

Bulletin de l'Union des Physiciens

Association des professeurs de Physique et de Chimie

Avions et tourbillons

par **Jean-Pierre HULIN**

Laboratoire FAST - 91405 Orsay

Etienne GUYON et **Philippe PETITJEANS**

Laboratoire PMMH - ESPCI - 75231 Paris Cedex 05

guyon@pmmh.espci.fr

phil@pmmh.espci.fr

RÉSUMÉ

Les tourbillons émis dans le sillage d'un avion limitent la fréquence des décollages et atterrissages dans des aéroports de plus en plus embouteillés. L'un des grands enjeux des études en mécanique des fluides est le contrôle de ces tourbillons et leur destruction plus rapide. À l'occasion de l'étude de cet exemple concret, nous décrivons la structure d'un vortex et plus particulièrement, dans le cas où le vortex est étiré.

On a entendu évoquer, à la suite d'un récent (et grave) accident d'avion, la possible influence du phénomène de « tourbillon (ou vortex) de bout d'aile »⁽¹⁾. Ce phénomène est mal connu du public mais n'en nécessite pas moins des grandes précautions dans l'organisation des mouvements d'avion près des aéroports. D'un point de vue scientifique, il recouvre un effet intéressant et même assez fondamental.

Tout d'abord, il convient de définir et de donner quelques caractéristiques sur les tourbillons que l'on peut rencontrer dans la nature.

1. LES STRUCTURES TOURBILLONNAIRES

Ces structures tourbillonnaires sont en effet extrêmement fréquentes dans les écou-

(1) Il s'agissait d'un Airbus A300 au décollage de New York. L'enquête est cependant loin d'être terminée et il n'est nullement certain que le phénomène de tourbillon de bout d'aile soit la cause effective et encore moins unique de l'accident.

lements : tout le monde a vu un tourbillon se former en vidant un évier ou en mélangeant de la pâte à crêpes dans un mixeur. Les plus grosses de ces structures se rencontrent sur notre planète dans les écoulements atmosphériques (cyclones et anti-cyclones) qui peuvent atteindre des diamètres de 1 000 km et des vitesses typiques de 100 km/h dans la haute atmosphère. On rencontre aussi de très gros écoulements en rotation dans les océans (tourbillons océaniques) dont les diamètres sont de l'ordre de 100 km, et les vitesses typiques de l'ordre de quelques dizaines de km/h. Les plus petites de ces structures ont aussi une limite, inférieure cette fois, et qui n'est plus imposée par la taille de notre planète, mais plutôt par la viscosité du fluide : en dessous d'une certaine taille, la dissipation visqueuse ne permet plus de maintenir une structure cohérente organisée : toute l'énergie est dissipée sous forme de chaleur dans l'écoulement. À une échelle intermédiaire, les tornades de plusieurs centaines de mètres de haut qui exercent des effets si dévastateurs dans les grandes plaines des USA (cf. par exemple le film « Twister ») sont une illustration très spectaculaire d'une structure tourbillonnaire ou vortex (cf. figure 1). Moins intenses mais potentiellement aussi destructeurs sont les tourbillons engendrés par les avions.



Figure 1 : Photo d'une trombe.

1.1. La ligne de tourbillon

Intuitivement, on voit qu'un vortex peut être bien défini par deux grandeurs : sa taille et sa vitesse périphérique. Écrivons donc que la taille r_0 du cœur d'un vortex est la distance par rapport à l'axe du vortex à laquelle la vitesse azimutale est maximale $V_\theta(r_0) = V_{\theta \max}$. Comme indiqué sur la figure 2 (cf. page ci-contre), au-delà de cette taille r_0 , la vitesse décroît jusqu'à s'annuler « à l'infini ». En dessous de ce diamètre $2r_0$, le cas le plus classique donne une vitesse de type rotation solide.

