

# Évolution historique des coefficients aérodynamiques

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

---

La définition d'une grandeur physique, dont l'utilisation est aujourd'hui familière pour tout ingénieur ou toute personne qui s'intéresse à une discipline scientifique, résulte souvent d'une longue et lente maturation au cours du développement de ce domaine et de l'avancée des connaissances théoriques. L'usage des coefficients aérodynamiques est un exemple de cette évolution qui commença au milieu du XVIII<sup>e</sup> siècle pour s'achever, avec une formulation définitivement admise par la communauté scientifique, au début des années 1920.

Voyons tout d'abord quelles sont les forces aérodynamiques qui s'exercent sur un corps (par exemple un avion) en mouvement dans un milieu fluide (de l'air). Le fluide étant au repos et l'avion en mouvement avec une vitesse  $V$ , un observateur situé dans l'avion voit ce dernier immobile tandis que le fluide est ressenti comme un écoulement de vitesse  $V$  autour de l'avion (Figure 1). On se place donc dans ce repère relatif attaché à l'avion. Sous l'effet de cet écoulement, une force résultante aérodynamique  $R$  s'exerce sur l'avion, qui se décompose en une composante alignée sur la vitesse  $V$ , que l'on appelle force de traînée  $F_x$ , et une composante perpendiculaire à la vitesse  $V$ , nommée force de portance  $F_y$ . Bien entendu, ces forces dépendent de nombreux paramètres : la valeur de la vitesse  $V$ , la dimension et la forme du corps en mouvement, la valeur de l'angle d'incidence  $\alpha$  formé entre la vitesse  $V$  et l'aile de l'avion. Ainsi, pour comparer les forces aérodynamiques qui s'exercent dans des

conditions différentes ou sur des corps de longueurs différentes, il est commode de définir des coefficients, c'est-à-dire des nombres indépendants des dimensions des corps et de leurs vitesses [1].

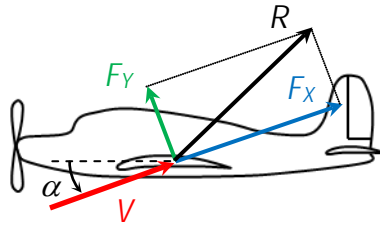


Figure 1 : Force résultante aérodynamique, force de portance et force de traînée.

Cette approche fut introduite par John Smeaton en 1759 (Figure 2). Cet ingénieur britannique en génie civil souhaitait connaître la résistance au vent éprouvée par une aile de moulin à vent. Il prit comme référence une plaque plane carrée de un pied de côté, placée perpendiculairement à un vent de un mile par heure (Figure 3) et effectua des mesures à l'aide du bras tournant inventé par Benjamin Robins [2]. La force de traînée exercée sur la plaque était alors donnée, en livres, par la formule :

$$F_x = kV^2S$$

où  $S$  est la surface de la plaque,  $V$  la vitesse du vent relatif et  $k$  un coefficient mesuré par Smeaton. Ce dernier est indépendant de la vitesse du vent et de la surface de la plaque, et, dans le système d'unités précédent, fut mesuré égal à 0,005 (ce qui correspond à une valeur de 1,12 dans le système international d'unités actuel) [3]. Cependant, une vitesse aussi faible qu'un mile par heure était difficile à estimer correctement. L'incertitude qui en résultait sur le coefficient  $k$  était de plus de 70% par rapport à la véritable valeur. Cependant, cette première définition d'une force aérodynamique fut reprise tout au long du XIX<sup>e</sup> siècle, en commençant par George Cayley [4], qui utilisa l'estimation de Smeaton du coefficient  $k$  dans la mesure des forces éprouvées sur des ailes montées sur un bras tournant.



Figure 2 : John Smeaton (1724-1792)

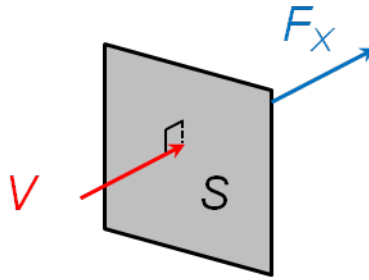


Figure 3 : Configuration de référence pour la définition du coefficient de Smeaton.

