

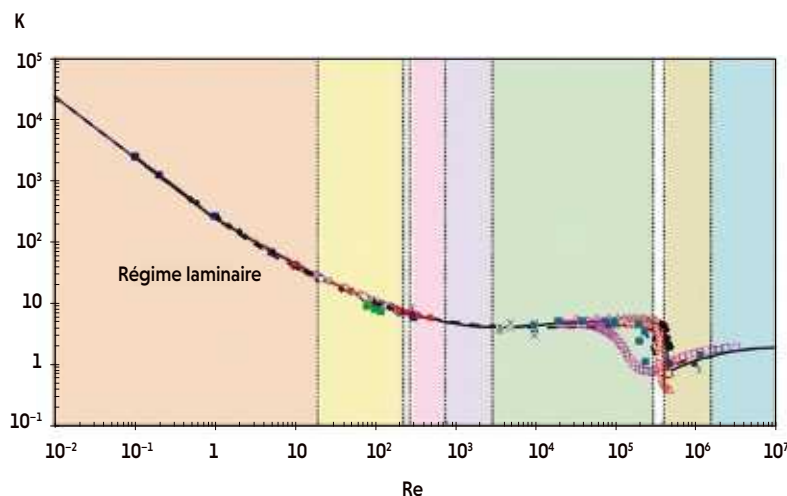
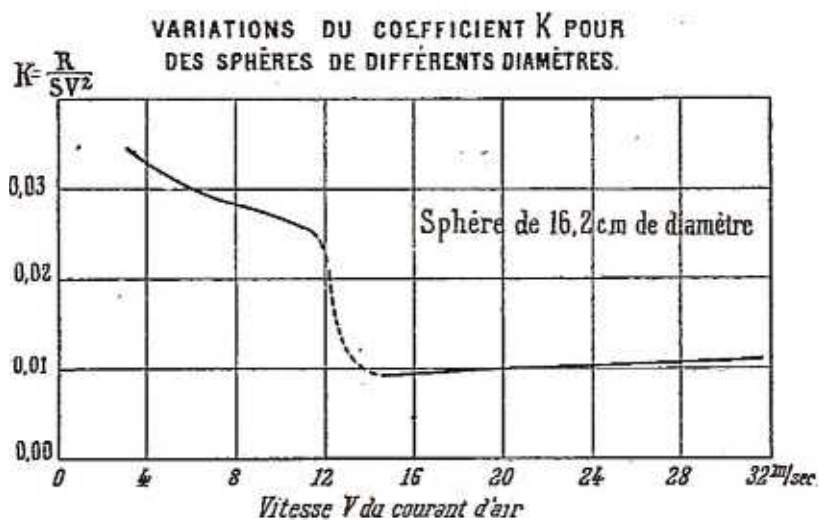
> balance aérodynamique imaginée par Eiffel, ainsi que d'un appareil destiné à la détermination des centres de poussée (la «girouette»), qui s'avérera très utile pour l'étude de la stabilité des ailes d'avion et en particulier pour observer comment, à partir d'une certaine inclinaison, apparaît un brusque déplacement du centre de pression de l'avant vers l'arrière.

Rapidement, de nombreux laboratoires aérodynamiques dans le monde ont adopté ce modèle de «soufflerie Eiffel». Un autre modèle très répandu et performant est celui de l'ingénieur allemand Ludwig Prandtl, qui construit en 1908 dans son laboratoire à Göttingen une soufflerie en circuit fermé.

Plus de 5000 essais seront réalisés dans cette installation du Champ de Mars, inaugurée en 1909, puis détruite en 1911 à cause des nuisances sonores et du renouvellement du quartier. À 79 ans, Gustave Eiffel reconstruit une soufflerie à Auteuil en élargissant sa veine d'essai à une section carrée de 2 mètres de côté, améliorant ainsi le rendement de l'installation grâce à la conception d'un diffuseur qui lui permet d'atteindre des vitesses de 30 mètres par seconde (voir les figures pages 75 et 77). Située au 67 rue Boileau, dans le XVI^e arrondissement de Paris, cette soufflerie est toujours opérationnelle et il est possible de la visiter. Classée monument historique, elle appartient actuellement au Centre scientifique et technique du bâtiment et abrite par ailleurs l'appareil de chute original.

