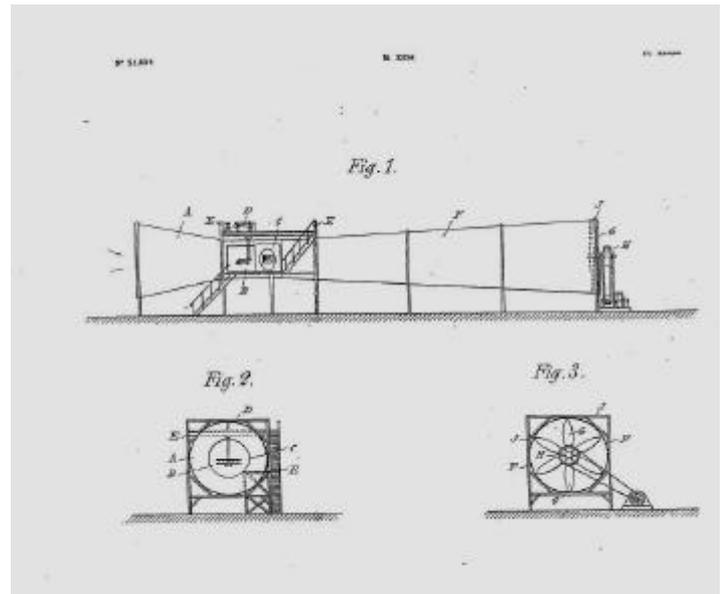
La soufflerie Eiffel

Pour les besoins de l'aviation et l'étude des ailes (profils en creux), il faut un appareil de plus grande précision. Eiffel fait alors construire une soufflerie, dans laquelle on peut tester des modèles d'aile, des modèles d'aéroplane, ou des hélices. Ce dispositif fera l'objet d'un dépôt tardif de brevet (n° 436 934) le 29 novembre 1917 à Paris.



Brevet Eiffel n° 436 934 du 29 novembre 1917. (Office européen des brevets).

Eiffel décrit ainsi cette installation et les très surprenants résultats obtenus : « Un ventilateur aspirant d'une puissance de 70 chevaux fait passer dans une chambre d'expériences parfaitement close une colonne d'air ayant un diamètre de 1,50 mètre et une vitesse de 5 à 20 mètres par seconde, sans qu'il en résulte aucun remous dans cette chambre. La surface essayée, placée dans ce courant, est reliée à une balance spéciale qui donne l'effort en grandeur, direction et point d'application. La vitesse est mesurée à l'aide d'un tube Pitot relié à un manomètre très sensible. En outre, on détermine la répartition des pressions aux différents points de la surface en perçant celle-ci de trous très fins que l'on fait communiquer avec un manomètre très sensible ».

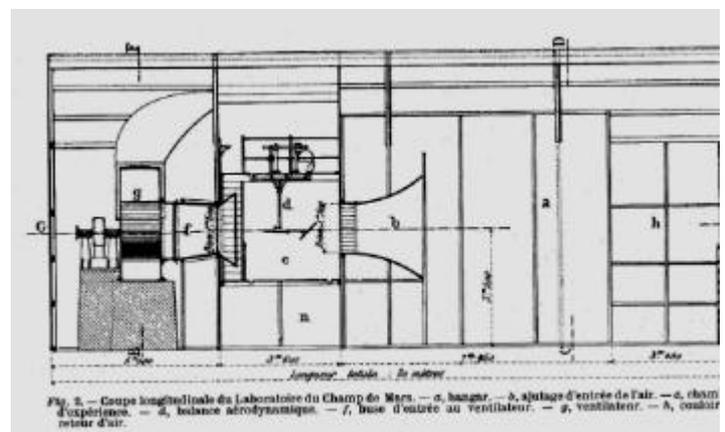


Brevet Eiffel n° 436 934 du 29 novembre 1917. (Office européen des brevets).

« Il faut observer que ces deux méthodes d'enregistrement des forces, l'une par la balance, l'autre par les pressions, se complètent et se vérifient l'une par l'autre, la somme des pressions élémentaires devant toujours être celle donnée par la balance. J'ai eu la grande satisfaction de le vérifier dans toutes les occasions ».

« Suivant mon programme qui était de recommencer d'abord les principales expériences relatives à la résistance de l'air, je me suis préoccupé d'établir, en me dégageant de toute hypothèse [incertitude] et par la méthode purement expérimentale, les différentes valeurs du coefficient K avec des modèles de forme simple ».

Plans carrés perpendiculaires au vent. « Le coefficient K des plans carrés normaux au vent (figure 1) croît de 0,065 pour les modèles de 10 x 10 cm jusqu'à 0,08 pour les plaques de 1 m² expérimentées avec l'appareil de chute. L'allure de la courbe montre que cette dernière valeur ne doit [peut] pas être dépassée ; elle a été en effet retrouvée par M. Stanton pour des plans carrés allant jusqu'à 9 m² ».



Soufflerie Eiffel du laboratoire aérodynamique du Champ de Mars, 1909. (L'Aérophile 15 juin 1911).

