HAL
open science

Étude expérimentale des interactions hydrodynamiques survenant lors de la nage anguilliforme dans une allée Bénard Von-Karman

Younes Matar, Fabien Candelier, Camille Solliec, A. Isjpeert, F. Boyer

To cite this version:

Younes Matar, Fabien Candelier, Camille Solliec, A. Isjpeert, F. Boyer. Étude expérimentale des interactions hydrodynamiques survenant lors de la nage anguilliforme dans une allée Bénard Von-Karman. CFM 2013 - 21ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2013, Bordeaux, France. hal-03439851

HAL Id: hal-03439851

https://hal.science/hal-03439851v1

Submitted on 22 Nov 2021

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.

Étude expérimentale des interactions hydrodynamiques survenant lors de la nage anguilliforme dans une allée de type Bénard von-Kàrmàn.

Y. Matar[a], F. Candelier[b], C. Solliec[a], A. Ijspeert[c] et F. Boyer[d]

a. *École des Mines de Nantes, France - GEPEA (UMR CNRS 6144)*
b. *Université Aix-Marseille, France - IUSTI (UMR CNRS 7343)*
c. *École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse - Biorob*
d. *École des Mines de Nantes, France - IRCYyN (UMR CNRS 6597)*

Résumé :

L'objectif de ce travail, inscrit dans le cadre d'un projet Européen nommé "ANGELS", est d'étudier les forces hydrodynamiques survenant lors de la nage de poissons de type anguilliforme (i.e. poissons qui font onduler leurs corps pour se propulser) dans une allée de vortex de type Benàrd von-Kàrmàn (notée BvK). Cet écoulement est habituellement observé en aval d'un obstacle ou dans le sillage d'un poisson. Les poissons qui se trouvent dans des situations similaires adaptent leur comportement de nage, et peuvent sous certaines conditions optimiser leurs performances hydrodynamiques. Les expériences ont été réalisées sur la nage d'un robot de l'EPFL, inspiré de la Lamproie nommé « AMPHIBOT III ». Pour réaliser cette étude, nous avons conçu un système d'oscillation à double aileron permettant de générer dans son sillage deux allées de type BvK inversées, constituant ainsi, entre eux, une allée de type BvK. Les expériences menées sur le robot permettent de réaliser une étude paramétrique de la force hydrodynamique de propulsion, mesurée à l'aide d'un capteur de force, pour différentes configurations entre le robot et l'allée de vortex. Les résultats montrent que pour une même loi de déformation (loi de nage), la force de propulsion générée, en comparaison avec le cas de l'écoulement uniforme, peut sous certaines conditions être augmentée de près de 30 %.

Abstract :

The goal of this work, supported by an European project called "ANGELS", is to study the hydrodynamic interaction acting on the swimming of an anguilliform robot in a non-uniform flow, such as, BvK street. This kind of flow is generally produced downstream of an obstacle or in the wake of fishs during swimming. In these conditions it has been observed that fish adapt their kinematics, and under certain conditions their swimming performances can be increased. Experiments were carried out on a robot, from EPFL university, inspired from the Lamprey, called « AMPHIBOT III ». To realize this study we have designed and construct a double flapping foils system, in which is obtained a BvK vortex street by combining the two reverse BvK produced in the wake of each foil. Experiments led on the robot have allowed us to realized a parametric study on the propulsive force, measured by using a force sensor, for different configuration (position) of the robot in the BvK street. Results show that under certain conditions, the propulsive force of the robot swimming in a BvK vortex street can be increased of about 30 %, in comparison of its swimming in a uniform flow.

Mots clefs : Nage anguilliforme ; interactions hydrodynamiques ; allée de von-Kàrmàn

1 Introduction

En milieu naturel, les espèces aquatiques évoluent souvent dans des écoulements complexes. Par exemple, il a été observé que les poissons nageant dans des fleuves cherchent refuge, contre les courants rapides, dans des régions à basse vitesse. D'après ces observations, la compréhension de l'effet

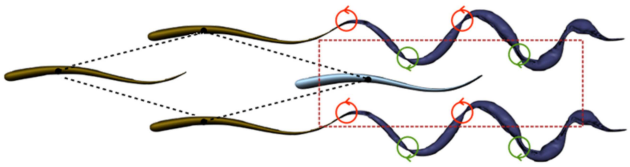

FIGURE 1 – Illustration de la nage en groupe comme décrite par [2]. Le losange pointillé montre la formation en losange et le rectangle en pointillé montre l'allée BvK obtenue entre deux allées de BvK inversées.

des interactions hydrodynamiques, produites lors de la nage dans des écoulements non-uniforme, sur la dynamique externe du corps, a suscité un intérêt croissant d'une large partie de la communauté scientifique. Depuis, plusieurs études en laboratoire ont été réalisées sur la nage de poisson dans un écoulement tourbillonnaire. Pour plus d'information sur la nage dans un écoulement perturbé, le lecteur se rapportera à l'article de synthèse référencé [1].

