

Les tourbillons de sillage d'avions

par Laurent Jacquin

Laurent Jacquin est adjoint au directeur du
Département d'Aérodynamique Fondamentale et Expérimentale (DAFE)
de l'Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales (Onera)
Il est Professeur Chargé de cours à l'école Polytechnique
Mel : Laurent.Jacquin@onera.fr

1. La portance fait tourner l'air ▲

Un avion agit sur l'air qui l'entoure en le propulsant vers le bas. L'air ainsi déplacé imprime sur l'avion une force de réaction dirigée vers le haut : c'est la portance. Si l'avion se déplace horizontalement, sa force de portance équilibre son poids ; donc, pour voler l'avion propulse vers le bas une masse d'air avec une force équivalente à son poids. On peut montrer par exemple qu'un Airbus A340 (qui pèse 190 tonnes à l'atterrissage pour les versions A340-200 et 300) brasse environ 400 tonnes d'air par seconde en phase d'atterrissage ! En contournant les extrémités de la voilure, cette masse d'air acquiert un mouvement de giration (voir figure 1). Cela aboutit à la formation d'une paire de tourbillons parallèles très intenses, de sens de rotation opposés (voir figures 2 et 3). Ces tourbillons brassent la masse d'air déplacée par le poids de l'avion.

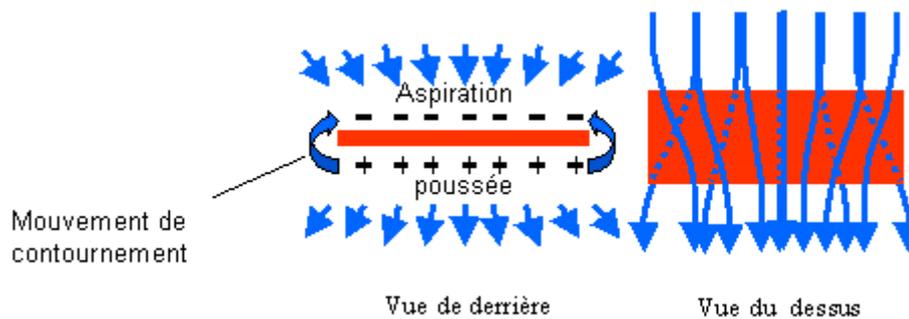


Fig. 1 : Mouvement de l'air autour d'une aile portante

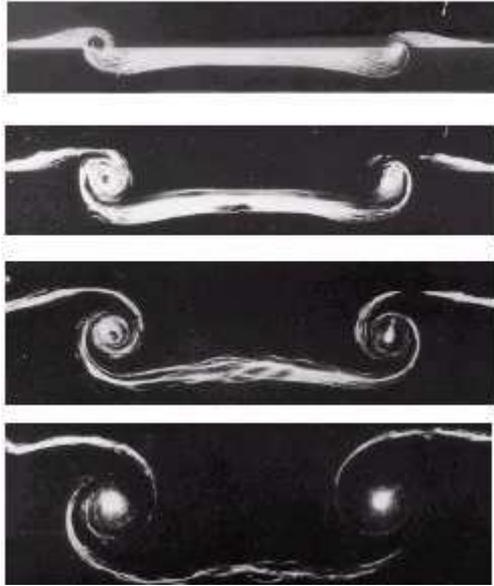


Fig. 2 : Visualisation par bulles d'hydrogène de l'enroulement de la nappe d'air qui impacte une aile. Vue par l'arrière. (Source : An album of Fluid Motion, Van Dyke, Parabolic Press)

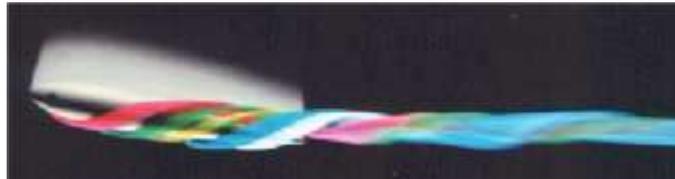


Fig. 3 : Visualisation par colorant de la formation du tourbillon d'extrémité d'une aile (Source : Onera)



Fig 4 : Visualisation des tourbillons de sillage par catapultage d'une maquette au travers un panache de fumée. La maquette se déplace vers l'arrière de la figure (Source : Onera)



Fig 5 : Visualisation des tourbillons de sillage consécutive au passage d'un avion léger à travers un panache de fumée
(Source NASA Langley Research Center - EL 1996 00130)

Des visualisations par fumées, comme celles montrées sur les figures 4 et 5, illustrent bien ces mécanismes.