Poussées sur les carrés et rectangles inclinés. « En remplaçant la surface carrée par un rectangle de plus en plus allongé, K augmente notablement et son accroissement est encore assez rapide quand le rapport du grand côté au petit côté atteint 50. C'est ce que montre la figure 2. Avec des surfaces de 225 cm^2 , cette augmentation est de 10 % quand on passe du carré au modèle d'allongement 6 [valeur moyenne de l'allongement des ailes d'aéroplanes en 1908] et s'élève à 47 % quand on passe du carré à l'allongement 50 ».

« La poussée sur les carrés et rectangles inclinés de quelques degrés fournit des chiffres très intéressants (figure 3). Les modèles expérimentés avaient un côté perpendiculaire au vent [bord d'attaque] et le rapport de ce côté avec l'autre dimension [corde] variait de 16 % à 900 %. Le graphique 3 donne le rapport K_i/K_{90} entre l'effort unitaire sur une plaque inclinée de i° sur le vent et l'effort unitaire sur la même plaque normale [90°] au vent. Dans les limites où j'ai opéré (allongement de $1/6$ à 9), la variation de la grandeur de la surface paraît sans influence sur ce rapport »

« Avec une plaque carrée, la poussée, après avoir augmenté linéairement jusqu'à 35° , atteint un maximum qui dépasse de près de 45% la poussée sur la plaque normale. Elle décroît ensuite brusquement, et à partir de 50° , elle est pratiquement constante jusqu'à 90° »

« J'ai vérifié directement la valeur paradoxale du maximum de cette poussée à l'aide d'un appareil simple, où deux plaques reliées entre elles, et mobiles autour d'un axe vertical, s'équilibraient mutuellement ».

« Une seconde vérification a été faite par la somme des poussées élémentaires déterminées par des mesures manométriques. Cette dernière méthode a permis de mesurer séparément l'effet de la pression à l'avant et de la dépression à l'arrière, dont la somme représente la poussée totale ; aux environs de 38° d'angle, la pression en avant est

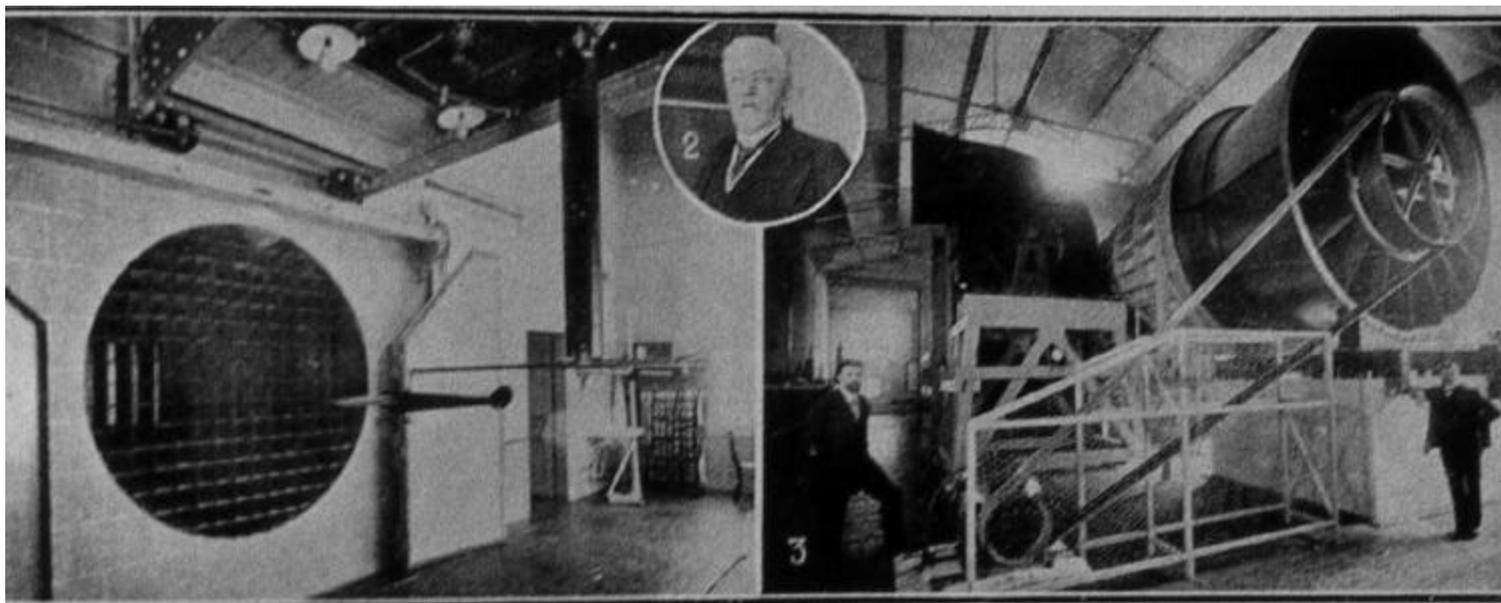
deux fois plus faible que sur la plaque normale, mais la dépression à l'arrière est en revanche trois fois plus forte, ce qui rend compte de la grande augmentation de la poussée totale ».

« Les courbes des formes plus allongées ont une allure analogue, avec des inflexions qui vont en s'atténuant d'une façon nettement progressive ; pour l'allongement 9, toute inflexion semble avoir disparu ».