Les interactions hydrodynamiques jouent aussi un rôle important lors de la nage en groupe organisé. D'une manière générale, dans ce cas, les poissons qui se trouvent en aval, bénéficient de l'écoulement tourbillonnaire par rapport au poisson de tête. En effet, l'une des formations de nage en groupe observée chez les poissons est la formation dite en losange [2], illustrée sur la figure 1. Dans cette configuration, les deux poissons nageant côte à côte génèrent chacun dans leurs sillages une allée de type BvK inversée et le poisson amont, synchronise avec eux, doit se positionner en aval, au milieu et à une distance bien définie, afin de profiter de l'énergie de l'écoulement incident. Ce mécanisme peut théoriquement augmenter la force de propulsion d'environ 10 à 30 %, sans dépense d'énergie supplémentaire (c.f. [2] et [3]).

L'objectif de ce travail est d'étudier les interactions hydrodynamiques survenant lors de la nage d'un robot anguilliforme dans un écoulement non-uniforme de type BvK. Pour ce faire, nous avons conçu un système oscillant à double aileron générant une allée BvK à partir de deux allées BvK inversées. Nous avons effectué une étude paramétrique de la force hydrodynamique de propulsion du robot, afin d'identifier l'effet des vortex sur l'efficacité hydrodynamique de la nage.

2 Instrumentations et méthodes

Les expériences ont été réalisées dans un banc d'essais à recirculation d'eau. Celui-ci est composé d'un bassin de 6 m de longueur, 1.1 m de hauteur et 0.8 m de largeur. Une large fenêtre de visualisation en PMMA est placée sur un côté afin de réaliser des mesures PIV (vélocimétrie par images de particules). Une turbine placée dans la partie inférieure propulse l'eau afin de créer un écoulement continu et uniforme dans le banc d'essai (c.f. [4]).

2.1 Système d'oscillation à double aileron

Le système d'oscillation à double aileron est composé de trois parties : (1) Un servomoteur rotatif "Sigma 5" de la marque "OMRON", d'une puissance de 400 W (fréquence et amplitude d'oscillation variables) et sa partie commande. (2) Deux ailerons de dimensions identiques, dont la corde est $C_a = 14.4\ cm$, l'épaisseur au niveau du cylindre est $D_a = 1.5\ cm$ (diamètre du cylindre), et sa hauteur est $h_a = 40\ cm$ (voir 2 c). (3) Un système mécanique (voir figure 2 a et b) a été conçu pour obtenir essentiellement une oscillation en phase des deux ailerons (l'angle formé entre les deux ailerons est nul).

2.2 Robot Amphibot III et instrumentation

Amphibot III est un robot inspiré de la lamproie. Il a été conçu par le l'équipe BIOROB de l'**E**cole **P**olytechnique **F**édérale de **L**ausanne **EPFL** (c.f. [5]). Dans notre cas, la loi d'ondulation imposée au robot est une fonction sinusoïdale de fréquence $f_r = f_a$, de longueur d'onde égale à la longueur du

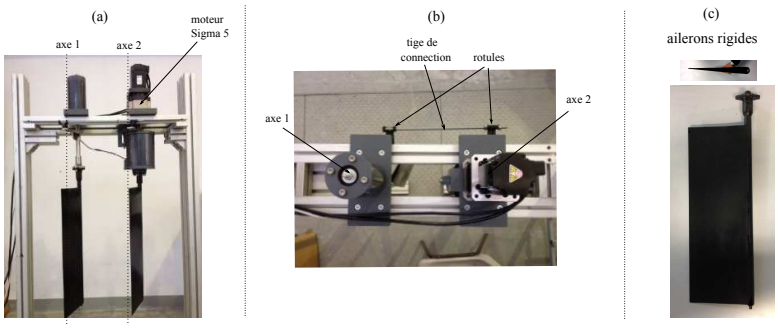

FIGURE 2 – Photographies du système d'oscillation à double ailerons : vue aval (a), vue de dessus (b) et aileron rigide (c).

robot $\lambda_r = L_r$ ($L_r = 0.56m$) et d'amplitude croissante (exponentiellement) de la tête (où elle est quasi-nulle) vers la queue (amplitude maximale $A_r = L_r/6$).

Le robot est relié à un capteur de force à l'aide d'une tige rigide, fixée sur le deuxième module (du robot) proche de la tête. Il est placé en position médiane dans le sillage des ailerons, à mi-profondeur de la section de travail (voir figure 3).

