HAL
open science

Transition trainée-propulsion et brisures de symétrie dans le sillage d'un aileron oscillant

Ramiro Godoy-Diana, Jean-Luc Aider, José Eduardo Wesfreid

To cite this version:

Ramiro Godoy-Diana, Jean-Luc Aider, José Eduardo Wesfreid. Transition trainée-propulsion et brisures de symétrie dans le sillage d'un aileron oscillant. 2007, Grenoble, France. pp.0. hal-00153910

HAL Id: hal-00153910

https://hal.science/hal-00153910v1

Submitted on 12 Jun 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Transition traînée–propulsion et brisures de symétrie dans le sillage d'un aileron oscillant

Ramiro Godoy-Diana, Jean-Luc Aider & José Eduardo Wesfreid

Physique et Mécanique des Milieux Hétérogènes
PMMH UMR 7636 CNRS ; ESPCI ; Paris6 ; Paris7
10, rue Vauquelin, F-75231 Paris Cedex 5, France
`ramiro@pmmh.espci.fr`

Résumé :

Nous étudions les allées tourbillonnaires produites par un aileron oscillant dans un canal hydrodynamique, à l'aide de la vélocimétrie par images de particules (PIV). Une étude paramétrique en fonction de la fréquence adimensionnelle (le nombre de Strouhal) et l'amplitude du battement de l'aileron a permis d'identifier : 1) la transition entre une allée type Bénard-von Kármán (BvK) et l'allée inversée typique des sillages propulsifs ; et 2) la brisure de symétrie de cette allée inversé donnant lieu à un sillage asymétrique. Une estimation de la force de traînée moyenne sur l'aileron est obtenue à partir d'un bilan de quantité de mouvement utilisant les mesures PIV de champ de vitesse moyenne en aval de l'aileron. Nous montrons que la transition observée dans la structure du sillage entre une allée de BvK et une allée inversée se fait avant la transition traînée–propulsion.

Abstract :

We study experimentally the vortex streets produced by a flapping foil in a hydrodynamic tunnel, using 2D Particle Image Velocimetry (PIV). A novel analysis in terms of a flapping frequency-amplitude phase space allows to identify: 1) the transition from the well-known Bénard-von Kármán (BvK) wake to the reverse BvK vortex street that characterizes propulsive wakes, and 2) the symmetry breaking of this reverse BvK pattern giving rise to an asymmetric wake. We also show that the transition from a BvK wake to a reverse BvK wake precedes the actual drag-thrust transition and we discuss the significance of the present results in the analysis of flapping systems in nature.

Mots-clefs :

flapping ; vortex streets ; propulsion

1 Introduction

Le contrôle des tourbillons de sillage en vue de la génération de forces propulsives est la tâche quotidienne des poissons, insectes et autres animaux se déplaçant à l'aide d'extrémités battantes. C'est aussi le but des mécanismes artificiels s'inspirant des systèmes biologiques pour produire des force de propulsion et manoeuvrabilité (voir e.g. Triantafyllou *et al.*, 2004). Un trait qui apparaît dans presque toutes configurations mettant en jeu des ailerons oscillants pour la génération de propulsion est, dans le cas 2D, l'apparition d'une allée tourbillonnaire où le signe de la vorticité dans le coeur de chaque tourbillon est inversé par rapport à l'allée de Bénard-von Kármán (BvK) classique derrière un obstacle dans un courant moyen. Ces *allées de BvK inversées* ont été observées dans le sillage d'animaux nageurs (e.g. Drucker & Lauder, 2001) mais aussi étudiées en détail avec des modèles de laboratoire (e.g. Koochesfahani, 1989; Parker *et al.*, 2005; Buchholz & Smits, 2006) et des simulations numériques (e.g. Blondeaux *et al.*, 2005). Le profil de vitesse moyen correspondant à ces allées inversées a la forme d'un jet qui est associé à la creation d'une force propulsive. Les propriétés de stabilité de cet écoulement