Poussées sur les plaques courbes de différents allongements. « Sur des modèles aux formes courbes de différents allongements, les effets et variations sont analogues à ceux des plaques planes, mais exagérés ».

Centres de poussées. « Le centre de poussée, c'est-à-dire le point d'application de la résultante des pressions a aussi fait l'objet de recherches nouvelles. Il a été déterminé soit par la balance, soit par le procédé simple de la mise en équilibre de la plaque dans le vent autour d'une série d'axes de rotation verticaux ; quand la plaque, saisie par deux pointes, oscille dans le vent autour d'un axe vertical, on note l'angle d'équilibre et à ce moment la résultante passe nécessairement par l'axe de rotation ».

Les diagrammes des figures 4 et 5 page suivante montrent les positions des centres de poussée pour les deux séries de plaques planes et courbes. Les effets sont tout à fait inverses. Sur les plaques planes, le centre de poussée part du milieu de la plaque et s'avance peu à peu du bord d'attaque jusqu'au quart de la corde. Sur les plaques courbes, j'ai constaté que cette progression vers le bord d'attaque se fait d'abord assez lentement, puis brusquement à partir d'un angle variable avec l'allongement, pour rétrograder rapidement jusqu'au bord de fuite. Il y a là un passage délicat pour la stabilité des aéroplanes qui a dû être la cause de bien des accidents ».



Victime des crues de la Seine, le laboratoire aérodynamique Eiffel du Champ de Mars est démonté et remonté à Auteuil rue Boileau pendant l'automne 1911. Il fonctionnera pour toute l'industrie aéronautique française de 1912 à 1992, puis le GIFAS le cédera en 2002 au Centre scientifique et technique du bâtiment. (L'Aérophile 1911).

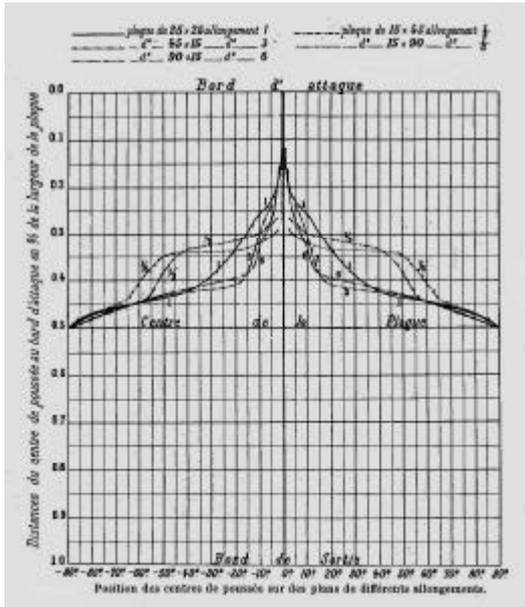


Figure 4 – position des centres de poussée sur des plans rectangulaires de différents allongements.

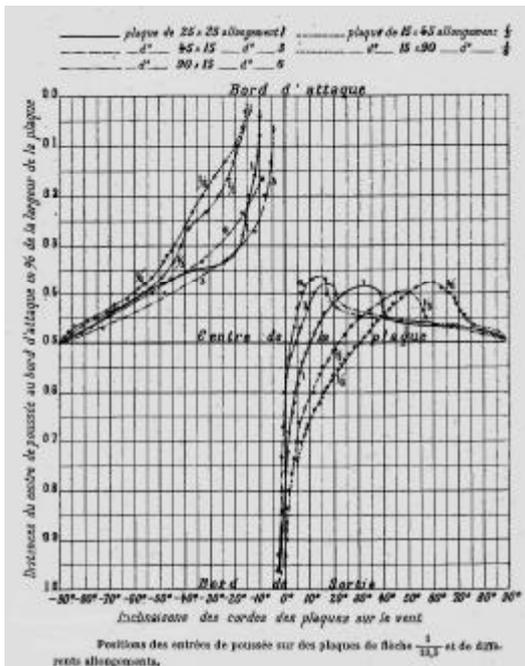


Figure 5 – position des centres de poussée sur des plans arrondis de différents allongements.

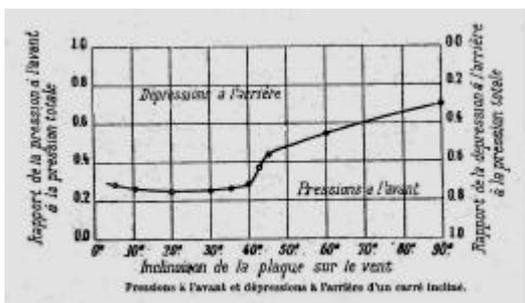


Figure 6 – pressions exercées à l'avant et à l'arrière d'une aile carrée, selon l'angle d'incidence.

Etudes des ailes

La méthode Eiffel est maintenant (en 1908) tout à fait au point et toutes les formes de surface formant des ailes sont testées systématiquement, donnant lieu à des diagrammes sophistiqués. Eiffel et ses collaborateurs testent les ailes droites, les ailes arrondies, les ailes en flèche, notant leurs spécificités aérodynamiques, leur portance et leur traînée avec un profil droit et en creux, des extrémités arrondies ou carrées, des ailes à simple courbure, à double courbure, les combinaisons de plans (ailes superposées ou en tandem), notant chacune de leurs caractéristiques aérodynamiques pour une surface et une forme donnée.

