



**HAL**  
open science

## Les moyens expérimentaux en aérodynamique du XVIIIe au XXe siècle

Thierry M. Faure

► **To cite this version:**

Thierry M. Faure. Les moyens expérimentaux en aérodynamique du XVIIIe au XXe siècle. 2016, <https://leblogsouslescocardes.wordpress.com/>. hal-01311001

**HAL Id: hal-01311001**

**<https://hal.science/hal-01311001>**

Submitted on 3 May 2016

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Les moyens expérimentaux en aérodynamique du XVIII<sup>e</sup> au XX<sup>e</sup> siècle

Thierry M. FAURE

Maître de Conférences (HDR), Centre de Recherche de l'Armée de l'air (CReA), École de l'Air, 13 661,  
Salon Air, France

Mardi 3 mai 2016

---

Le développement de l'aéronautique est fortement lié à la compréhension du mécanisme de création de la portance par une aile, phénomène physique permettant la sustentation d'un objet en mouvement dans l'air. Cependant, il est difficile de reproduire les conditions du vol lorsque l'on ne dispose pas de machines pouvant voler. Même lorsque l'aéronautique a permis la réalisation de tels engins, il reste essentiel de disposer d'installations expérimentales permettant de reproduire facilement des conditions de vol dans un environnement de laboratoire. Pour cela, différents dispositifs ont été imaginés au cours de l'histoire.

## **I. Le bras tournant**

Le premier moyen expérimental réalisé pour reproduire le mouvement d'un objet dans l'air fut le bras tournant, à l'extrémité duquel était fixé l'objet de l'étude. La rotation du dispositif autour d'un arbre permettait d'entraîner cet objet, avec une vitesse d'autant plus grande que la longueur du bras était importante. Ce dispositif fut inventé par le Britannique Benjamin Robins (1707-1751), afin de mesurer la

résistance de l'air sur un projectile balistique (Figure 1). L'arbre de rotation était mis en mouvement par le déroulement d'une courroie attachée à une masse en chute libre. Une balance pouvait être placée le long de l'axe de rotation pour mesurer la force exercée par l'air sur l'objet.

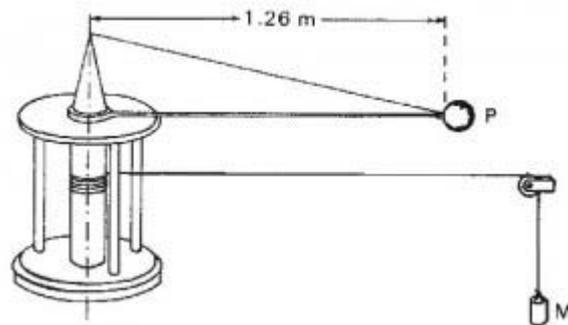


Figure 1 : Bras tournant de B. Robins pour mesurer la traînée d'un projectile balistique.

Ce dispositif, relativement simple à réaliser, devint la référence pour les premières mesures d'aérodynamique tout au long du XIX<sup>e</sup> siècle. George Cayley (Figure 2) [1] fut le premier à l'utiliser dès 1804 dans le but de mesurer les forces aérodynamiques s'exerçant sur une aile (Figure 3) [2].



Figure 2 : George Cayley (1773-1857).

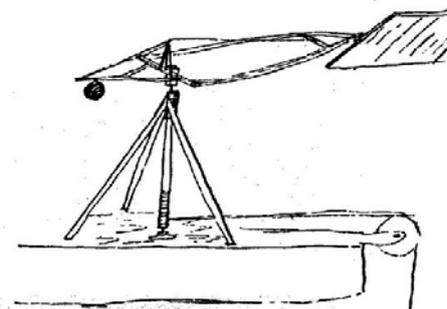


Figure 3 : Bras tournant pour la mesure de forces aérodynamiques sur une aile, version de 1804 [2].