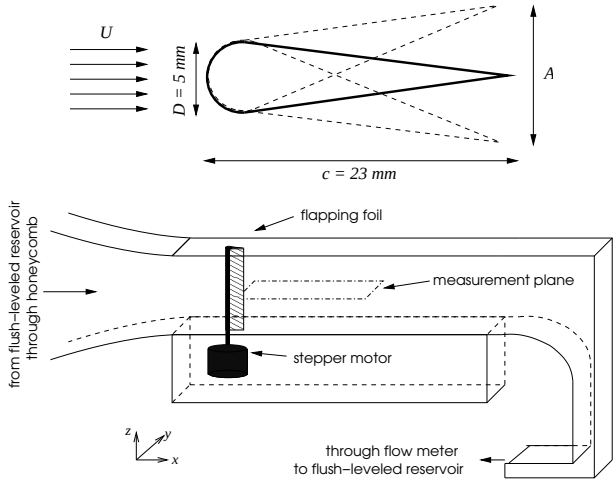


FIG. 1 – Diagramme schématique de l'aileron et du tunnel hydrodynamique (Godoy-Diana *et al.*, 2007). La corde de l'aileron c est de 23mm et sa largeur est de 100mm ce qui correspond à toute la hauteur du tunnel. Le profil de l'aileron est symétrique, s'ouvrant au bord d'attaque comme un demi-cercle de diamètre $D = 5$mm, qui est aussi l'épaisseur maximum de l'aileron. L'axe d'oscillation est piloté par un moteur pas-à-pas.

moyen de jet semblent être étroitement liées à l'efficacité de l'aileron battant Triantafyllou *et al.* (1991).

Les systèmes avec des ailes battantes, artificiels ou naturels, sont en général décrits en fonction d'un paramètre unique, le nombre de Strouhal $St_A = fA/U$, défini en fonction de la fréquence f et l'amplitude A du battement et de la vitesse de croisière U. Des expériences de laboratoire avec des ailerons oscillants (Anderson *et al.*, 1998) ont montré que l'efficacité propulsive a un maximum localisé toujours dans l'intervalle $0.2 < St_A < 0.4$. D'autre part, des données compilées par Triantafyllou *et al.* (1991); Taylor *et al.* (2003) montrent que le nombre de Strouhal pour une grande gamme d'animaux nageurs et volants en régime de croisière est aussi contenu dans cet intervalle, ce qui n'est pas surprenant si l'on pense qu'au cours de l'évolution la sélection naturelle a du préserver les animaux dont l'efficacité propulsive était maximale. Néanmoins, les raison physiques déterminant que certaines configurations de battement, avec leurs signatures de vorticité associées, soient le choix optimal pour une génération efficace de propulsion sont beaucoup moins claires.

Même si la nature 3D des écoulements réels joue un rôle important dans la plupart des systèmes avec des ailes battantes, une représentation quasi-bidimensionnelle du sillage contient souvent des éléments dynamiques clés, comme la création et organisation de la vorticité, qui sont cruciaux pour le compréhension de ces sillages propulsifs (Wang, 2000; Minotti, 2002; Protas & Wesfreid, 2003; Alben & Shelley, 2005). Afin d'identifier les mécanismes dynamiques de base associés à ces allées inversées, nous étudions l'écoulement derrière un aileron oscillant dans un canal hydrodynamique.

2 Montage expérimental

Le montage est constitué par un aileron de rapport d'aspect 4 :1 monté sur un axe oscillant par un des côtés longs et placé dans un canal hydrodynamique (voir figure 1). Les paramètres de contrôle de l'expérience sont la fréquence (f) et l'amplitude (A) de l'oscillation ainsi que la vitesse de l'écoulement dans la veine (U). Les paramètres adimensionnels sont alors le nombre de Reynolds Re, l'amplitude du battement A_D et le nombre de Strouhal St, définis respectivement