Après quoi, ils s'attaquent aux corps ronds, cylindriques, coniques, sphériques, aux fils (cordes à piano) qui entrent dans la composition d'un aéroplane et engendrent des effets aérodynamiques dont le résultat n'est ni connu ni prévisible (calculable).

« Pour des cylindres de différentes longueurs et d'axes parallèles au vent, le coefficient de résistance K passe par un minimum quand la longueur est comprise entre quatre et cinq rayons de la base ; le coefficient est alors les trois quarts de celui d'un disque de même rayon. Quand les cylindres ont leur axe perpendiculaire au vent, comme les montants des biplans, le coefficient K augmente en même temps que l'allongement. Avec des hauteurs de 4 et de 33 diamètres, il est respectivement égal aux 55 et aux 60 centièmes du coefficient du rectangle circonscrit. Cette réduction ne se produit pas dans la résistance d'un fil de 3 mm très allongé, dont le coefficient est en effet à peu près le même que celui du rectangle de même largeur, soit 0,063 ; cette valeur trouve son application dans les tendeurs d'aéroplanes et dans les fils télégraphiques ».

« Les coefficients des cônes exposés la pointe en avant et fermés à la base sont réduits par rapport à celui du disque égal à cette base de 50 % pour le cône à angle de 60° au sommet et de 30 % pour le cône à angle de 30° au sommet. Pour les sphères et pour les demi sphères concaves et convexes, nous avons trouvé que, en considérant que la résistance du disque de même diamètre vaut 100, la résistance de la sphère est égale à 17, celle de la demi sphère convexe à 32 et celle de la demi sphère concave à 126. »

« Sur un cône ayant 20 degrés d'angle au sommet et fermé à l'arrière par une demi sphère, la résistance est à peu près celle d'une sphère quand la pointe est en avant. Elle est réduite de moitié quand la pointe est en arrière, c'est-à-dire quand le corps présente une forme ichthyoïde ; elle est alors seulement le douzième environ de ce qu'elle serait sur le maître couple du corps ».

« Pour un cylindre très allongé (14 rayons) et terminé par deux demi sphères, le coefficient applicable aux cylindres à bases plates est réduit des quatre cinquièmes ; il n'est plus alors que le cinquième ou le sixième du coefficient du maître couple ».

A la fin de l'année 1909, Eiffel a « testé » dans sa soufflerie du Champ de Mars dix-neuf types d'ailes existants sous forme de modèles réduits d'ailes d'aéroplanes, ceux des Wright, Voisin, Maurice Farman, Breguet et Blériot, des profils aussi nés de l'imagination d'aérodynamiciens : les ingénieurs Ernould, Drzewiecki, et sept profils types définis géométriquement (tableau).

N°	Type d'aile	i	K_x	K_y	K_i	K_x/K_y	$?$	$? - i$	d
1	Rectangle plan de 90 x 15 cm	5,5 °	0,0039	0,025	0,026	0,15	8,9 °	3,4 °	26%
2	A courbure circulaire de flèche 1/27	2,0 °	0,0012	0,021	0,021	0,08	4,7 °	2,7 °	41%
3	A courbure circulaire de flèche 1/13,5	3,0 °	0,0038	0,042	0,042	0,09	5,4 °	2,4 °	47%
4	A courbure circulaire de flèche 1/7	6,0 °	0,0096	0,070	0,072	0,14	7,9 °	1,9 °	46%
5	Aile courbe à l'avant et plane à l'arrière	5,0 °	0,0040	0,044	0,044	0,09	5,3 °	0,3 °	45%
6	Aile plane à l'avant et courbe à l'arrière	1,5 °	0,0035	0,037	0,037	0,09	5,4 °	3,9 °	55%
7	Aile plane en dessous et circulaire au-dessus	1,5 °	0,0012	0,017	0,017	0,07	4,1 °	2,6 °	51%
8	Aile en forme de croissant	2,0 °	0,0031	0,035	0,035	0,09	5,2 °	3,2 °	51%
9	En aile d'oiseau	5,5 °	0,0073	0,057	0,058	0,13	7,3 °	1,8 °	51%
10	Analogue à l'aile Wright	2,0 °	0,0028	0,029	0,029	0,10	5,6 °	3,6 °	48%
11	Analogue à l'aile Voisin	2,0 °	0,0015	0,021	0,021	0,07	4,1 °	2,1 °	64%
12	Analogue à l'aile Maurice Farman	2,0 °	0,0019	0,016	0,016	0,06	3,7 °	1,7 °	36%
13	Analogue à l'aile du Blériot XI	4,0 °	0,0039	0,035	0,035	0,11	6,3 °	2,3 °	29%
13b	Aile du Blériot XIbis	4,0 °	0,0023	0,031	0,031	0,07	4,3 °	0,3 °	25%
14	Analogue à l'aile Breguet	4,0 °	0,0028	0,040	0,040	0,07	4,4 °	0,4 °	25%
15	Proposée par M. Ernoul	6,0 °	0,0015	0,013	0,013	0,11	6,8 °	0,8 °	25%
16	Proposée par M. Drzewicki	4,0 °	0,0020	0,024	0,024	0,08	4,7 °	0,7 °	25%
17	Proposée par M. Drzewicki	4,0 °	0,0021	0,026	0,026	0,08	4,5 °	0,5 °	25%
18	Proposée par M. Drzewicki	0 °	0,0020	0,011	0,011	0,18	10,2 °	10,2 °	25%

Dans ce tableau, l'angle d'incidence i est celui qui correspond au minimum de $K_x/K_y = \text{Tang } ?$, $?$ étant l'angle correspondant de la résultante et de la verticale.

