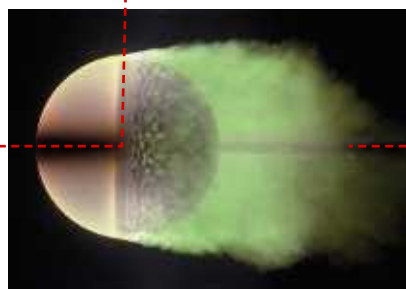
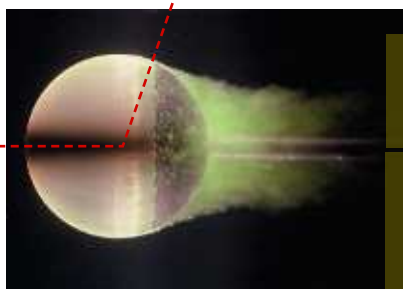


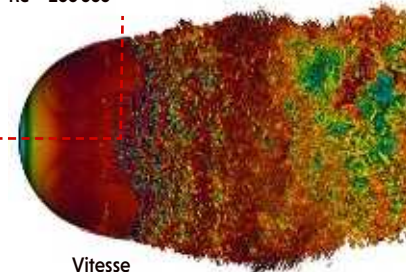
Re = 200 000



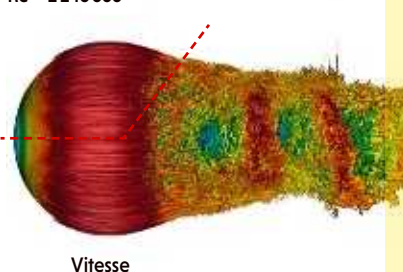
Re = 300 000



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.

R

ENDEZ-VOUS

P.80 Logique & calcul
 P.86 Art & science
 P.88 Idées de physique
 P.92 Chroniques de l'évolution
 P.96 Science & gastronomie
 P.98 À picorer

LES PREMIERS SERONT-ILS LES DERNIERS?

Même lorsque les règles d'un jeu sont précises,
il est difficile de savoir quelle stratégie est la meilleure.
Illustration avec le dilemme du prisonnier.

LES AUTEURS

JEAN-PAUL DELAHAYE
 et PHILIPPE MATHIEU
 professeurs à l'université
 de Lille, chercheurs
 au laboratoire Cristal
 (Centre de recherche
 en informatique, signal
 et automatique de Lille)

LE PARADOXE DES VOTES

1 Considérons une assemblée de 62 électeurs ayant le choix entre trois candidats A, B et C. Leurs ordres de préférence sont :

- A > B > C pour 23 électeurs ;
- B > C > A pour 17 électeurs ;
- B > A > C pour 2 électeurs ;
- C > A > B pour 10 électeurs ;
- C > B > A pour 10 électeurs.

On en déduit que :

- 33 électeurs préfèrent A à B et 29 préfèrent B à A.
- 42 électeurs préfèrent B à C et 20 préfèrent C à B.
- 37 électeurs préfèrent C à A et 25 préfèrent A à C.

Cela conduit à un cycle de préférence A > B > C > A, qui interdit de conclure à un classement précis entre les trois candidats.

Une conséquence de cette situation est que, lors d'une élection

On sait bien que pour chaque type de scrutin, choix d'une décision, choix d'un élu, choix d'une liste d'élus, etc., il existe plusieurs systèmes de vote, chacun dis-
 posant de bons arguments pour prétendre être le plus naturel et donc celui qu'il faut préférer. Ces systèmes aboutissent parfois au même résultat final, mais on réussit en général assez facilement à construire des situations où les verdicts des différentes méthodes divergent : paradoxe de Condorcet, théorème de Kenneth Arrow (voir le livre de Michel Balinski et Rida Laraki dans la bibliographie). C'est insatisfaisant, car cela donne la possibilité d'arrangements et de manipulations pour faire gagner un camp ou un candidat en modifiant à temps les règles (voir l'encadré 1).

Pour les compétitions sportives, on utilise là encore une multitude de méthodes pour produire des classements entre joueurs ou équipes. Certaines compétitions, comme celle de la Coupe de France de football, ne peuvent pas envisager que chaque équipe rencontre chaque autre. Pour limiter le nombre de rencontres, le système introduit des tirages au sort. Ceux effectués lors du déroulement des épreuves de la Coupe de France ont pour conséquence que les équipes ne sont pas traitées également : les tirages font qu'une équipe peut avoir plus ou moins de chances d'aller loin, selon qu'elle doit affronter rapidement les meilleures équipes ou non.

Face à de tels problèmes, on peut quand même s'interroger sur l'existence de méthodes parfaites de classement. C'est ce que nous proposons de faire à propos du classement d'un



à un tour, le candidat A l'emporte avec 23 voix (A 23 ; B 19 ; C 20), alors que si l'on organise une élection à deux tours, comme l'élection présidentielle en France, les candidats A et C sont sélectionnés pour le second tour, que C remporte.

Il semble que, pour cet exemple, aucune réponse satisfaisante n'existe à la question : « Quel est le bon ordre entre A, B et C ? » Une situation de ce type se présente parfois pour le dilemme du prisonnier. C'est ce que montre le présent article.