En fait, derrière une aile d'avion à l'atterrissage ou au décollage, on trouve plusieurs tourbillons qui résultent du contournement par le fluide des diverses extrémités de la voilure : extrémités des ailes, des volets hypersustentateurs, des ailerons...

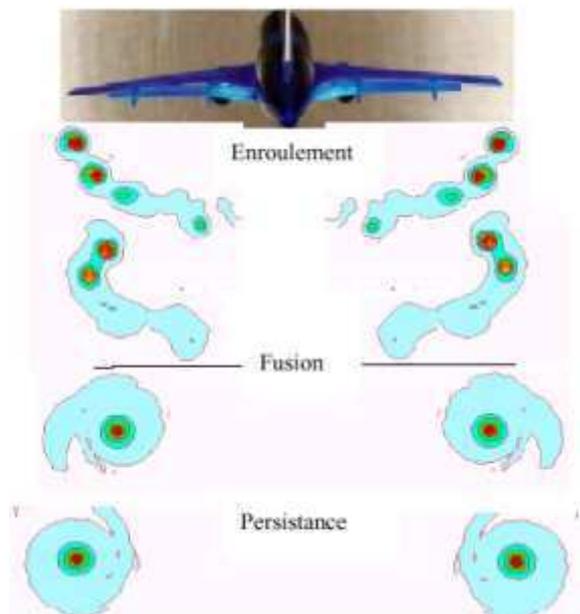


Fig. 6 : Sillage tourbillonnaire d'une maquette d'avion munie de volets. Mesure du taux de rotation des particules fluides par une technique Laser. Dans la phase d'enroulement, on distingue les tourbillons de bout d'ailes et les tourbillons de bout de volets - Ces tourbillons fusionnent pour former les tourbillons finaux du sillage qui sont très persistants (Source : Onera)

Ces tourbillons "fusionnent" pour ne laisser que deux tourbillons où se concentre tout le flux d'impulsion imprimé par la portance de l'avion (voir figure 6).

2. Le danger ▲

Dans un premier temps, cette paire de tourbillons contrarotatifs s'avère très persistante. Elle descend dans l'atmosphère avec une vitesse verticale typique d'environ 5 mètres par seconde (20 km/heure). Un avion de plus petite taille qui rencontre ces tourbillons peut subir un violent mouvement de roulis qui le met en danger.