K_x est la composante horizontale unitaire, qui, multipliée par SV^2 donne la résistance à l'avancement.

K_y est la composante verticale unitaire, qui, multipliée par SV^2 donne la force de sustentation de l'aile (souvent appelée poussée).

K_i est l'effort total unitaire, qui, multiplié par SV^2 , donne la résistance totale de l'aile (traînée).

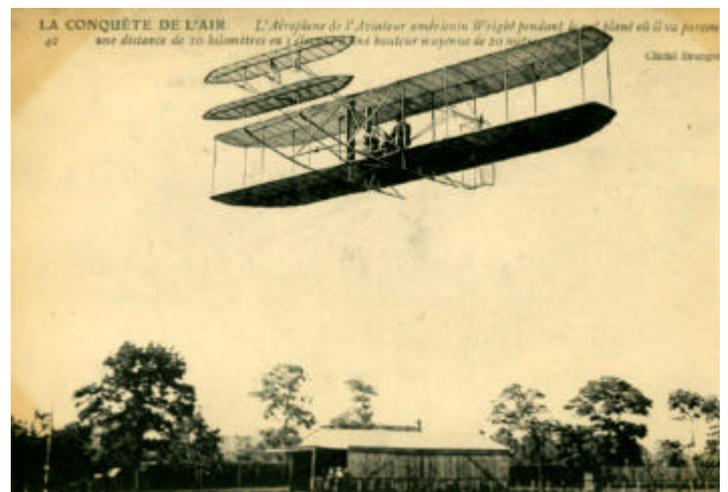
Le rapport K_x/K_y exprime le rapport entre la résistance à l'avancement et la sustentation (portance).

$? - i$ est l'angle de la résultante avec la normale à la corde ; quand cet angle est positif, la résultante est en arrière de la normale.

d est la distance du centre de poussée au bord d'attaque, exprimée en pourcentage de la largeur.

Etude de l'aile Wright. « De l'aile n° 10 qui reproduit à échelle réduite le type Wright 1908 nous avons tiré plusieurs diagrammes. Le premier (figure 7 page 9) montre les valeurs des efforts unitaires verticaux K_x , horizontaux K_y et totaux K_i en fonction de l'angle d'incidence i de l'aile dans le flux d'air pour des angles allant de 0 à 16 degrés. Ces valeurs, multipliées par SV^2 donnent l'effort total sur la voilure, la force de sustentation (portée) et la résistance à l'avancement (traînée). Sur l'aile Wright, ce n'est qu'à -3 degrés que la sustentation s'annule. De 2 à 8 degrés, les résistances K_x , K_y et K_i sont sensiblement proportionnelles aux variations de l'incidence ».

« Il faut remarquer sur ce diagramme (figure 7) que la tangente D' dans cette région est très différente de D , tangente à l'origine, et qu'il n'est pas légitime d'admettre dans les formules la proportionnalité à partir de l'angle pour lequel la sustentation est nulle, ce que l'on fait, à tort selon moi, assez généralement ».



« Très important dans la pratique sur un aéroplane, le rapport K_x/K_y fait l'objet d'un second diagramme d'étude (figure 8). En appelant θ l'angle formé avec la verticale, on obtient $\tan \theta = K_x/K_y$. Ces deux valeurs sont données sur une échelle double. On voit que cette courbe passe par un minimum aux environs de 2 degrés d'angle, qu'elle augmente peu rapidement jusqu'à 8 ou 9 degrés. Les angles compris dans cet intervalle sont donc les plus intéressants pour le vol, puisqu'ils correspondent au minimum de résistance à l'avancement pour une sustentation donnée. Aux petits angles d'incidence de l'aile, la résultante est inclinée en arrière de la normale à la corde (car $\theta > i$) ; à partir de 6 degrés, elle est inclinée en avant (car $\theta < i$). Enfin, vers 18 degrés, elle devient normale (perpendiculaire) ».

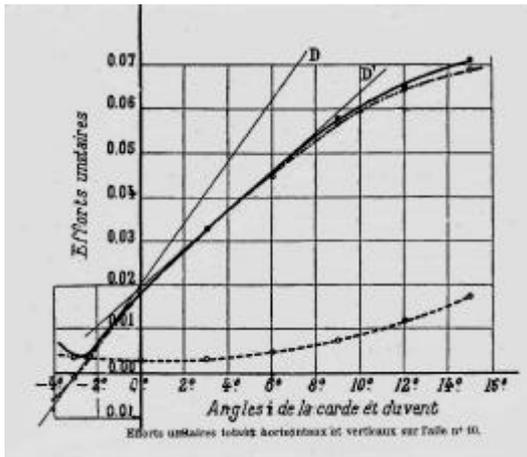


Figure 7 – efforts aérodynamiques horizontaux et verticaux sur l'aile n° 10 (Wright).