En 1888, l'Allemand Otto Lilienthal (Figure 4) réalisa dans son jardin un bras tournant de 23 mètres de diamètre et de 4,5 mètres de hauteur (Figure 5) [3]. Les essais effectués comprenaient des plaques planes, placées à différentes incidences par rapport au plan de rotation du bras tournant, ainsi que des profils d'ailes cambrés, dont il démontra la supériorité par rapport aux profils plats. Ce résultat l'incita à

utiliser des formes d'ailes cambrées pour ses essais de vols planés. L'ensemble des mesures collectées constitua la première base de données publiée [4] qui fut utilisée dans la communauté scientifique des aérodynamiciens. Les bras tournants furent encore largement employés, notamment par Samuel P. Langley (1834-1906), qui fut, en 1891, le premier à déterminer la valeur correcte du coefficient de Smeaton, utilisé à l'époque dans la définition des coefficients aérodynamiques [5].



Figure 4 : Otto Lilienthal (1848-1896).



Figure 5 : Bras tournant d'Otto Lilienthal (1888).

## II. L'appareil de chute libre

Un autre dispositif permettant de mesurer la force aérodynamique sur un corps en mouvement consiste à faire tomber ce corps d'une grande hauteur. Un tel dispositif de chute libre fut développé en 1903 par Gustave Eiffel (Figure 6) qui mit à profit sa tour métallique construite en 1889. Un câble, tendu entre le deuxième étage et le sol, servait de guide à un dispositif sur lequel était monté le corps à tester (Figure 7). Ce dispositif comportait également une balance pour mesurer la force de traînée exercée, et cette balance était asservie à un diapason faisant 100 vibrations par seconde et muni d'un stylet, pour

enregistrer la variation de cette force au cours de la chute. Ce système permit à Eiffel d'obtenir ses premiers résultats expérimentaux d'aérodynamique.



Figure 6 : Gustave Eiffel (1832-1923).

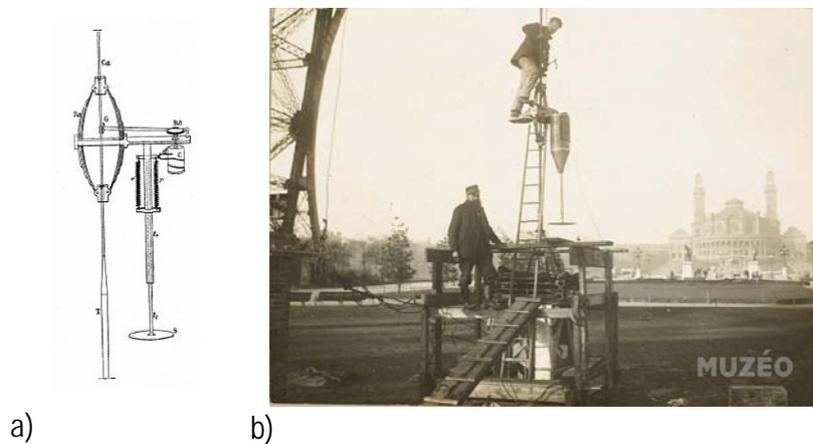


Figure 7 : Appareil de chute libre de G. Eiffel : a) schéma du dispositif pour mesurer la traînée d'un disque perpendiculaire à la direction de la chute, b) photographie du montage expérimental au pied de la tour Eiffel, avec en arrière plan le Palais du Trocadéro [Muzéo].

### III. La soufflerie

Le principe de la soufflerie pour l'étude d'un objet en mouvement, consiste à se placer dans un repère relatif. En effet, un corps en mouvement dans un fluide au repos est équivalent, pour un observateur attaché à ce corps, à un fluide en mouvement autour d'un corps fixe. Ce principe est le fondement des études réalisées en soufflerie. L'avantage principal de cette installation, par rapport aux précédentes, est que l'expérience n'est pas limitée par un temps de chute (de la masse qui entraîne l'arbre de rotation du bras tournant ou de l'appareil de chute libre). Par ailleurs, il est beaucoup plus facile d'installer des instruments dans une soufflerie et de visualiser l'expérience.