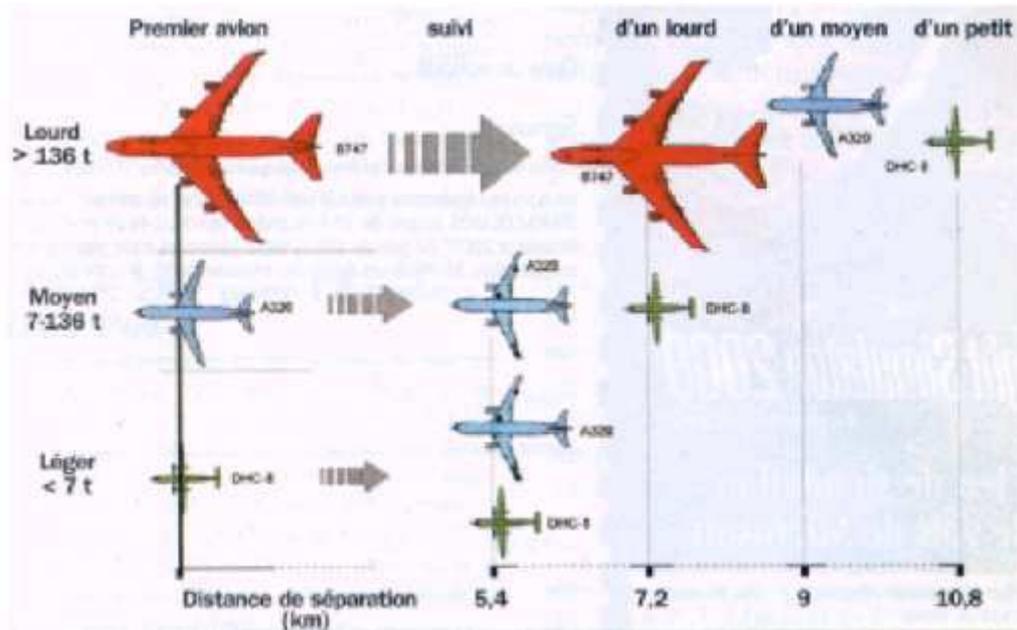


Fig 7 : Normes de séparation entre les avions

S'il y a du vent, ces tourbillons sont transportés en dehors des couloirs aériens et le danger est nul. En présence de vent, l'atmosphère est généralement " turbulente ". Si cette turbulence est suffisamment intense, elle est capable de détruire les tourbillons de sillage en provoquant leur désalignement et en favorisant leur interaction (si deux tourbillons de sens de rotation opposés se touchent, ils s'annihilent). Ainsi, dans la majorité des cas, la présence de perturbations atmosphériques élimine le danger : les avions rencontrent souvent les résidus de ce phénomène sans pouvoir les distinguer de la turbulence atmosphérique ambiante.

Mais dans une atmosphère calme, les tourbillons de sillage conservent très longtemps leur cohérence. C'est cette cohérence qui les rend dangereux.

Des normes internationales définissent des distances de séparation minimales entre les avions selon trois catégories de poids : lourds : > 136 tonnes, moyens : 7-136 tonnes, légers : < 7 tonnes. Ce sont ces normes qui fixent une limite à la fréquence des atterrissages et des décollages. Par exemple, aucun avion ne doit suivre un Boeing 747, dont le poids typique est d'environ 270 tonnes, à moins de 7,2 km, voir figure 7. Pour une vitesse d'atterrissage typique de 250 km/h, cela représente un laps de temps d'environ 2 mn. Cette distance doit être portée à 9km si l'avion qui suit un gros porteur (Boeing 747, Airbus A340) appartient à la catégorie de poids inférieure. Aux Etats-Unis, où la densité du trafic des aéroports est forte et où

l'utilisation de petits avions est très répandue, plusieurs incidents ou accidents ont eu lieu, suite, probablement, à une violation des règles de séparation.

Dans le contexte actuel d'engorgement des grands aéroports (Heathrow, Frankfurt ou Roissy, pour l'Europe), il s'avère nécessaire d'affiner les normes qui ont été établies à la fin des années 60. Il s'agit d'essayer d'optimiser le trafic aéroportuaire tout en élevant le niveau de la sécurité. Le lancement par Airbus du projet d'avion géant A380 est alors venu renforcer la pression sur ce sujet.

3. Les réponses de la recherche ▲

L'objectif des recherches en cours est donc d'optimiser la gestion du trafic aéroportuaire tout en diminuant le danger potentiel que représentent les sillages. Deux voies principales sont explorées.

En premier lieu il s'agit de développer un système de détection des tourbillons opérant sur les aéroports. Ces systèmes de mesure sont basés, entre autre, sur l'utilisation de faisceaux laser (technique LIDAR pour Light Detection And Ranging). Ils permettent de "suivre" les tourbillons de façon à s'assurer qu'ils sont détruits ou bien transportés en dehors de la trajectoire de l'avion suivant. Ces systèmes de détection sont dorénavant opérationnels mais des systèmes plus précis sont en cours de développement. Ils doivent permettre de quantifier, non seulement la position, mais aussi l'intensité des tourbillons.