« La polaire (figure 9) résume ces données à propos de l'aile Wright, que nous avons comparé au tracé correspondant à l'aile de flèche 1/13,5 (courbe en pointillés). Jusqu'à $K_y=0,05$, l'aile Wright équivaut à peu près à l'aile circulaire ; au-delà, pour un même effort de sustentation, l'aile circulaire présente moins de résistance à l'avancement et est par conséquent plus avantageuse ».

« Enfin, un dernier diagramme (figure 10) montre la répartition des pressions dans la section médiane de l'aile pour l'inclinaison de 6 degrés. Ces pressions sont mesurées à une vitesse de 10 mètres par seconde et exprimées en millimètres d'eau ou en kilogramme par mètre carré. Leur répartition, qui, pour les petits angles est assez uniforme dans le sens de l'envergure est au contraire très variable suivant la profondeur. Près du bord d'attaque, la pression sur le dessous de l'aile est de 2,5 kg/m² et la dépression sur la face dorsale atteint 11 kg/m². Pour une vitesse élevée de 30 m/s, qui peut être réalisée par un aéroplane, la pression sur ce bord arrive donc au chiffre considérable de 121 kg/m², chiffre, qui, très probablement, dépasse de beaucoup ce que pouvaient supposer les constructeurs. Cette remarque s'applique à presque toutes les ailes que nous avons étudiées. La pression est au contraire très faible du côté du bord de sortie où elle n'atteint pas 2 kg/m² à la vitesse de 10 m/s, ou 18 kg/m² à la vitesse élevée de 30 m/s ».

« La dépression moyenne sur le dos de l'aile est environ 3,2 kg/m² pour la vitesse de 10 m/s ; la pression moyenne sur la face inférieure est de 1,7 kg/m². On peut dire que l'aile est deux fois plus aspirée sur

l'extrados qu'elle n'est poussée sur sa face inférieure. Cette considération entraîne la nécessité de fixer solidement l'étoffe supérieure de l'aile sur l'armature, ce qui ne se faisait pas toujours et qui est devenu, au contraire, depuis mes recherches, d'un usage général ».

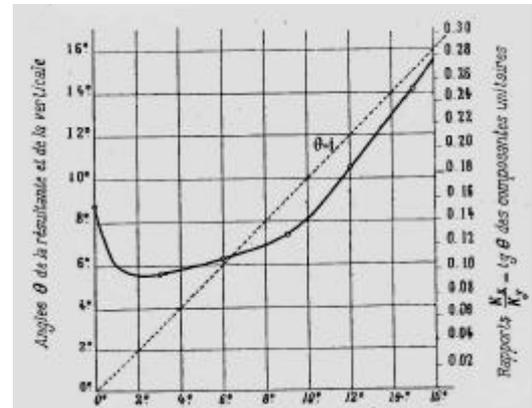


Figure 8 – Variations selon l'incidence du rapport K_x/K_y et de l'angle θ pour l'aile Wright.

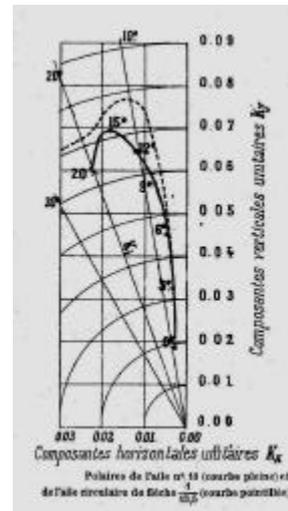


Figure 9 – Polaires de l'aile 10 (courbe pleine) et de l'aile circulaire de flèche 1/13,5 (en pointillés).

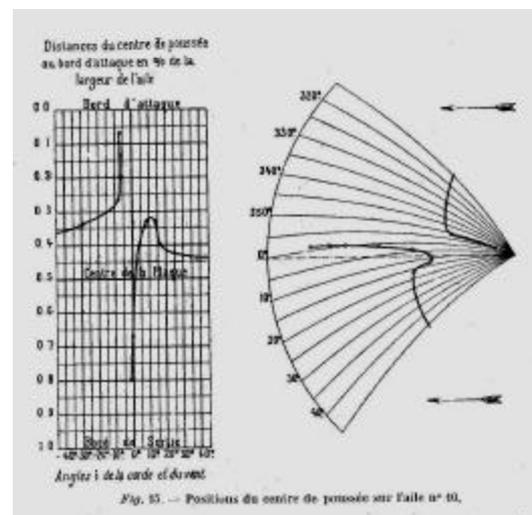
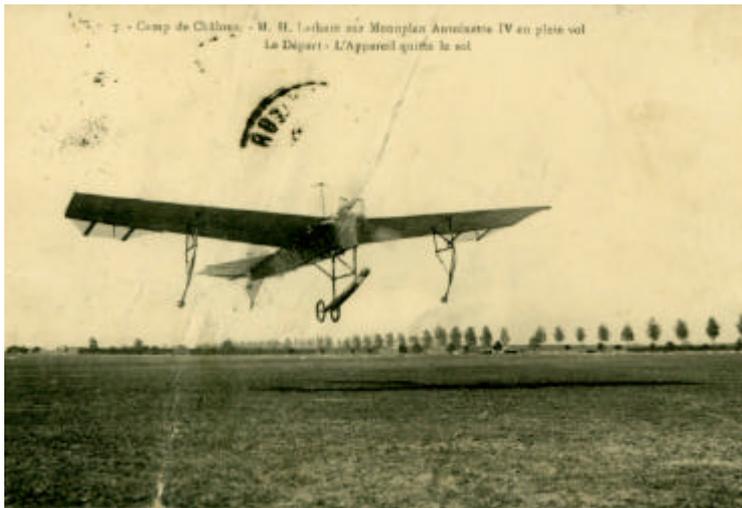


Figure 10 – Etude des positions du centre de poussée sur l'aile Wright.