LA « CRISE DE TRAÎNÉE »

Parmi les milliers de résultats de mesures obtenus par Eiffel sur la résistance des objets dans l'air, quelques-uns méritent une attention particulière et motivèrent, en leur temps, une polémique. Il s'agit des expériences sur la résistance des sphères en mouvement à grande vitesse. En 1912, Otto Föppl, chercheur à Göttingen, suspecte dans une publication que les valeurs mesurées par Eiffel du coefficient de résistance des sphères sont entachées d'erreurs «manifestes», car les mesures effectuées



MISE EN ÉVIDENCE DE LA « CRISE DE TRAÎNÉE »

En 1912, dans sa toute nouvelle soufflerie d'Auteuil, Gustave Eiffel mesura le coefficient K de traînée d'une sphère de 16,2 centimètres de diamètre en fonction de la vitesse V du vent ($K = R/SV^2$, où R est la résistance totale et S la surface diamétrale). On note que le régime d'écoulement change pour une vitesse critique d'environ 12 mètres par seconde. Cette vitesse critique diminue quand le diamètre de la sphère augmente (en haut). Une compilation d'expériences similaires récentes montre de même l'existence de différents régimes en fonction du nombre de Reynolds Re (une vitesse adimensionnelle, en bas).

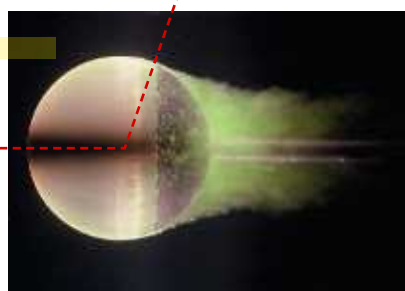
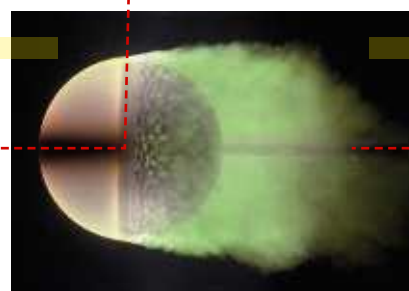


La crise de traînée se produit à grande vitesse, quand le régime devient turbulent

à Göttingen montrent des valeurs deux fois plus grandes. Eiffel répond la même année dans une note aux *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* que si, pour des vitesses inférieures à une certaine vitesse critique, les valeurs trouvées par lui-même correspondent bien à celles mesurées à Göttingen, pour des vitesses plus grandes, on trouve l'effet paradoxal que la traînée diminue de presque moitié (voir la figure ci-dessus), valeurs que l'on ne pouvait obtenir à Göttingen, où l'écoulement de la soufflerie était moins rapide qu'à Paris!

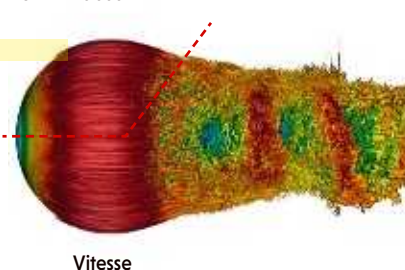
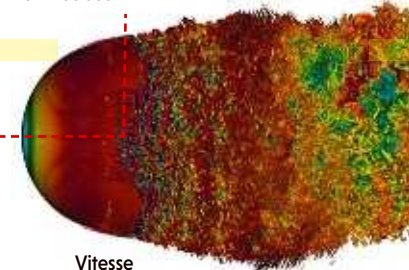
Re = 200 000

Re = 300 000



Re = 100 000

Re = 1 140 000



Vitesse

0,4 0,8 1,2
0 1,5

Vitesse

0,4 0,8 1,2
0 1,5

DEUX RÉGIMES D'ÉCOULEMENT AUTOUR D'UNE SPHÈRE

Dans un écoulement autour d'une sphère, la région de recirculation du fluide est beaucoup moins importante en régime turbulent (à droite) qu'en régime laminaire (à gauche), comme le montrent une expérience en tunnel hydrodynamique (en haut) et une simulation numérique des structures instables (en bas, les couleurs représentent la vitesse en unités de la vitesse d'entrée du fluide).