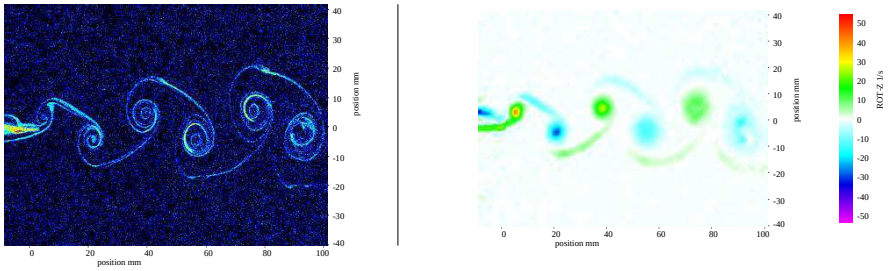


FIG. 2 – Visualisation par injection de colorant (à gauche) et champ instantané de vorticité calculé à partir des mesures PIV (à droite) pour $Re = 255$, $A_D = 1.42$ et $St = 0.15$. Le champ visuel (placé à mi-hauteur de l'aileron) va de -2D à 20D sur l'horizontale (x) et de -8D à 8D sur la verticale (y) ou l'origine est défini au bord de fuite pour l'aileron à angle d'incidence nulle.

comme

$$Re = UD/\nu \ , \quad A_D = A/D \quad \text{and} \quad St = fD/U \ . \tag{1}$$

où D est l'épaisseur de l'aileron et ν est la viscosité cinématique. Nous définissons le nombre de Strouhal utilisant une échelle de longueur fixe (l'épaisseur D) à la place du déplacement maximal du bord de fuite A qui est utilisé habituellement, de tel sorte que chaque paramètre adimensionnel corresponde à un paramètre physique, ce qui rend plus claire l'interprétation des régimes observés. L'outil de mesure est la vélocimétrie par images de particules (PIV) 2D dans le plan horizontal de symétrie de l'aileron [1]. Nous comparons dans la figure 2 un champ de vorticité instantané calculé à partir des champs de vitesse obtenus par PIV avec une visualisation par deux filets de colorant injectés en amont de l'aileron.

3 Le sillage de l'aileron oscillant

Pour un nombre de Reynolds donné, 255 dans les expériences qu'on décrit ici, un point dans l'espace de paramètres (St, A_D) définit la configuration du battement et correspond à une signature de vorticité dans le sillage de l'aileron. Une étude paramétrique en fonction du nombre de Strouhal et de l'amplitude adimensionelle permet de caractériser les différents régimes dans cet espace de phase (St, A_D) et de localiser les zones de transition. On montre sur la figure 3 les trois régimes principaux identifiés à l'aide de clichés instantanés de la vorticité parallèle à l'axe d'oscillation et du champ moyen de vitesse horizontale. Le cas sur la colonne de gauche ($A_D = 0.36$) est le cas typique de battement à faible amplitude, qui produit un sillage forcé ressemblant à l'allée de Bénard-von Kármán (BvK) naturel, mais avec une fréquence d'émission tourbillonnaire accrochée à la fréquence du battement (voir aussi Vial *et al.*, 2004; Thiria *et al.*, 2006; Thiria & Wesfreid, 2007). En particulier, la vorticité engendrée dans les couches limites de chaque côté de l'aileron forme des tourbillons qui, dans leur évolution en aval, resteront du même côté de la ligne de symétrie du sillage (l'axe horizontal). L'écoulement moyen qui correspond à ce cas est le profil typique de sillage avec un déficit de vitesse derrière l'obstacle. Dans la colonne du milieu ($A_D = 1.07$), les tourbillons engendrés sur un côté de l'aileron s'organisent dans le sillage de l'autre côté de la ligne de symétrie, constituant l'allée de BvK inversée. Cette transition est vue sur l'écoulement moyen comme le passage d'un déficit de

[1] L'acquisition d'images et le calcul de PIV a été fait avec un système LaVision avec une caméra CCD ImagerPro 1600 × 1200 12-bit enregistrant des paires d'images à ∼ 15Hz et un laser pulsé de Nd :YAG de 15mJ. L'épaisseur de la nappe laser était d'environ 1mm sur toute une aire de 100mm × 80mm. L'écart temporel entre les deux images de chaque pair (dt) a été fixé à 12ms et la taille de la fenêtre d'interrogation à 16 × 16 avec un recouvrement de 50%.