La première soufflerie fut réalisée en 1871 à Greenwich par Francis Wenham (Figure 8). Elle était simplement constituée d'une conduite de trois mètres de longueur et de section carrée de 45

centimètres de côté. L'écoulement d'air était créé par un moteur à vapeur entraînant une hélice. La veine d'essai, où étaient placés les corps à tester, était située en sortie de la conduite, ce qui classe cette installation dans la catégorie des souffleries à veine ouverte. Wenham mesura les forces aérodynamiques exercées sur des plaques planes pour des angles d'incidence compris entre 15° et 60°. Les mesures obtenues pour des valeurs plus petites de l'angle d'incidence étaient trop faibles pour être correctement mesurées par sa balance. L'écoulement créé par cette installation était très instable et cette soufflerie beaucoup trop rudimentaire pour apporter une amélioration par rapport aux bras tournants utilisés jusqu'alors.



Figure 8 : Francis Herbert Wenham (1824-1908).

Ce type d'installation expérimentale fut néanmoins repris et amélioré par Horatio Phillips (Figure 9). Sa soufflerie comprenait une veine d'essai de 1,8 mètre de longueur et de section carrée de 43 centimètres de côté (Figure 10). Elle utilisait un système d'injection de vapeur pour créer une aspiration en aval de la veine d'essai permettant une admission de l'air au repos pris en entrée de la veine. Ce système produisait à cet endroit un écoulement beaucoup plus stable que sur l'installation de Wenham. Il faudra attendre 1928 pour qu'un dispositif similaire d'injection par air comprimé, soit à nouveau utilisé sur une soufflerie, au Langley Memorial Aeronautical Laboratory, cette fois-ci pour obtenir un écoulement supersonique. Phillips testa différentes formes de profils d'aile dans sa soufflerie, mettant en évidence l'importance des profils à double cambrure, c'est-à-dire avec une cambrure plus importante sur le dessus qu'au dessous. Il déposa des brevets pour ces formes qui furent les premiers profils aéronautiques référencés (Figure 11). Une douzaine d'essais de profils d'ailes aéronautiques en soufflerie furent réalisés à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, notamment par Hiram Maxim (1890-1916) pour la réalisation de sa gigantesque machine volante de 3600 kilogrammes et de 31 mètres d'envergure, qui réussit à se soulever de ses rails en 1894.



Figure 9 : Horatio Frederick Phillips (1845-1926).

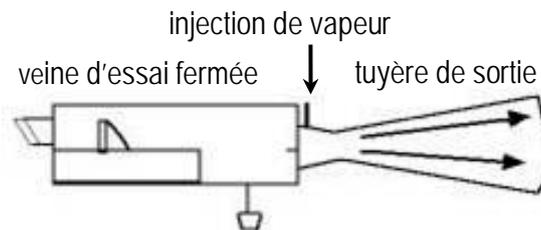


Figure 10 : Schéma de la soufflerie à circuit ouvert de H. Phillips.

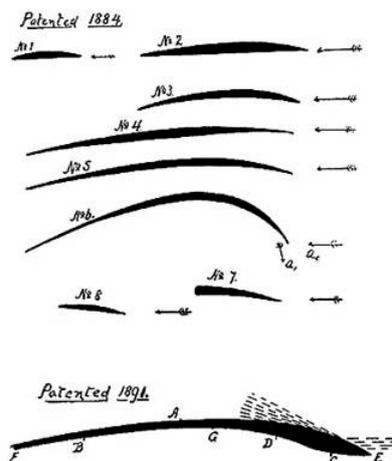


Figure 11 : Profils d'ailes cambrés brevetés par H. Phillips (1884 et 1891).