Une autre grandeur importante à définir est la vorticité ω : elle est égale au rotationnel de la vitesse $\omega = \text{rot} V$. Une autre façon de la comprendre est de l'écrire comme

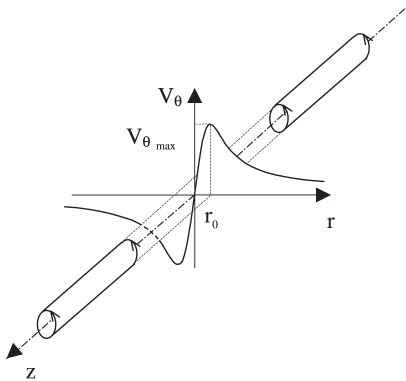


Figure 2 : Exemple de vitesse azimutale d'un vortex $V_\theta(r)$

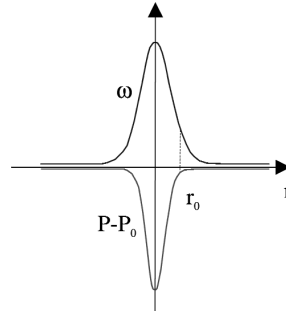


Figure 3 : Profil de vorticité $\omega(r)$ et de pression $P-P_0$ associé au profil de vitesse de la figure 2.

le double de la vitesse angulaire Ω (que l'on nomme aussi parfois « *vecteur tourbillon* ») du vortex. Dans le cas représenté sur la figure 1, la vorticité n'a de composante que parallèlement à l'axe du vortex, et a l'allure donnée sur la figure 3. Dans cet exemple, on observe bien que la vorticité est concentrée dans le cœur du vortex. Nous avons choisi un écoulement en $1/r$ à l'extérieur du cœur. Remarquons que ce champ de vitesse est particulier dans le sens où, bien que dépendant de r , sa vorticité, *i.e.* la composante axiale du rotationnel de la vitesse est nulle : $\omega_z = 1/r \left[\partial/\partial r (V_\theta/r) - \partial V_r/\partial \theta \right] = 0$. Attention, à l'inverse, une vorticité non nulle n'implique pas forcément la présence d'un vortex : un écoulement de cisaillement, tel qu'une simple couche limite⁽²⁾ sur une paroi plane peut être stable jusqu'à des nombres de Reynolds ($Re = U\delta/\nu$) élevés où U est la vitesse, δ l'épaisseur de la couche limite et ν la viscosité cinématique. Pour tous les écoulements tourbillonnaires, la vorticité est une grandeur très importante dans la mesure où c'est elle qui localise les tourbillons et qui donne leur « intensité ». La forme du profil de vitesse $V_\theta(r)$ et de la vorticité $\omega_z(r)$ conduit à l'analogie dite de Helmholtz avec le champ magnétique $H_\theta(r)$ qui induit une distribution de densité de courant $j_\theta(r)$ ($j_\theta(r) = \text{rot} H$). La loi de Biot et Savard reliant la distribution de vitesse à celle de vorticité en découle. Les limites de cette analogie ont été discutées dans plusieurs articles du BUP écrits dans le supplément enseignement supérieur du BUP en 2002, et par G. ROUSSEAU et E. GUYON.

Il est important de noter ici que la taille $2r_0$ d'un tourbillon telle que nous venons de la définir est en général beaucoup plus petite que ce que l'on voit. En clair, lorsque l'on observe un tourbillon, la région autour du cœur du vortex ne tourne que parce qu'elle est entraînée en rotation par le cœur rotationnel, mais ne contient pas de vorticité

(2) Une couche limite est une couche mince qui se développe sur une paroi et qui fait le lien entre la paroi sur laquelle la vitesse est nulle (par adhérence), et l'écoulement extérieur. C'est dans cette couche mince que la viscosité se fait sentir alors qu'elle a un rôle beaucoup plus limité dans le reste de l'écoulement. Cette région est une zone de gradient de vitesse qui produit de la vorticité.

(cf. figure 4). Dans cette région à l'extérieur du cœur du vortex, une particule fluide tourne autour du tourbillon mais ne tourne pas sur elle-même et garde toujours la même orientation. On peut se le visualiser en posant une petite croix solide à la surface d'un tourbillon de baignoire.