Eiffel venait ainsi de découvrir l'effet de la « crise de traînée », observée sur des corps en mouvement à partir d'une certaine valeur critique de la vitesse. En termes de vitesse adimensionnelle exprimée par le nombre de Reynolds Re ($Re = UL/\nu$, où U et L sont la vitesse et la taille caractéristiques du corps et ν est la viscosité cinématique du fluide), ce phénomène se manifeste quand Re est de l'ordre de 300 000 pour les sphères (ce qui équivaut à une vitesse de 20 mètres par seconde pour un ballon de foot).

Après la visite de Prandtl et de son confrère hongrois Theodore von Kármán à Auteuil en octobre 1913, Eiffel envoie les plans de son ventilateur hélicoïdal à Prandtl. Ce dernier modifie en conséquence sa soufflerie à Göttingen, ce qui lui permet d'augmenter la vitesse de 10 à 23 mètres par seconde, et ainsi de réaliser de nouvelles expériences qui confirment l'existence de la crise de traînée pour les sphères.

C'est Prandtl qui, de plus, explique la phénoménologie de la transition observée à partir du changement de nature de la « couche limite ». Ce terme, qu'il a introduit quelques années plus tôt, désigne la zone d'interface entre le corps et le fluide en mouvement loin

de lui. La crise de traînée se produit lorsque, au-delà d'une certaine vitesse critique du fluide par rapport au corps, l'écoulement dans cette couche devient turbulent.

Dans le régime sous-critique, la couche limite est laminaire. L'écoulement se décolle du corps à un angle au centre depuis le point de stagnation (le point le plus en amont du corps, où la vitesse du fluide est nulle) de près de 90° (voir la figure ci-contre). Dans le régime supercritique, l'angle de séparation augmente brusquement à près de 130° : le décollement se produit beaucoup plus loin du point de stagnation. Ce changement s'accompagne d'une diminution notable de la taille de la région de recirculation – la zone où le fluide se décolle du corps – et de la traînée. Une diminution déjà rapportée par Eiffel dans sa note de 1912 : « On peut se rendre compte de ces anomalies et constater qu'il existe bien deux régimes d'écoulement, en examinant la marche des filets autour de la sphère à l'aide d'un fil léger porté par une tige très mince. Au-dessous de la vitesse critique, il se forme à l'arrière un cône de dépressions, d'une longueur presque égale au diamètre de la sphère, et analogue à celui qui se produit à l'arrière des plaques frappées normalement par le vent. Au-dessus de cette vitesse critique, existe le nouveau régime pour lequel ce cône a disparu et se trouve remplacé par une région où l'air n'est relativement pas troublé. »

Dans le régime supercritique, on se trouve donc en présence d'une couche limite turbulente qui peut être excitée prématurément par des rugosités ou des perturbations d'amplitude finie, ce qui réduit la valeur du nombre de Reynolds critique. Ce phénomène de crise de traînée est observé sur d'autres corps, et en particulier sur un long cylindre normal à l'écoulement avec des caractéristiques très similaires, tout en conservant un caractère bidimensionnel en moyenne.

UN SUJET TOUJOURS OUVERT

Cette découverte, faite il y a déjà plus d'un siècle par Gustave Eiffel sur le Champ de Mars, demeure, encore aujourd'hui, un sujet ouvert de la dynamique des fluides. Quoique l'existence de la crise de la traînée soit bien établie, il reste à élucider sa dynamique intermittente et bistable en explorant, au-delà du comportement moyen, les aspects spatiaux sous-jacents : pourquoi, dans le régime supercritique, observe-t-on, de façon instable, des structures cohérentes ? Rares sont encore les simulations numériques capables de monter aux très hauts nombres de Reynolds nécessaires pour répondre à cette question. D'un point de vue expérimental, le contrôle des rugosités et des perturbations qui déclenchent la transition représente, de même, un défi à résoudre. ■

BIBLIOGRAPHIE

M. Eckert, Ludwig Prandtl : **A Life for Fluid Mechanics and Aeronautical Research**, Springer, 2019.

C. Fontanon, « La naissance de l'aérodynamique expérimentale et ses applications à l'aviation. Une nouvelle configuration socio-technique (1904-1921) », dans C. Fontanon (dir.), *Histoire de la mécanique appliquée*, pp. 57-88, ENS, 1998.

G. Eiffel, **Recherches expérimentales sur la résistance de l'air exécutées à la Tour Eiffel**, L. Maretheux, 1907.