L'allemand Otto Lilienthal (Figure 4) utilisa à nouveau cette définition, mais choisit de décomposer la force résultante aérodynamique en une composante normale et une composante tangentielle dans le repère attaché à l'aile (Figure 5). Il ne se contenta pas de mesurer les forces dans une direction perpendiculaire à la direction du vent relatif. De ce fait, il introduisit un coefficient supplémentaire correspondant à l'effet de l'angle d'incidence sur la force considérée :

$$F_N = kV^2 SC_N(\alpha)$$

$$F_T = kV^2 SC_T(\alpha)$$

où  $F_N$  est la composante normale,  $F_T$  la composante tangentielle,  $C_N(\alpha)$  et  $C_T(\alpha)$  les coefficients d'influence de l'angle d'incidence  $\alpha$ , pour la composante normale et pour la composante tangentielle. Cependant, Lilienthal n'utilisa pas directement ces formules, mais, pour chaque valeur de l'angle d'incidence  $\alpha$ , divisa la 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 [5]. Il eut l'idée d'une représentation polaire, c'est-à-dire de tracer les forces aérodynamiques qui s'exercent selon deux directions perpendiculaires, pour différentes valeurs de l'angle d'incidence (Figure 6). L'ensemble des mesures collectées, pour différents types de profils d'aile qui étaient toujours testés sur un bras tournant, constitua une base de données publiées et reprise dans la communauté scientifique des aérodynamiciens.



Figure 4 : Otto Lilienthal (1848-1896).

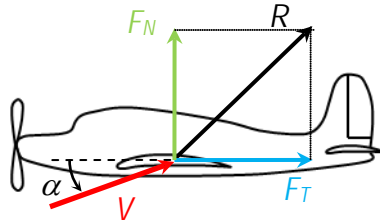


Figure 5 : Force résultante aérodynamique, force normale et force axiale à une aile.

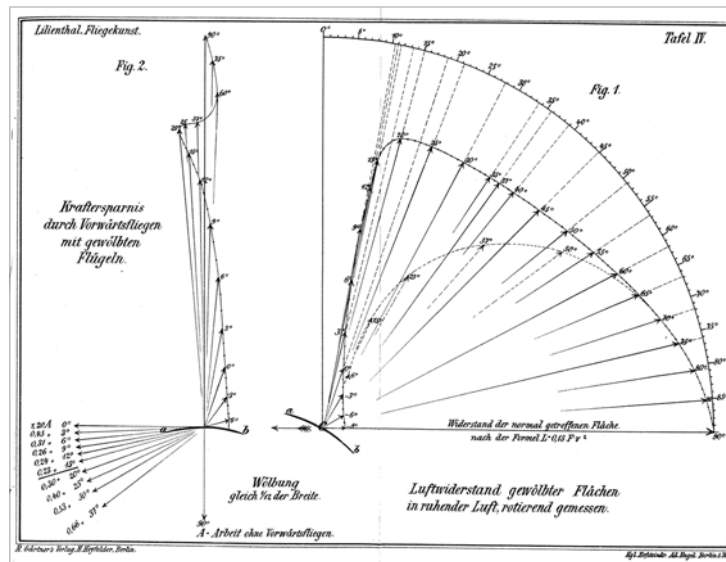


Figure 6 : Polaire de Lilienthal [5].

Peu de temps après les travaux de Lilienthal, l'astronome et aérodynamicien américain Samuel P. Langley (Figure 7) détermina, en employant un bras tournant, une nouvelle estimation du coefficient de Smeaton [6]. Ses mesures furent réalisées avec une grande précision. Il trouva, en 1891, la valeur de 0,003 (ce qui correspond à une valeur de 0,72 dans le système international d'unités), très proche de la vraie valeur de ce coefficient qui est de 0,0029 (0,695 dans le système international d'unités). Langley utilisa pour ces essais des plaques planes à différentes valeurs de l'angle d'incidence et écrivit la force résultante aérodynamique sous une forme analogue à celle utilisée précédemment par Lilienthal :

$$R = kV^2SC_R(\alpha)$$

où  $R$  est la force résultante aérodynamique et  $C_R(\alpha)$  le coefficients d'influence de l'angle d'incidence  $\alpha$ .