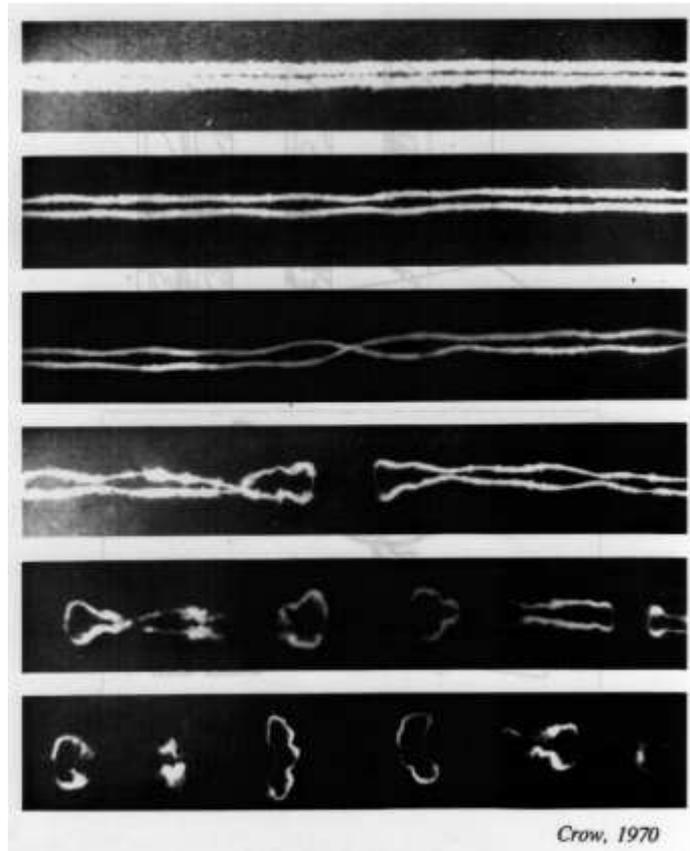
La seconde voie, plus prospective, concerne le développement de méthodes qui permettraient d'atténuer la "signature tourbillonnaire" des avions. Il s'agit de comprendre pourquoi tel avion semble plus dangereux qu'un autre, ou encore, quel peut-être l'impact d'un changement du dessin d'une aile sur les propriétés des tourbillons qu'elle engendre. Les expériences en soufflerie et les simulations numériques réalisées dans nos ordinateurs pour essayer de répondre à ces questions nous interpellent alors sur les lois physiques fondamentales qui régissent le monde des tourbillons : pourquoi et comment deux tourbillons fusionnent-ils ? Pourquoi les tourbillons sont-ils si persistants lorsqu'ils sont isolés ? A quel type de perturbations les tourbillons sont-ils sensibles ? Pourquoi l'agitation turbulente du fluide que l'on observe à l'intérieur de ces tourbillons n'agit-elle pas comme à l'accoutumé pour effacer rapidement ces mouvements organisés ?

La chasse aux tourbillons est donc ouverte. Sous les auspices de l'Union européenne, les laboratoires du monde académique (universités, CNRS...) se sont alliés avec les grands centres de recherches en aéronautique, tels que l'Onera ou son homologue allemand le DLR, pour développer les recherches dans ce domaine. Un effort équivalent est consenti par les USA.

4. Les tourbillons ont un point faible ▲

Les traces blanches que l'on observe souvent dans le ciel par beau temps sont la matérialisation des deux tourbillons de sillage d'un avion (voir figure 8). Ce sont des " traînées de condensation " formées par des cristaux de glace produits à partir de la condensation de la vapeur d'eau capturée dans les centres dépressionnaires

(donc froids) que constituent les tourbillons de sillage. Lorsque le temps est calme, ces traînées peuvent persister plusieurs minutes, ce qui prouve la grande robustesse de ces tourbillons de fluide. A terme, ces traînées de condensation dégènèrent en cirrus et elles forment une nappe nuageuse dans les couloirs aériens.



*Fig 8 : Traînée de condensation d'un bombardier B-47.
L'intervalle entre chaque photo est de 15 secondes.
Noter la déformation sinusoïdale des tourbillons (instabilité de Crow)
qui aboutit à leur destruction.
(Source : An Album of Fluid Motion, Van Dyke, Parabolic Press).*

En présence de perturbations turbulentes atmosphériques, ses traînées se désagrègent à la suite du développement d'une déformation sinusoïdale des deux tourbillons qui résulte de leur interaction mutuelle. Ce phénomène, visible sur la figure 8, est connu sous le nom d'instabilité de Crow. Comme le montre la figure 8, cette instabilité aboutit à la mise en contact des tourbillons et à la formation d'anneaux tourbillonnaires qui se dispersent rapidement.