Après avoir testé deux planeurs construits en se fondant sur les mesures d'Otto Lilienthal, Wilbur et Orville Wright (Figure 12) arrivèrent à la conclusion que ces résultats expérimentaux étaient erronés. Cette analyse venait du fait qu'ils employaient la fausse valeur du coefficient de Smeaton dans le calcul des forces aérodynamiques [5]. En effet, Lilienthal divisa chaque force mesurée par celle obtenue pour  $90^\circ$  (cas de référence de Smeaton), ce qui eut pour effet de supprimer l'influence de l'erreur sur le coefficient de Smeaton. Wilbur et Orville Wright décidèrent donc de réaliser leurs propres essais à l'aide d'une soufflerie, qu'ils construisirent en 1901 (Figure 13). Elle était constituée d'une conduite de 1,8 mètre de section carrée de 40 centimètres de côté avec une fenêtre en verre pour permettre d'observer les essais. L'hélice, qui créait l'écoulement, était entraînée par un moteur à explosion de un cheval-

vapeur et la vitesse maximum dans la veine d'essai était de 13,5 mètres par seconde. Ils développèrent également des balances pour mesurer directement les coefficients de portance et de traînée. Cette soufflerie leur permit de tester plus de deux cents types d'ailes d'envergures et cambrures différentes, ainsi que différentes configurations (ailes monoplan, en tandem, biplan, triplan, ...). L'ensemble de ces résultats originaux contribua à la réussite du premier vol piloté le 17 décembre 1903.



Figure 12 : Wilbur (1867-1912) et Orville Wright (1871-1948).

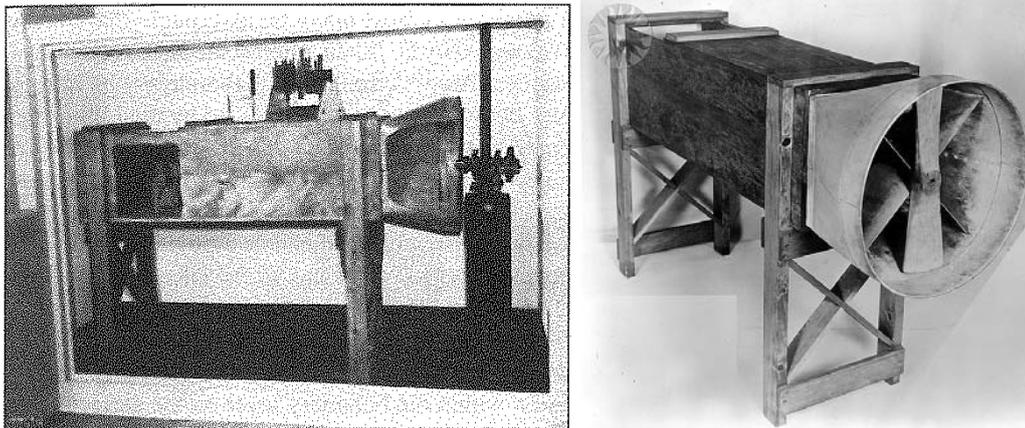


Figure 13 : Soufflerie à circuit ouvert de Wilbur et Orville Wright (1901).

Après des essais expérimentaux d'aérodynamique obtenus par chute libre du deuxième étage de la tour qu'il avait édifiée sur le Champ de Mars à Paris, Gustave Eiffel fit construire à cet endroit une soufflerie en 1909 (Figure 14). Elle était constituée d'une veine d'essais de 3 mètres de diamètre sur une longueur de 2,5 mètres [6]. L'écoulement, engendré par une hélice entraînée par un moteur de 70 chevaux-vapeur, pouvait varier entre 5 et 20 mètres par seconde. L'installation était enfermée dans un hangar de 240 mètres carrés pour ne pas subir l'influence du vent extérieur. Outre ses dimensions, l'originalité de cette installation réside dans sa conception. En effet, il s'agit d'une soufflerie aspirante, l'hélice, produisant l'écoulement, étant située en aval de la veine d'essai, ce qui évite la convection des perturbations des sillages des pales dans la zone d'étude. Déplacée du Champ de Mars à Auteuil en 1912, cette installation servit, notamment, aux essais des profils d'ailes Eiffel qui équiperont un grand nombre d'avions français de la Première Guerre Mondiale. Elle est toujours en activité aujourd'hui.