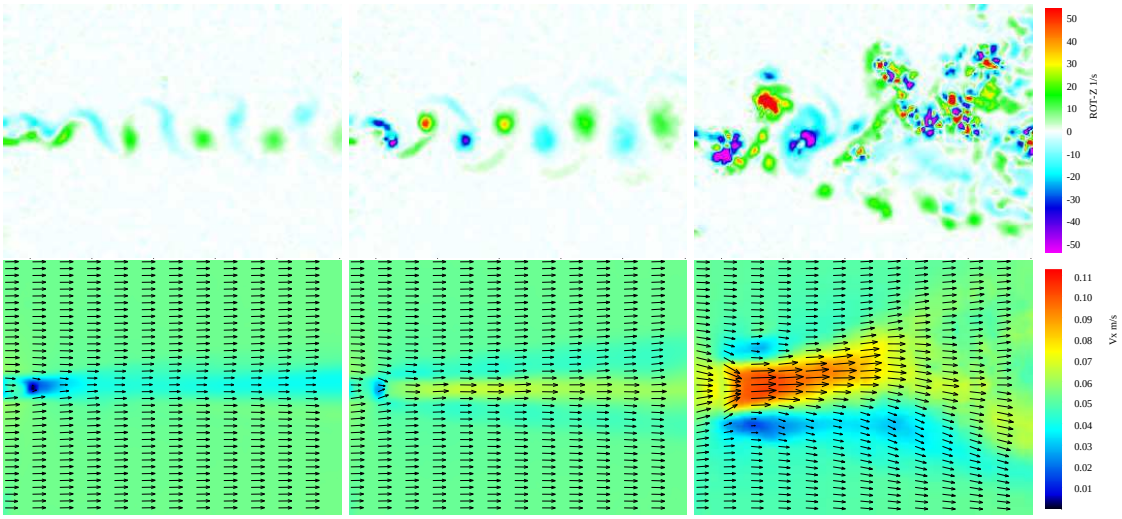


FIG. 3 – Champs instantanés de vorticité (première ligne) et écoulement moyen (moyenne temporelle de la vitesse horizontale, deuxième ligne) pour $St = 0.22$ et $Re = 255$ et, de gauche à droite, pour $A_D = 0.36, 1.07$, et 2.8. Le champ visuel est le même que pour la figure 2.

vitesse vers un excès de vitesse derrière l'obstacle. Finalement, dans le troisième régime la symétrie du sillage est brisé en raison de la création d'un dipôle à chaque période d'oscillation de l'aileron qui produit une déviation du jet moyen.

3.1 Le diagramme de phase (St, A_D)

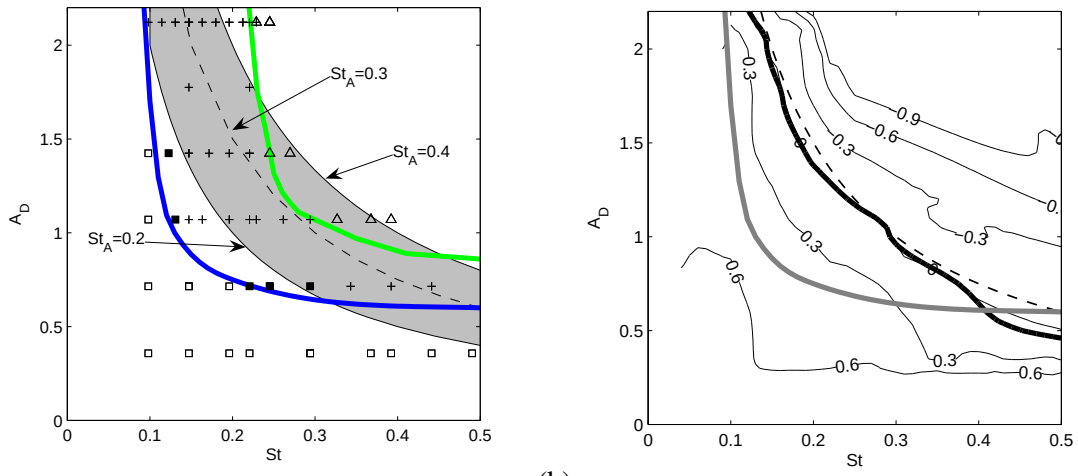
Sur la figure 4.a nous montrons le diagramme de phase de l'expérience à $Re = 255$ où les différents symboles représentent différents types de sillage. Les expériences où un sillage de type BvK a été observé (symboles $\square$) occupent principalement la partie gauche et inférieure du diagramme mais ils s'étendent aux valeurs plus grandes de St par l'amplitude plus petite. La transition entre le régime BvK et le régime BvK inversé est représenté par la ligne bleue dans la figure 4.a. La zone de BvK inversé (symboles $+$) est limitée de l'autre côté par la transition vers des sillages asymétriques (symboles $\triangle$) et elle est représentée par la ligne verte sur la figure 4.a.