Figure 4 : Comparaison entre une visualisation d'un tourbillon (largeur de l'image : 3 cm), et le champ de vorticité mesuré par PIV (Particle image velocimetry ou imagerie par visualisation de particules à deux instants très proches) représenté à la même échelle. Le diamètre du cœur est d'environ 2 mm.

1.2. L'étirement du tourbillon

Un mécanisme important d'amplification de la vorticité et donc d'intensification du vortex est l'étirement : prenez un vortex, tirez dessus dans le sens de sa longueur et il tournera plus vite en diminuant son diamètre pour conserver son moment cinétique. Ceci est l'analogue de la loi de la conservation du moment cinétique en mécanique ; un exemple bien connu est celui de la patineuse qui tourne plus vite sur elle-même lorsqu'elle rapproche les bras de son buste, et plus lentement lorsqu'elle les éloigne. Un exemple de la mécanique des fluides est le tourbillon de vidange que l'on observe lorsque l'on vide une baignoire : on peut en effet observer qu'il tourne plus vite et qu'il est plus petit vers la sortie de la baignoire qu'en surface. D'une manière plus rigoureuse, un étirement γ est induit par une augmentation de la vitesse axiale le long du vortex ($\gamma = \nabla V$). L'équation de la vorticité, qui s'obtient en écrivant le rotationnel de l'équation de Navier-Stokes, s'écrit :

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \omega = (\omega \cdot \nabla) \mathbf{V} + \nu \Delta \omega$$

Le premier terme représente l'évolution temporelle de la vorticité, le second est un terme de transport par convection, le troisième est le terme d'étirement, et le dernier terme représente les effets d'amortissement visqueux. Lorsque l'étirement est parallèle à et de même sens que la vorticité, le terme $(\omega \cdot \nabla) \mathbf{V}$ est positif et amplifie la vorticité $(\partial \omega / \partial t)$ jusqu'à ce que le terme visqueux devienne suffisamment fort pour contrebalancer exactement à l'équilibre le terme d'amplification. Le diamètre $2r_0$ du vortex est obtenu en égalant l'étirement et la dissipation visqueuse : $\gamma \omega = \nu \omega / r_0^2$, soit $r_0 \approx (\nu \gamma)^{1/2}$. L'étirement d'une vorticité disséminée dans l'écoulement permet donc de l'amplifier et de la localiser. Notons ici que la vorticité n'est pas une grandeur qui se conserve (puisque'elle peut être amplifiée par étirement), c'est la circulation $\Gamma = \oint_C \mathbf{U} \cdot d\mathbf{l}$ autour du tourbillon qui est conservée. La circulation sur une courbe C correspond à la vorticité totale à travers celle-ci d'après le théorème de Stokes. En toute rigueur, cette grandeur n'est conservée qu'en l'absence de viscosité.

L'étirement des vortex est un phénomène extrêmement important en mécanique des fluides⁽³⁾ : c'est lui qui, la plupart du temps, est responsable de la présence de structures tourbillonnaires beaucoup plus intenses que ce qui aurait pu être créé par un simple écoulement de cisaillement ou même de rotation. En particulier, on sait maintenant que les étirements locaux de vorticité dans les écoulements turbulents en volume produisent des vortex très intenses et très localisés appelés « filaments de vorticité ». Ces filaments ont été étudiés expérimentalement par O. CADOT, S. DOUADY et Y. COUDER à l'ENS. On pense aujourd'hui qu'une bonne partie de la dynamique de la turbulence se joue à travers ces structures dont on connaît pourtant encore mal les mécanismes, les instabilités, et le rôle réel qu'elles jouent dans ces écoulements. Elles sont de plus le si ge d'instabilités qui pourront imposer la suite de la dynamique turbulente. La compréhension de la formation et du comportement de ces tourbillons filamenteux d'intense vorticité dans les écoulements turbulents est donc d'un très grand intérêt à la fois fondamental et pratique (contrôle, prédiction, ...).