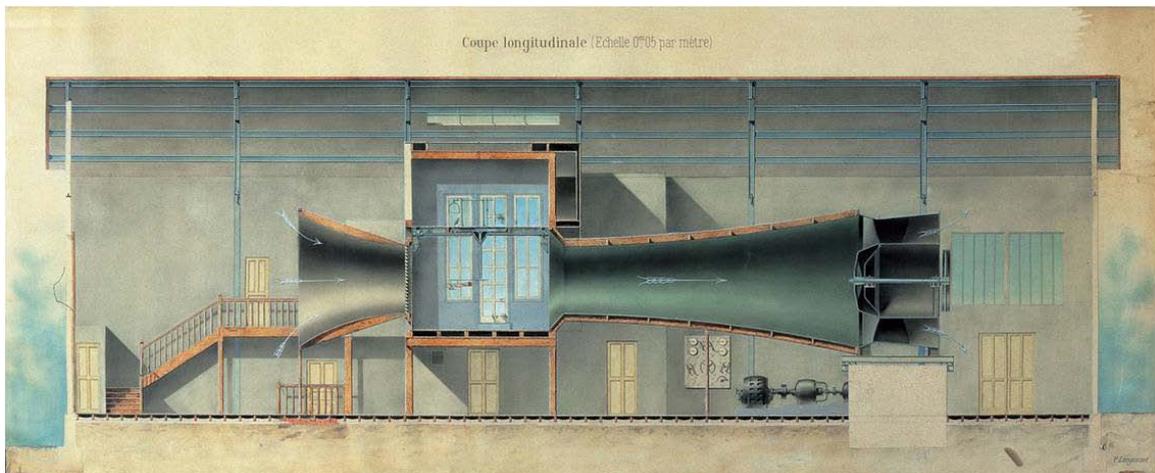


Figure 14 : Soufflerie à circuit ouvert de Gustave Eiffel (1909).

Les souffleries à retour furent créées en Allemagne par Ludwig Prandtl (Figure 15) à partir de 1908. Après une première installation de section d'essai carrée de deux mètres de côté, une seconde soufflerie fut construite en 1916 (Figure 16). Sa section d'essai carrée était de 2,2 mètres de côté, son hélice était entraînée par un moteur d'une puissance de 300 chevaux-vapeur et permettait de faire varier la vitesse de l'écoulement entre 2 et 50 mètres par seconde [7]. Ce nouveau type de soufflerie permit d'augmenter l'efficacité du moteur et d'obtenir une plus grande homogénéité de l'écoulement dans la veine d'essai.



Figure 15 : Ludwig Prandtl (1875-1953).