3.2 Une estimation de la force horizontale

On obtient une estimation indirecte de la traînée moyenne utilisant un bilan de quantité de mouvement dans un volume de contrôle contenant l'aileron à partir des champs de vitesse horizontale moyenne. Cela donne (voir e.g. Batchelor (1967), pp.349-351) :

$$F_D = \rho U_0 \int (U_0 - u(y))dy \ , \tag{2}$$

où ρ est la densité de l'eau, U_0 est la vitesse au centre du tunnel loin en amont de l'aileron et $u(y)$ est un profil de vitesse mesuré dans le sillage. Une surface du coefficient de traînée C_D/C_{D0} obtenue par interpolation dans l'espace de paramètres (St, A_D) est tracé comme iso-contours dans la figure 4.b. Le coefficient de traînée $C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho U_0^2 D}$ (normalisé par sa valeur pour l'aileron statique à incidence nulle C_{D0}) permet d'identifier la courbe dans l'espace (St, A_D) où C_D change de signe marquant la transition entre le régime de traînée et le régime propulsif (ligne foncée sur la figure 4.b).



(a) (b)

FIG. 4 – (a) Points expérimentaux sur un espace A_D vs. St pour $Re = 255$. □ : régime BvK ; ■ : transition BvK-BvK inversé ; + : BvK inversé ; △ : régime asymétrique. Ligne bleue : transition BvK-BvK inversé. Ligne verte : transition BvK inversé-sillage asymétrique. La zone grise corresponde à $St_A = 0.3 \pm 0.1$ où $St_A = St \times A_D$. (b) Contours de C_D/C_{D0}. La ligne noire foncée correspond à $C_D = 0$ où la transition traînée–propulsion estimée a lieu. La ligne grise reproduit la ligne bleue en (a). La ligne pointillée correspond à $St_A = 0.3$. (D'après Godoy-Diana *et al.*, 2007).

4 Conclusions

Une étude paramétrique en fonction de la fréquence adimensionnelle (le nombre de Strouhal) et l'amplitude du battement de l'aileron a permis d'identifier : 1) la transition entre une allée type Bénard-von Kármán (BvK) et l'allée inversée typique des sillages propulsifs ; et 2) la brisure de symétrie de cette allée inversé donnant lieu à un sillage asymétrique. Une estimation de la force de traînée moyenne sur l'aileron a été obtenue à partir d'un bilan de quantité de mouvement utilisant les mesures PIV de champ de vitesse moyenne en aval de l'aileron. On a montré que la transition observée dans la structure du sillage entre une allée de BvK et une allée inversé se fait avant la transition traînée–propulsion dans l'espace de phase fréquence–amplitude (figure 4.b).