Figure 7 : Samuel P. Langley (1834-1906).

À la suite des travaux de Lilienthal, l'utilisation de coefficients qui dépendent de l'angle d'incidence devint la norme dans la communauté des aérodynamiciens, en conservant, comme Langley, le coefficient de Smeaton dans les formules des forces. Cet usage perdura jusqu'aux travaux de Wilbur et Orville Wright (Figure 8) en 1902. Avant la réussite du premier vol d'un aéroplane piloté, ces pionniers de l'aéronautique s'intéressèrent aux aspects aérodynamiques en testant, cette fois-ci en soufflerie, différents profils d'ailes. C'est sans doute l'utilisation de ce moyen expérimental, où la vitesse de l'écoulement est parallèle à l'axe de la soufflerie, qui les incita à utiliser les forces de portance et de traînée plutôt que les forces normale et tangentielle à l'aile :

$$F_X = kV^2SC_X(\alpha)$$

$$F_Y = kV^2SC_Y(\alpha)$$

où  $F_X$  est la force de traînée,  $F_Y$  la force de portance,  $C_X(\alpha)$  et  $C_Y(\alpha)$  les coefficients d'influence de l'angle d'incidence  $\alpha$ , pour la force de traînée et pour la force de portance. Respectueux de leurs prédécesseurs, ils conservèrent formellement le coefficient  $k$  dans l'expression de ces formules. Cependant, ils réalisèrent un dispositif mécanique leur permettant d'obtenir directement le rapport entre la force de traînée et la force de portance, faisant de cette façon abstraction du coefficient de Smeaton, tout comme Lilienthal l'avait fait avant eux. Ce dispositif leur permit de tracer les caractéristiques aérodynamiques d'une aile sous la forme d'une représentation polaire.



Figure 8 : Wilbur (1867-1912) et Orville Wright (1871-1948).

L'usage de ces courbes polaires conduisit naturellement à l'abandon du coefficient de Smeaton. Ce dernier fut entériné en 1909 par les travaux de l'ingénieur civil français Gustave Eiffel (Figure 9) qui

écrivit directement les forces aérodynamiques obtenues expérimentalement dans sa soufflerie [7] sous la forme :

$$F_X = K_X(\alpha) V^2 S$$

$$F_Y = K_Y(\alpha) V^2 S$$

où les coefficients de traînée  $K_X(\alpha)$  et de portance  $K_Y(\alpha)$  dépendent de l'angle d'incidence  $\alpha$  (Figure 10). Le coefficient  $k$  de Smeaton a complètement disparu des formules précédentes. La renommée d'Eiffel en tant qu'aérodynamicien en France, où il construisit la première soufflerie de grande dimension, et le développement de profils d'ailes qui équiperont un grand nombre d'avions de la Première Guerre Mondiale, contribuèrent à faire adopter cette définition des coefficients aérodynamiques à travers le monde.



Figure 9 : Gustave Eiffel (1832-1923).

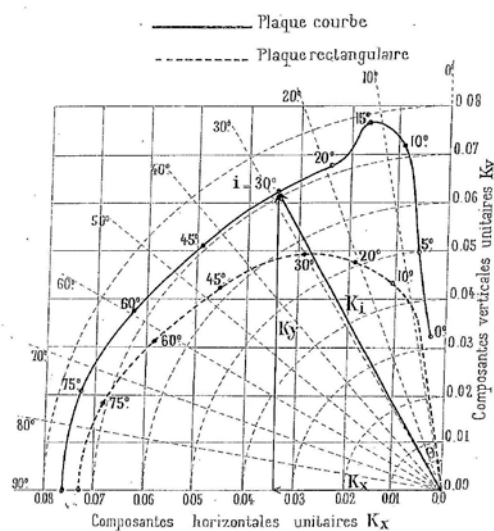


Figure 10 : Polaire d'Eiffel [7].