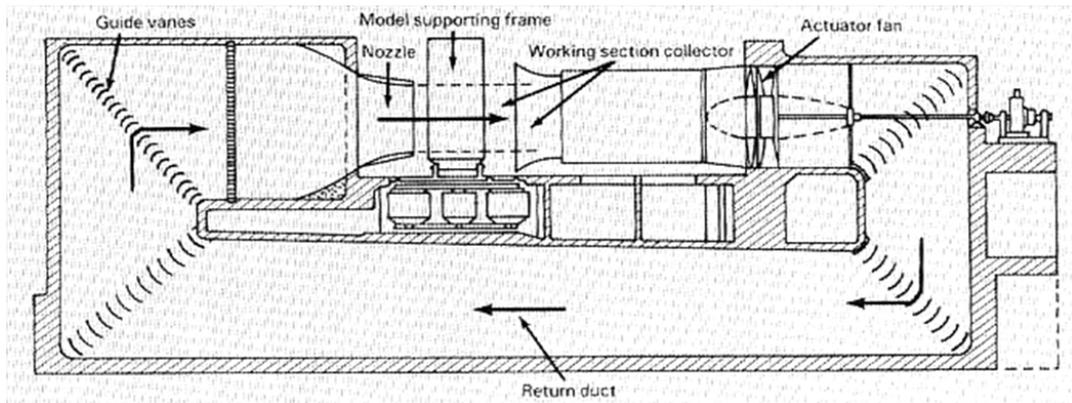


Figure 16 : Soufflerie à retour de Ludwig Prandtl (1916).

L'inconvénient majeur des souffleries précédentes restait leur fonctionnement à la pression atmosphérique sur des maquettes aéronautiques de taille réduite, ce qui ne permettait pas de reproduire les conditions de vol d'un avion réel. Comme il était impossible de placer un avion complet dans de telles installations, la seule possibilité pour retrouver les conditions aéronautiques consistait à faire varier la masse volumique de l'air. Cette approche fut suivie aux États-Unis par le National Advisory Committee for Aeronautics (NACA), qui développa, sous l'impulsion de Max Munk (Figure 17), une soufflerie à masse volumique variable [8]. Cette soufflerie à retour était enfermée dans une enceinte pressurisée permettant d'atteindre vingt fois la pression atmosphérique (Figure 18). La section d'essai avait un diamètre de 1,5 mètre et le moteur de 250 chevaux-vapeur entraînant l'hélice permettait d'atteindre une vitesse de 20 mètres par seconde. C'est dans cette installation que le NACA réalisa les essais des nombreux profils d'ailes aéronautiques développés jusqu'à la fin des années 1930.



Figure 17 : Max Munk (1890-1986).

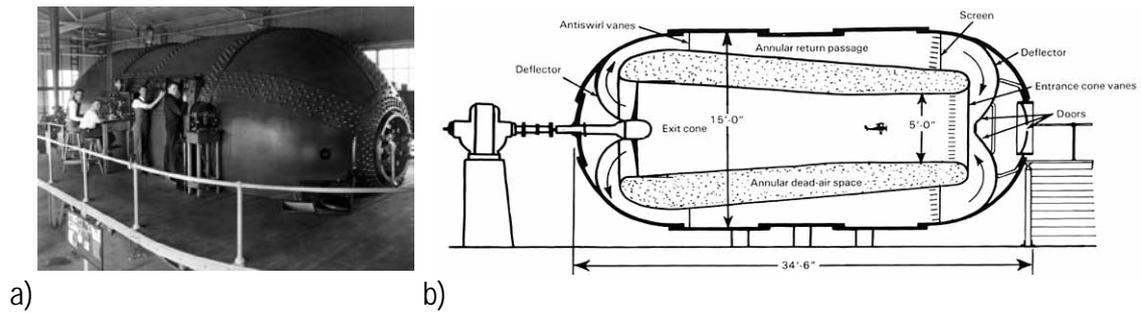


Figure 18 : Soufflerie à retour à masse volumique variable (1922) Hampton, Virginie : a) vue de l'installation, b) plan d'ensemble.