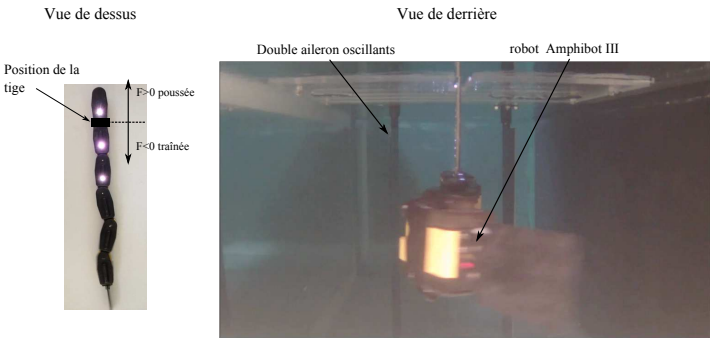

FIGURE 3 – Photographies du robot Amphibot III. À gauche, vue de dessus. À droite, photographie sous marine de la nage du robot dans l'allée tourbillonnaire des ailerons.

2.3 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est représenté sur le schéma de la figure 4. La section d'étude est de longueur 1.5 m, de largeur 0.6 m et de hauteur 0.45 m. Le système d'oscillation est fixé sur les bords du banc d'essai. L'instrumentation nécessaire pour effectuer des mesures PIV ainsi que les mesures de forces est installée au dessus du banc.

Pour la PIV, le champ qui nous intéresse est le plan longitudinal en aval des ailerons à mi-hauteur entre la surface libre et la paroi du dessous. Il est éclairé à l'aide d'un laser ND : YaG de longueur d'onde 532 nm, pulsé à 15 Hz. Il est placé sur un système de déplacement à deux axes motorisés qui assure son déplacement suivant les axes x et y. La caméra CCD est placée perpendiculairement par rapport à la nappe laser, un troisième axe motorisé assure son déplacement suivant y.

Pour les mesures de forces hydrodynamiques, nous nous sommes intéressés principalement à la force F_x, étant donné qu'elle représente la force de propulsion et/ou de trainée du robot. La force F_y , quant à elle, nous sert essentiellement à contrôler l'alignement du robot par rapport à la direction de l'écoulement. Le capteur est fixé sur une structure mobile permettant de le déplacer suivant l'axe des x, le long de la section d'étude.

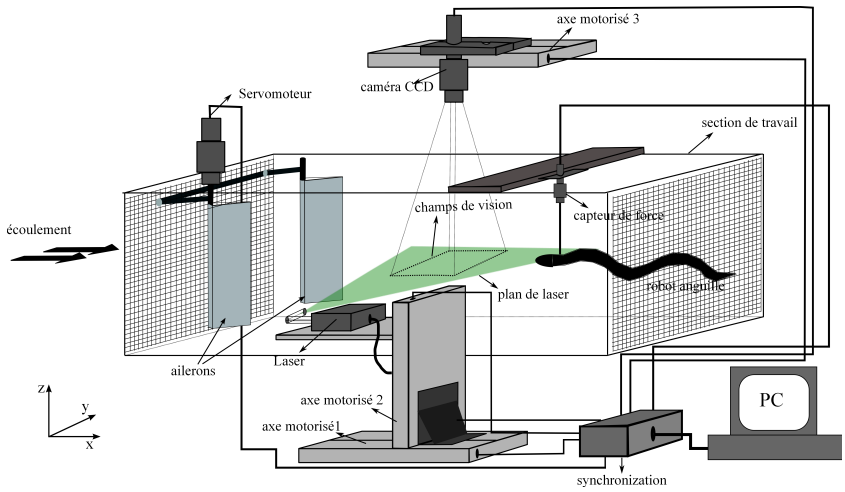

FIGURE 4 – Schéma de principe du dispositif expérimental.

3 Résultats

3.1 Qualification de l'écoulement tourbillonnaire dans le sillage des ailerons

L'étude du sillage produit par l'oscillation d'un aileron a fait l'objet de nombreux travaux et la littérature portant sur le sujet est vaste. Le lecteur intéressé pourra, s'il le souhaite, se référer par exemple à l'article de synthèse publié par [6]. Ces systèmes sont généralement décrits en fonction d'un paramètre unique, le nombre de Strouhal $St_A = fA/U_\infty$, désignant l'efficacité propulsive, défini avec la fréquence f et l'amplitude A d'oscillation, ainsi que la vitesse de l'écoulement en amont U_∞. Ce nombre est généralement utilisé pour désigner l'efficacité propulsive d'un poisson nageant.

Plusieurs configurations de battement $[St_A, d]$ ont été étudiées, où d représente la largeur séparant un aileron de son homologue. Seule la configuration suivante a été retenue pour la suite : $U_\infty = 0.22$ m/s, $St_A = 0.245$ pour $f_a = 1.1\ Hz$, $A = 0.049\ m$ et $d = 0.25\ m$. La figure 5 présente les résultats PIV obtenus sous forme de champs de vitesse instantanés et de champs de vorticité. En complément, un suivi temporel de l'allée est présenté pour une période d'oscillation complète.