2, LES TOURBILLONS D'AVION

Que peut-il y avoir en commun entre un avion et un tourbillon ? Un avion, ne peut voler qu'en présence d'une circulation de l'air autour de l'aile (cf. figure 5). Cette circulation est à l'origine d'une force dite de Magnus perpendiculaire à l'aile et au mouvement de l'avion - et donc verticale - qui représente la « portance » supportant le poids de l'avion (c'est cette même force qui est à l'origine des mouvements complexes des balles de baseball ou de ping-pong et plus généralement de l'*effet Coanda*) $F_p = \rho \Gamma \wedge U$. L'ordre de grandeur de la circulation Γ pour un avion de ligne est $\Gamma \approx 500 \text{ m}^2/\text{s}$, ce qui donne une portance d'environ 200 tonnes et un nombre de Reynolds typique $Re = \Gamma/v \approx 33.10^6$.

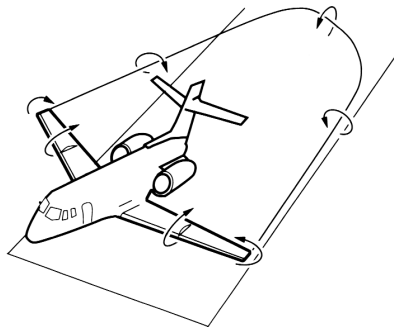


Figure 5 : Structure tridimensionnelle de la distribution de la vorticité autour d'un avion : la ligne de tourbillon incluant l'aile d'avion et le tourbillon de démarrage se referme par deux tourbillons émis aux extrémités de l'aile.

(3) L'article de P. PETIJEANS et F. BOTTAUSCI dans le bulletin de la SFP n  132 (décembre 2001) illustre de façon spectaculaire les phénomènes d'étirement qui amplifient la vorticité et rend compte de l'expérience de la figure 4.

Un théorème fondamental de mécanique des fluides, le théorème de Kelvin [1] qui exprime la conservation de la circulation, indique que cette circulation ne peut pas s'arrêter brusquement aux extrémités de l'aile mais doit se prolonger dans l'air environnant. Elle le fait par deux tourbillons laissés en arrière et dont le cœur est parallèle à la vitesse de l'avion : ce sont les *tourbillons de bout d'aile*. La boucle devrait se refermer par un *tourbillon de démarrage* laissé en arrière au moment de la mise en mouvement de l'avion ; en fait celui-ci disparaît au bout d'un certain temps à cause de la dissipation d'énergie par frottement visqueux.

2.1. On peut les voir...

Ce phénomène peut paraître anecdotique, mais les figures 6 et 7 montrent qu'il peut prendre une grande importance : dans la figure 6 les tourbillons sont visualisés par les déformations induites dans la couche de nuage vers laquelle ils descendent (ils induisent en effet l'un sur l'autre une vitesse dirigée vers le bas).



Figure 6 : Avion Cessna Citation en montée à 300 km/h au-dessus d'une couche de nuages.
(Extrait de *Gallery of Fluid Motion Phys. Fluids A*, 5 septembre 1993).

Derrière les avions de transport au décollage ou à l'atterrissage, on observe facilement ces tourbillons par temps de pluie (ou humide) à cause de la condensation de la vapeur d'eau aux extrémités des ailes (on le voit par exemple lors de la première minute du film « Les bronzés »). Dans la figure 7 (*cf.* page ci-contre), un de ces tourbillons est observé près d'une des ailes d'un avion léger au cours d'expériences effectuées par la NASA.

2.2. Danger tourbillons !!!

Ces tourbillons peuvent représenter un danger (ou au moins une gêne) au moment du décollage et de l'atterrissage. Au vu de la force de ces tourbillons derrière les petits



Figure 7 : Visualisation, par injection de fumée près du sol, du vortex de bout d'aile d'un avion de pulvérisation de produits agricoles (document NASA).

avions sur les figures, on imagine en effet ce qu'ils doivent être derrière un Boeing 747 et bientôt un A380. Un petit avion atterrissant juste derrière serait immédiatement balayé. Ainsi, au cours de vols d'essais, un avion léger suivant le sillage d'un Boeing 747 à 5 km derrière celui-ci tournait autour de son axe à une vitesse d'un tour toutes les deux secondes. La présence de ces tourbillons restait détectable jusqu'à 30 km en arrière !