#### IV. Les grandes souffleries

Les différents types de souffleries subsoniques étaient établis au début des années 1920. Cependant, ces essais étaient réalisés sur des maquettes de dimensions réduites. Au début des années 1930, le Service technique de l'aéronautique (STAé) eut l'idée de construire la plus grande soufflerie au monde sur le site du centre aéronautique de Chalais-Meudon, afin de pouvoir placer un avion complet dans la veine. Construite entre 1932 et 1934, cette soufflerie aspirante de type Eiffel possédait une veine d'essai elliptique de 10 mètres par 18 mètres sur une longueur de 11 mètres. Chacune des six hélices de 8,7 mètres de diamètre était entraînée par un moteur de 1000 chevaux-vapeur, afin d'obtenir une vitesse pouvant atteindre 50 mètres par seconde (Figure 19). De nombreux avions furent testés dans cette installation (Figure 20), dont la renommée fut telle qu'elle fut reprise par Hergé dans les Aventures de Jo, Zette et Jocko [9]. Dans cette histoire, un avion stratosphérique, pouvant atteindre la vitesse de 1000 kilomètres par heure, était testé dans la soufflerie de Chalais-Meudon. Malheureusement, ignorant que cette installation fonctionnait par aspiration, Hergé ne dessina pas son avion dans la bonne direction de l'écoulement ! Cette soufflerie fut utilisée intensément, notamment pour tester l'aérodynamique de la Caravelle, du Concorde ou de la Volkswagen Coccinelle, jusqu'en 1977 où elle fut désaffectée. Elle a été classée monument historique en 2000.

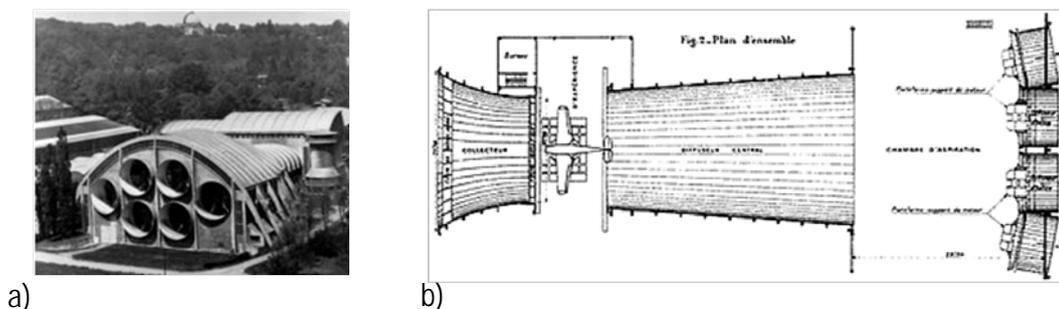


Figure 19 : Soufflerie à circuit ouvert S1 de Chalais-Meudon (1932-1934) : a) vue de l'installation, b) plan d'ensemble.



Figure 20 : Essais d'un Morane-Saulnier 315 dans la soufflerie S1 de Chalais-Meudon (1936) [Musée de l'Air et de l'Espace].

Conçue en Allemagne pour être construite dans les Alpes autrichiennes à partir de 1942, une très grande soufflerie à retour fit partie des prises de guerre de la France en 1945. Elle fut démontée et implantée sur le site de l'Office National d'Études et de Recherches Aéronautiques (ONERA) à Modane en 1947 (Figure 21). Le choix du site d'implantation de cette installation n'est pas anodin : en effet, l'arbre de rotation de l'hélice est directement entraîné par deux turbines hydrauliques Pelton nécessitant une hauteur de chute d'eau de 840 mètres, d'où sa construction aux pieds des montagnes. En effet, à cette époque, aucun moteur électrique ne pouvait fournir la puissance nécessaire. Cette soufflerie à retour possède une veine d'essai de 8 mètres de diamètre sur une longueur de 8 mètres. La puissance totale fournie par les turbines à l'arbre est de 122000 chevaux-vapeur, permettant la rotation de deux hélices contrarotatives de 15 mètres de diamètre pour obtenir la vitesse du son, c'est-à-dire 340 mètres par seconde. Cette installation, utilisée pour tester les maquettes des plus grands programmes aéronautiques comme Concorde, Mirage, Falcon, Rafale, Boeing 777, est toujours en exploitation.