En guise de conclusion on revient sur les régimes propulsifs par battement d'ailerons rencontrés dans la nature, où la nage de poisson et le vol battu se font pour $St_A = 0.3 \pm 0.1$, St_A étant le nombre de Strouhal basé sur l'amplitude du battement. En fonction des paramètres utilisés ici, $St_A = St \times A_D$, de telle sorte que l'intervalle précédente représente une région délimitée par des hyperboles dans l'espace de phase (St, A_D) (aire grise sur la figure 4.a). On remarque que la transition traînée–propulsion montrée sur la figure 4.b est très proche de la courbe de $St_A = 0.3$ (ligne pointillée) qui caractérise la propulsion animale, indiquant que les conclusions obtenus avec le modèle de battement étudié ici devraient être pertinentes dans l'étude des systèmes naturels.

Références

ALBEN, S. & SHELLEY, M. 2005 Coherent locomotion as an attracting state for a free flapping body. *Proc. National Ac. Sci. (USA)* **102** (32), 11163–11166.

ANDERSON, J. M., STREITLIEN, K., BARRET, D. S. & TRIANTAFYLLOU, M. S. 1998 Oscillating foils of high propulsive efficiency. *J. Fluid Mech.* **360**, 41–72.

BATCHELOR, G. K. 1967 *An introduction to fluid dynamics*. Cambridge University Press.

BLONDEAUX, P., FORNARELLI, F., GUGLIELMINI, L., TRIANTAFYLLOU, M. S. & VERZICCO, R. 2005 Numerical experiments on flapping foils mimicking fish-like locomotion. *Phys. Fluids* **17** (11).

BUCHHOLZ, J. H. J. & SMITS, A. J. 2006 On the evolution of the wake structure produced by a low-aspect-ratio pitching panel. *J. Fluid Mech.* **546**, 433–443.

DRUCKER, E. G. & LAUDER, G. V. 2001 Locomotor function of the dorsal fin in teleost fishes : experimental analysis of wake forces in sunfish. *J. Exp. Biol.* **204**, 2943–2958.

GODOY-DIANA, R., AIDER, J. L. & WESFREID, J. E. 2007 Transitions in the wake of a flapping foil. *Preprint :* arXiv.org > physics/0702219.

KOOCHESFAHANI, M. M. 1989 Vortical patterns in the wake of an oscillating airfoil. *AIAA J.* **27** (9), 1200–1205.

MINOTTI, F. O. 2002 Unsteady two-dimensional theory of a flapping wing. *Phys. Rev. E* **66**, 051907.

PARKER, K., VON ELLENRIEDER, K. D. & SORIA, J. 2005 Using stereo multigrid DPIV (SMDPIV) measurements to investigate the vortical skeleton behind a finite-span flapping wing. *Exp. Fluids* **39**, 281–298.

PROTAS, B. & WESFREID, J. E. 2003 On the relation between the global modes and the spectra of drag and lift in periodic wake flows. *C.R. Mécanique* **331**, 49–54.

TAYLOR, G. K., NUDDS, R. L. & THOMAS, A. L. R. 2003 Flying and swimming animals cruise at a strouhal number tuned for high power efficiency. *Nature* **425**, 707–711.

THIRIA, B., GOUJON-DURAND, S. & WESFREID, J. E. 2006 Wake of a cylinder performing rotary oscillations. *J. Fluid Mech.* **560**, 123–147.

THIRIA, B. & WESFREID, J. E. 2007 Stability properties of forced wakes. *J. Fluid Mech.* In press.

TRIANTAFYLLOU, M. S., TECHET, A. H. & HOVER, F. S. 2004 Review of experimental work in biomimetic foils. *IEEE J. Ocean. Eng.* **29** (3), 585–594.

TRIANTAFYLLOU, M. S., TRIANTAFYLLOU, G. S. & GOPALKRISHNAN, R. 1991 Wake mechanics for thrust generation in oscillating foils. *Phys. Fluids A* **3** (12), 2835–2837.

VIAL, M., BELLON, L. & HERNÁNDEZ, R. H. 2004 Mechanical forcing of the wake of a flat plate. *Exp. Fluids* **37**, 168–176.

WANG, Z. J. 2000 Two dimensional mechanism for insect hovering. *Phys. Rev. Lett.* **85** (10), 2216–2219.