Cependant, ces coefficients ne sont pas des nombres indépendants du milieu fluide en mouvement. Une modification de leur expression fut apportée par l'américain Joseph S. Ames (Figure 11) en 1917 où les forces aérodynamiques furent définies pour la première fois par les expressions [8] :

$$F_x = \rho V^2 S C_x(\alpha)$$

$$F_y = \rho V^2 S C_y(\alpha)$$

où  $\rho$  est la masse volumique du fluide en mouvement autour de l'aile,  $C_x(\alpha)$  et  $C_y(\alpha)$  les coefficients d'influence de l'angle d'incidence  $\alpha$ , pour la force de traînée et pour la force de portance. De cette façon, les coefficients  $C_x(\alpha)$  et  $C_y(\alpha)$  devenaient indépendants du fluide considéré. Des mesures effectuées, par exemple, dans l'eau, pouvaient alors être transposées à l'air.



Figure 11 : Joseph S. Ames (1864-1943).

Cette dernière formulation ne fait pourtant pas intervenir la grandeur fondamentale qui permet à un avion de voler, à savoir la pression dynamique. Celle-ci est la pression engendrée par la vitesse  $V$  d'un corps en mouvement dans un milieu fluide de masse volumique  $\rho$ , et s'écrit mathématiquement  $\frac{1}{2}\rho V^2$ . C'est l'éminent aérodynamicien allemand Ludwig Prandtl (Figure 12) qui identifia, dans son laboratoire de Göttingen, le rôle déterminant de la pression dynamique dans la création des forces aérodynamiques et introduisit cette quantité dans la définition des coefficients :

$$F_x = \frac{1}{2}\rho V^2 S C_x(\alpha)$$

$$F_y = \frac{1}{2}\rho V^2 S C_y(\alpha)$$

où  $C_x(\alpha)$  et  $C_y(\alpha)$  sont les coefficients de traînée et de portance, dépendant de l'angle d'incidence  $\alpha$ , qui sont utilisés de nos jours. Cette définition, qui intègre pleinement la physique du phénomène de création des forces, fut publiée en 1921 [9] et reste aujourd'hui l'unique standard à travers le monde.



Figure 12 : Ludwig Prandtl (1875-1953).

L'utilisation des coefficients aérodynamiques, qui peut de nos jours paraître naturelle et évidente à tout scientifique, résulte cependant d'un long processus de maturation intellectuelle et de compréhension de la véritable physique sous-jacente à la genèse des forces qui s'appliquent sur un objet en mouvement. Après avoir adopté une approche d'ingénieur, en souhaitant écrire une relation mathématique pour refléter un résultat d'expérience, Smeaton a imposé une convention pendant près d'un siècle et demi. Ce n'est qu'après une profonde analyse des paramètres intervenant dans le processus de création des forces aérodynamiques, qu'une définition réellement physique des coefficients a pu être adoptée définitivement.



## Bibliographie :

- [1] Anderson Jr., J.D. (2005) *Fundamentals of Aerodynamics*, third edition, Columbus, McGraw Hill.
- [2] Faure, Th. M. (2016) *Les moyens expérimentaux en aérodynamique du XVIII<sup>e</sup> au XX<sup>e</sup> siècle*, Sous les cocardes, 3 mai 2016.
- [3] Smeaton, J. (1759) An Experimental Enquiry Concerning the Natural Power of Water and Wind to Turn Mills and Other Machines Depending on a Circular Motion, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Vol. 51, pp. 100-174.
- [4] Faure, Th. M. (2015) *George Cayley, le père de l'aérodynamique*, Sous les cocardes, 20 janvier 2015.
- [5] Lilienthal, O. (1889) *Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst*, R. Gaertners Verlagsbuchhandlung.
- [6] Langley, S. P. (1891) Experiments in Aerodynamics, *Smithsonian Contributions to Knowledge*, Vol. 801, Smithsonian Institution, Washington.
- [7] Eiffel, G. (1910) *Installation d'un laboratoire d'aérodynamique*, Société des Ingénieurs Civils de France, Paris.
- [8] Ames, J.S. (1918) Aerodynamic Coefficients and Transformation Tables, *NACA Technical Report*, No. 20.
- [9] Prandtl, L. (1921) Application of Modern Hydrodynamics to Aeronautics, *NACA Technical Report*, No. 116.