L'instabilité de Crow qui se développe sous l'action de perturbations extérieures naturelles indique une voie possible pour détruire prématurément les sillages. Le tout est de pouvoir déclencher ce type d'instabilités sans compter sur l'humeur de l'atmosphère. Pour cela, il faut agir à partir de l'avion lui-même. Des analyses théoriques montrent qu'en rajoutant des tourbillons suffisamment persistants entre les deux tourbillons dominants, on peut provoquer des instabilités qui peuvent perturber plus vite le système. Les chercheurs de chez Boeing ont été les premiers à explorer cette voie. L'Onera développe aussi cette idée en explorant des

arrangements de tourbillons particulièrement prometteurs et en analysant leur efficacité, par voies théorique et expérimentale. Ces analyses restent pour l'instant limitées à des modèles académiques de sillage (voir figure 9) mais des expériences en soufflerie sont en cours et des essais en vol sont prévus. La façon dont ces arrangements de tourbillons peuvent être créés derrière un avion, la manière d'injecter les "bonne" perturbations à partir de l'avion et la capacité effective de destruction du système global restent encore à évaluer.

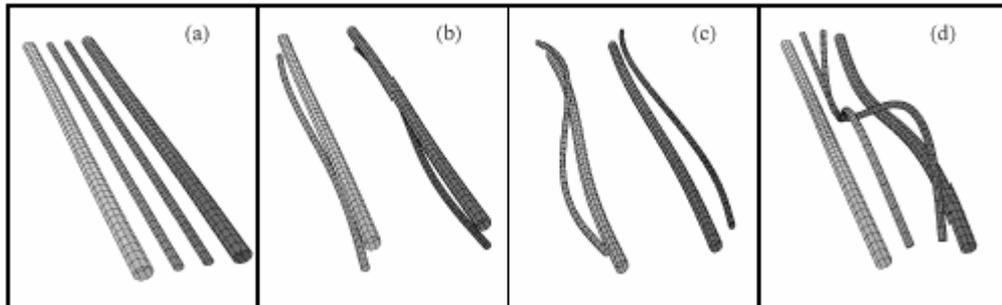


Fig 9 : Analyse théorique de la dynamique d'un sillage formé par deux paires de tourbillons. Les deux petits tourbillons internes tournent en sens inverse par rapport à leurs voisins externes. Sur la figure (a), les tourbillons initiaux sont perturbés par un très faible déplacement (ici avec une amplitude égale à 1/100 ème de la distance qui sépare les tourbillons externes) et de manière "optimale". Compte tenu de son caractère instable, le système à 4 tourbillons amplifie cette perturbation. Pour des conditions typiques d'un avion à l'atterrissage, les figures (b), (c) et (d) correspondent à des distances de 10, 20 et 30 envergures d'aile derrière l'avion. Sur la figure (d), la perturbation a été amplifiée avec un gain environ 10 fois supérieur à celui de l'instabilité classique de Crow qui serait obtenue sans les petits tourbillons internes.

Ce gain augmente alors très rapidement plus en aval (source : Fabre D., Jacquin L. & Loof A, "Optimal Perturbations in a Four-Vortex Aircraft Wake in Counter-Rotating Configuration", J. Fluid Mech, 451, pp. 319-328, 2002)

5. Bibliographie 📖

Articles historiques

- Thomson J.J. (Lord Kelvin), "Vibrations of a columnar vortex", *Phil. Mag.*, 10, 155-168, 1880
- Poincaré, H., "Théorie des tourbillons", Gauthiers-Villars, Paris, 1893
- Rayleigh J.W.S., "On the dynamics of revolving flows", *Proc. R. Soc. Lond. A*, 93, 1916
- Betz A., "Behavior of vortex systems", *NACA Tech. Memo.*, 713, 1932
- Spreiter J.S. & Sacks A.H., "The rolling up of the trailing vortex sheet and its effect on the downwash behind wings", *Journal of the Aeronautical Sciences*, 1, 21-32, 1951
- Crow S.C., "Stability theory for a pair of trailing vortices", *AIAA Journal*, 8 (12), 2172-2179, 1970
- Moore D.W., Saffman P.G., "Axial flow in laminar trailing vortices", *Proc. R. Soc. Lond.*, Ser. A 333, pp. 491-508, 1973

Ouvrages généraux de mécanique des fluides et d'aérodynamique ouvrant sur

le sujet

- Batchelor G.K., "An Introduction to Fluid Dynamics", Cambridge University Press, 1967
- Houghton E.L. & Carter P.W. "Aerodynamics for engineering for students", Fourth edition, Arnold, London, 1993



Mis à jour le 27 juin 2003 - copyright © ONERA 1996-2004 - tous droits réservés
commentaires et suggestions : Sylvain.Gaultier@onera.fr