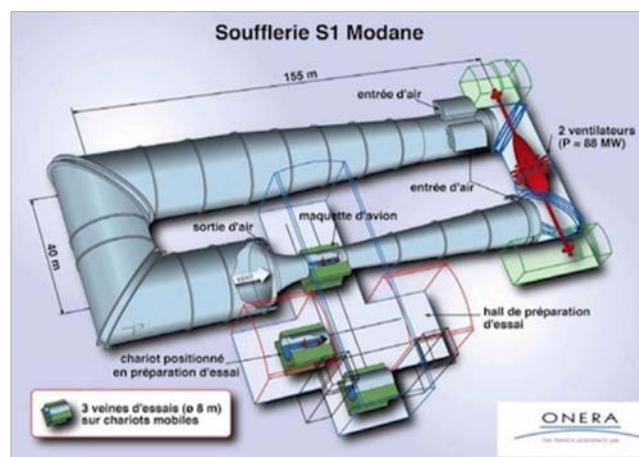


Figure 21 : Soufflerie à retour S1 de Modane-Avrieux (1947) [source ONERA].

La soufflerie de plus grandes dimensions au monde actuellement existante est la soufflerie du National Full-Scale Aerodynamics Complex, située sur le site de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) à Moffet Federal Airfield en Californie (Figure 22). Cette installation à circuit ouvert fut mise en service en 1987 sur une soufflerie de dimensions plus réduites construite dans les années 1940. Elle possède une veine d'essai de section rectangulaire de 24 mètres par 36 mètres et de 100 mètres de longueur. Chacune des six hélices de 12 mètres de diamètre est entraînée par un moteur de 23500 chevaux-vapeur, ce qui permet d'obtenir une vitesse maximum de 50 mètres par seconde dans la veine d'essai. Cette soufflerie, permettant de tester des avions aussi larges qu'un Boeing 737, a notamment servi aux essais du chasseur F/A 18 Hornet ainsi qu'aux essais d'ouverture du parachute de la sonde Mars Explorer.



Figure 22 : National Full-Scale Aerodynamics Complex (1980) [source NASA Ames].

Après la réalisation de différents systèmes permettant la mise en mouvement d'un corps dans l'air au repos, le développement de la soufflerie s'est avéré être la meilleure solution de laboratoire, en créant un vent relatif sur un objet fixe. Ce type d'installation expérimentale a évolué vers des veines d'essai de plus en plus importantes, permettant d'abandonner l'usage de maquettes pour tester directement un avion complet. Les vitesses ont également évoluées vers des valeurs de plus en plus élevées jusqu'à atteindre la vitesse du son. Malgré le développement des méthodes numériques pour la simulation des écoulements, d'un coût de fonctionnement bien moindre, il est aujourd'hui toujours pertinent d'utiliser des souffleries à la fois pour la conception de nouveaux engins que pour des aspects fondamentaux de recherche en aérodynamique.

## Bibliographie :

- [1] Faure, Th. M. (2015) *George Cayley, le père de l'aérodynamique*, Sous les cocardes, 20 janvier 2015.
- [2] Cayley, G. (1933) *Aeronautical and Miscellaneous Note-Book (ca. 1799-1826) of Sir George Cayley*, Cambridge.
- [3] Anderson Jr., J.D. (2002) *The Airplane – A History of its Technology*, Reston, American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- [4] Lilienthal, O. (1889) *Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst*, R. Gaertners Verlagsbuchhandlung.
- [5] Faure, Th. M. (2016) *Évolution historique des coefficients aérodynamiques*, Sous les cocardes, 3 mai 2016.
- [6] Eiffel, G. (1910) *Installation d'un laboratoire d'aérodynamique*, Société des Ingénieurs Civils de France, Paris.
- [7] Prandtl, L. (1920) Göttingen wind tunnel for testing aircraft models, *NACA Technical Notes*, No. 66.
- [8] Munk, M. (1921) On a new type of wind tunnel, *NACA Technical Report*, No. 60.
- [9] Hergé (1938) *Le Stratonef H.22 – 1<sup>e</sup> partie : Le testament de M. Pump*, Casterman, Bruxelles.