Etudes de modèles d'aéroplanes

En outre, le laboratoire Eiffel teste des modèles d'aéroplanes au dixième, les monoplans de Robert Esnault-Pelterie (type 1908), l'*Antoinette* (1909) et d'Edouard Nieuport (type 1910). Les recherches portent, suivant les différentes inclinaisons des machines dans le flux d'air, sur les efforts aérodynamiques et les forces qui s'exercent sur l'ensemble de la machine et sur l'aile seule, de manière à connaître l'influence du fuselage, de l'hélice et des plans de queue, à déterminer la résistance nuisible (traînée) due au moteur, aux agrès, à l'hélice, aux passagers, etc.



« Dans l'aéroplane Esnault-Pelterie, cette résistance est identique à celle qu'aurait un plan normal au vent de $3,0 \text{ m}^2$ (donc assez élevée) et de seulement $0,66 \text{ m}^2$ sur le Nieuport. Dans tous les cas que nous avons examinés, nos calculs se sont trouvés d'accord avec les renseignements que nous ont fournis les constructeurs, qui portaient sur les poids des appareils, sur les vitesses et les angles d'incidence pendant le vol. Il en résulte cette considération très importante, au point de vue de la construction d'un aéroplane, que l'essai d'un modèle par notre procédé ou par un procédé analogue [il existe d'autres souffleries : Chalais-Meudon, Saint-Cyr] permet de connaître à l'avance si un vol est possible par la machine ».

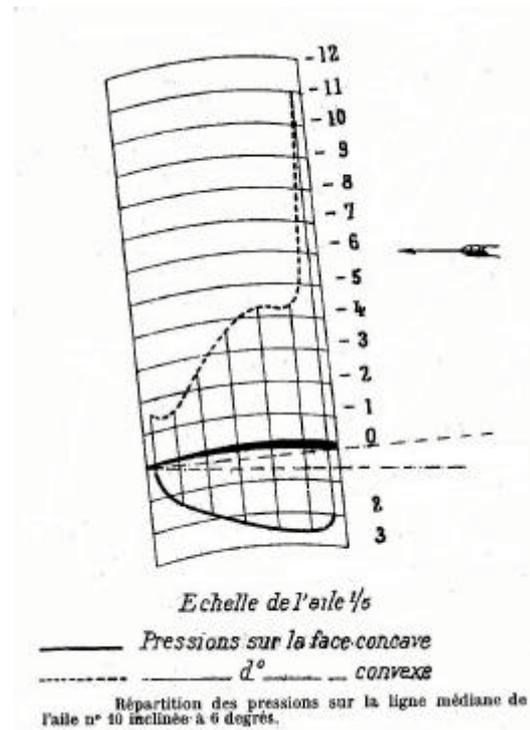


Figure 11 – Etude des pressions aérodynamiques sur l'aile Wright inclinée positivement de 6 degrés.

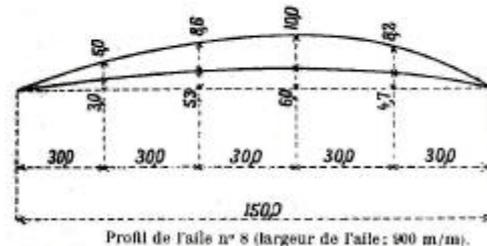


Figure 12 – Etude du profil en creux de l'aile n° 8.

Etude des hélices

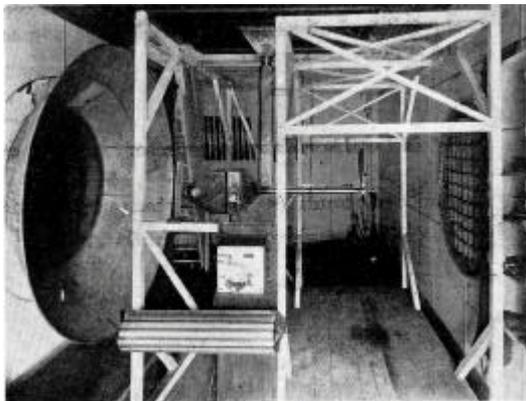
Après les recherches menées empiriquement si non scientifiquement par Ernest Archdeacon en 1905, une question se pose sur leur étude : celle des diamètre, pas, vitesse de rotation optimum.

« Nous nous sommes proposés de l'étudier en utilisant le courant d'air très régulier dont nous disposons : il suffit de faire tourner une hélice dans ce courant, avec une vitesse connue, pour déduire de la mesure de la poussée et de couple résistant tous les éléments de fonctionnement de cette hélice ».