On doit attendre pour que cette turbulence disparaisse un temps d'autant plus long que l'avion est plus gros : un ajustement de la façon dont on fait se succéder les grands avions et les plus petits dans les procédures de décollage et d'atterrissage est donc nécessaire, et ces derniers ne doivent pas atterrir n'importe où derrière un avion de plus grande taille. La réglementation actuelle fait une différence entre des avions gros porteurs (136 tonnes ou plus) et les moyens porteurs (6 à 136 tonnes). Un avion plus léger atterrissant derrière un gros-porteur doit être à près de 9 km (plus précisément 5 milles nautiques) derrière ; au décollage, il doit attendre au moins deux minutes après le départ du gros-porteur. Curieusement, un avion comme le Boeing 757 qui émet un tourbillon important est considéré par rapport à cette réglementation comme un gros-porteur à l'atterrissage et un moyen-porteur au décollage. Enfin, comme les tourbillons émis sont entraînés vers le bas par la vitesse qu'ils induisent l'un sur l'autre, leur influence se fait sentir plutôt en dessous de la trajectoire de l'avion : on évalue empiriquement la gamme d'altitudes correspondante à 200 m. Les avions de transport rencontrent quotidiennement la turbulence de sillage des autres appareils : cependant, si les précautions décrites plus haut sont respectées, on ressent seulement un très bref déséquilibre, et des accidents dus à ces effets n'ont été formellement identifiés que dans le passé. De ce point de vue, les perturbations qu'ils provoquent posent moins de problème que certains mouvements internes de l'atmosphère importants même par temps clair.

Le temps de dissipation de ces tourbillons de bout d'aile n'en représente donc pas

moins un des facteurs importants qui limitent les cadences d'atterrissage des avions de transport sur les grands aéroports. Plusieurs stratégies ont été envisagées pour accélérer cette disparition : dissipation de leur énergie (récupérable ensuite) par des petites turbines placées en bout d'aile voire même utilisation d'ailes en anneau (donc sans extrémités). D'ores et déjà, la présence de petits ailerons inclinés (les « winglets ») au bout de certains avions récents semble apporter une amélioration.

2.3. Mais quelquefois ça aide...

Les tourbillons de bout d'aile n'ont cependant pas que des conséquences néfastes. Certains oiseaux utilisent le fait que le champ de vitesse ainsi induit présente dans des endroits bien choisis une composante dirigée vers le haut pour économiser de l'énergie lorsqu'ils volent « en formation » : un exemple bien connu est le vol de groupe en « V » des pélicans ou des oies sauvages. Des essais sont même en cours pour appliquer ce principe au vol en formation d'avions militaires sur de longues distances : des essais sur des avions F18 ont démontré une économie de carburant de plus de 10 %. La difficulté vient bien sûr de la nécessité de maintenir un positionnement relatif très précis des appareils : les systèmes électroniques et informatiques nécessaires sont en cours de développement dans le cadre du projet « Autonomous formation flight (AFF) » de la NASA.

2.4. Un point de vue plus fondamental

Plus en amont, des études sont actuellement poursuivies pour comprendre le mécanisme de déstabilisation et de désintégration de ces tourbillons. Le sillage est représenté d'une manière simplifiée par deux tourbillons parallèles et de circulations en sens contraire placés dans un écoulement (lui-même turbulent). Ces paires de tourbillons contrarotatifs sont caractérisés par leur séparation, par le rayon du « cœur » et par la circulation de la vitesse du fluide autour de celui-ci. Ces études s'attachent à identifier les modes d'instabilité de ce système de tourbillons, leur longueur d'onde et leur mode de croissance. On distingue ainsi des modes de grande et courte longueur d'onde. Les premiers sont dus au couplage entre les champs de vitesse induit par chaque tourbillon sur lui-même et sur l'autre tourbillon⁽⁴⁾. Par ces mécanismes, les lignes se courbent, ce qui contribue à induire encore des nouvelles composantes de champ de vitesse. Les lignes tournent sur elles-mêmes pour aboutir à un mouvement complexe et désordonné (appelé instabilité de Crow). Aux courtes longueurs d'onde, de l'ordre de grandeur de la taille du cœur de tourbillon, l'instabilité résulte de l'effet d'étirement d'un des vortex par le gradient du champ de vitesse induit par le second : la section, initialement circulaire du cœur de tourbillon est alors déformée [2]. Ces instabilités spatio-temporelles sont particulièrement présentes