« A cet effet, nous avons disposé dans l'axe du courant l'appareil de mesure suivant : l'hélice à tester, dont le diamètre peut aller jusqu'à un mètre, est fixée à l'extrémité d'un arbre parallèle au vent et directement relié à l'induit d'une dynamo de 2 chevaux ; cette dynamo est protégée de l'action de l'air par un carénage approprié. L'ensemble de l'appareil, l'hélice, l'arbre et la dynamo, est suspendu à des points fixes par des fils métalliques, de façon que la poussée de l'hélice tend à le tirer en avant dans le veine d'air ; l'appareil ne peut avancer, il est em-

pêché par une tige horizontale que le relie à la tige verticale de la balance. La traction exercée sur la tige est égale à la poussée de l'hélice, et on la mesure à la balance, de la même manière que la poussée du vent sur une plaque ».

« D'autre part, les fils métalliques qui portent cet ensemble lui sont réunis par l'intermédiaire de deux couteaux parallèles à son axe, et situés à un niveau un peu supérieur à celui de son centre de gravité ; il en résulte qu'il est incliné par le couple exercé par l'air sur l'hélice, d'un angle qui permet de mesurer ce couple. On connaît cet angle par une tige fixée à la dynamo et qui se déplace devant une échelle courbe ; le tarage de cette hélice a été fait en substituant au couple exercé par l'air une série de poids suspendus à une distance bien connue de l'axe des couteaux. On lit ainsi directement le couple. Enfin, le nombre de tours est donné par un indicateur de vitesse instantanée (tachymètre), soigneusement taré et souvent vérifié, qui est fixé à la dynamo elle-même ».



Laboratoire aérodynamique Eiffel : dispositif de test des hélices. (L'Aérophile).

« En résumé, on détermine la poussée de l'hélice par la balance, le couple par la lecture de l'échelle, et la vitesse de rotation par la lecture de l'indicateur. Le tube de Pitot donne par ailleurs la vitesse du courant d'air. Ces quatre mesures se font simultanément. On donne au courant d'air une série de vitesses comprises entre 5 et 18 m/s et pour chacune d'elles, on fait tourner la dynamo à des nombres de tours par minute compris entre 400 et 1600 ».

En résultat, Eiffel et son équipe dès 1909 produisent des graphes qui donnent la poussée, le couple résistant, les plages utiles de puissance, le rendement, tout ceci en fonction de la vitesse de rotation de l'hélice et du courant d'air. Ayant vite détecté l'importance de la vitesse de rotation de l'hélice, une courbe est réalisée pour chaque vitesse.

Responsable du Laboratoire de recherche de l'aéronautique militaire à Chalais-Meudon, le capitaine Emile Dorand qui étudie les hélices depuis 1906, est sollicité par Eiffel pour fournir les hélices essayées et étalonnées par l'armée.

Comme le souligne Eiffel dans ses communications « les expériences faites avec ces modèles nous ont fourni, sur nos diagrammes, des courbes très différentes de celles expérimentées à Chalais-Meudon ».

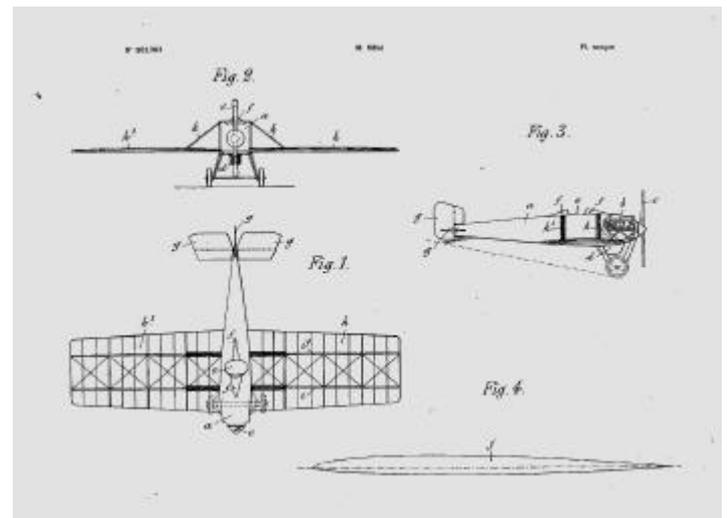
Simultanément, Eiffel sollicite les fabricants d'hélice parisiens pour obtenir des modèles réduits de leur produits et les étalonner. De fait, dès ces premiers contacts (été 1909), les fabricants d'hélice font des progrès ahurissants.

Conclusion de M. Eiffel

« Les expériences de laboratoire peuvent être faites en tout temps et varier de toute manière au gré de l'expérimentateur. Les résultats permettent de substituer, dans la construction de l'aéroplane, l'art de l'ingénieur au flair du constructeur qui, en cas d'études nouvelles, peut amener à des trouvailles heureuses, mais exposer aussi à bien des mécomptes ».



Brevet 503 363 du 16 mai 1917 pour un avion de chasse à grande vitesse. (Office européen des brevets).



Brevet Eiffel n° 503 363 du 16 mai 1917 pour un avion de chasse à grande vitesse. La machine ne connut pas le succès. Le « flair du constructeur » (son savoir faire) est aussi important que les études aérodynamiques. (Office européen des brevets).