(4) Ces champs de vitesse peuvent être décrits par l'application de la loi de « Biot et Savart hydrodynamique ». On pourra lire à ce propos l'ouvrage collectif *Vortex structure and dynamics* édité par A. MAUREL et P. PETITJEANS dans la série lectures notes in Physics (Springer Verlag, 2000) et plus particulièrement l'article : « Absolute/convective instabilities and spatial growth in a vortex pair » de D. FABRE, C. COSSU et L. JACQUIN, p. 162-172.

dans les champs de vitesse turbulents. Elles ont pratiquement un effet très utile puisqu'elles contribuent à accélérer la dispersion des tourbillons émis à partir des bouts d'aile et dont nous avons vu la nocivité pour les avion suiveurs. Dans le cas de très gros porteurs actuellement à l'étude, la création de vortex secondaires émis près des vortex primaires de bout d'aile et induisant l'instabilité des vortex primaires sur des distances plus courtes que l'instabilité de Crow apparaît comme une solution pour diminuer l'espace-ment des décollages et atterrissage.

2.5. Un contrôle actif des tourbillons

On peut aussi imaginer de provoquer l'apparition de ces instabilités et d'en renforcer l'effet par des actions telles que l'injection de fluide en jets au niveau des ailes ou l'introduction de pièces tournantes sur celles-ci. Ces approches rentrent dans le cadre plus générale du contrôle actif et passif des instabilités, qui représente actuellement un domaine de recherches extrêmement actif et riche d'applications potentielles⁽⁵⁾. On pourrait par de telles méthodes contrôler et/ou provoquer le développement de ces instabilités de façon à promouvoir une dissipation rapide de cette dangereuse turbulence.



Jean-Pierre HULIN

Directeur de recherche au CNRS
Laboratoire Fast - Université Paris-Sud
Bât. 502 - Campus Universitaire
91405 Orsay Cedex



Étienne GUYON

Professeur à l'Université Paris-Sud, Orsay
Laboratoire PMMH - ESPCI
10, rue Vauquelin
75231 Paris Cedex 05



Philippe PETITJEANS

Chargé de recherche au CNRS
Laboratoire PMMH - ESPCI
10, rue Vauquelin
75231 Paris Cedex 05

(5) Dans le domaine différent - mais relié - de l'apparition de l'allée de tourbillons de Bénard von Karman derrière un obstacle cylindrique (cette fois-ci les tourbillons sont parallèles à l'obstacle), un groupe de l'ESPCI (B. PROTAS et J.E. WESFRED *Physics of fluids* **14** 810 2002) a montré récemment qu'on peut contrôler l'émission de tourbillons en faisant tourner l'obstacle à une fréquence correspondant à celle de l'émission naturelle des tourbillons) et ainsi diminuer la traînée, tandis qu'un autre article propose de placer des cylindres tournant en sens inverse sur les bords de l'obstacle (G.W. WEI and P. PATNACK *Phys. Rev. Lett.* **14** 810 2002).

REMERCIEMENTS

Nous avons bénéficié des conseils avisés de Emmanuel GUYON et de Laurent JACQUIN sur la partie aérodynamique ainsi que de l'ensemble de nos collègues de l'équipe turbulence du laboratoire PMMH.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] GUYON E., HULIN J.-P. et Petit L. *Hydrodynamique physique*. Chapitres 6 et 9, EDP-Sciences, Éditions du CNRS, 2^e édition, 2001.
- [2] TSAI C.Y. et WIDNALL S.E. *Journal of Fluid Mechanics*. 1976, 73, 721.