Les paramètres de l'écoulement, obtenus à partir des résultats PIV, sont les suivants : la longueur d'onde de l'allée $\lambda_a \simeq 0.23$ m, la largeur de l'allée $c = 0.18$ m, la circulation des vortex $|\Gamma| = 42.5$ s^{-1}, le rayon du coeur (mesuré sur le champs de vorticité) $r \simeq 1$ cm et l'intensité de vorticité $\gamma \simeq 0.014$ m^{2}rd/s.

3.2 Forces d'interactions hydrodynamiques de la nage anguilliforme dans une allée BvK

D'un point de vue pratique, pour effectuer notre étude paramétrique nous avons suivi le plan d'expérience suivant :

- premièrement, nous imposons une condition de départ, celle de la nage synchronisée du robot dans l'allée BvK. C'est à dire que, la fréquence d'ondulation du robot est égale à la fréquence d'oscillation des ailerons (fréquence de détachement des tourbillons) $f_r = f_a$.
- Ensuite, nous faisons varier la "phase" entre le robot et l'allée BvK, cela afin d'identifier dans un premier temps l'effet des vortex sur la nage, et dans un second temps, de vérifier si pour certains "déphasages" l'efficacité hydrodynamique du robot augmente. En effet, pour modifier la phase entre le robot et l'allée BvK, nous avons déplacé le robot durant la nage (en régime dynamique) par rapport au référentiel lié au laboratoire. Pour chaque position du robot nous avons mesuré la force de propulsion.

Les deux forces mesurées à l'aide du capteur sont la force axiale (F_x), parallèle à la direction de l'écoulement et la force latérale (F_y), perpendiculaire à ce dernier. On utilise comme convention de

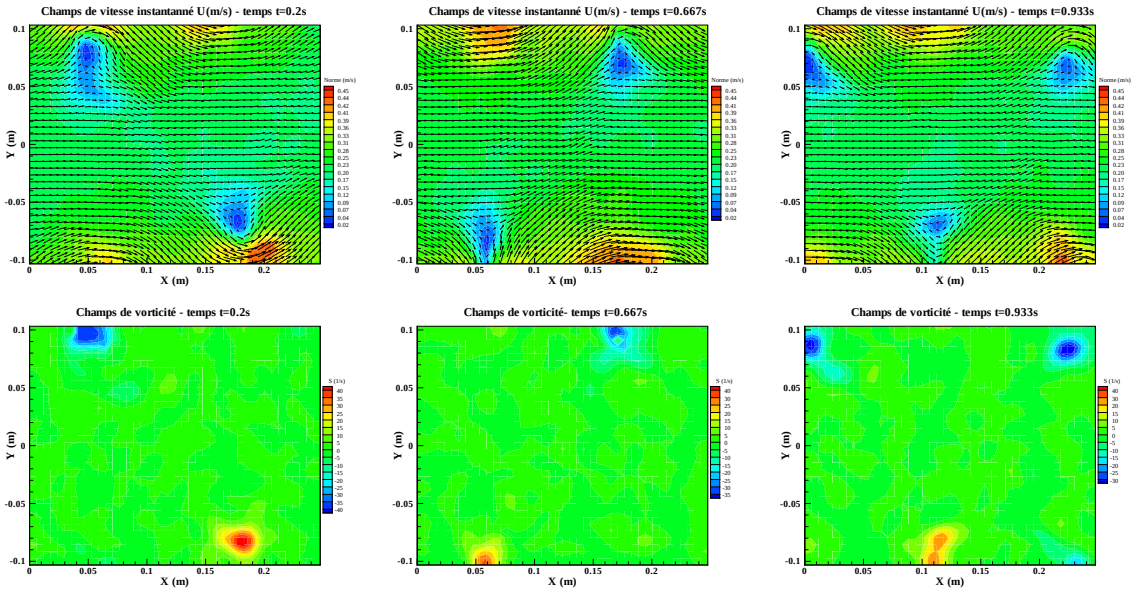

FIGURE 5 – Visualisation de l'allée BvK générée dans le sillage des deux ailerons. De droite à gauche, les trois clichés représentent le suivi temporel de l'allée pour une période d'oscillation. En haut, champs de vecteurs vitesse (avec en arrière plan la norme des vitesses) et en bas, champs de vorticité correspondant.

signe : $F_x < 0$ correspond à une force appliquée dans le même sens que l'écoulement et $F_x > 0$ dans le sens contraire.

Deux séries d'expériences sont présentées, pour lesquelles, les paramètres de l'allée BvK et ceux de la loi de commande du robot sont identiques à ceux présentées dans la section précédente. Le temps t_0^i correspond à l'instant initial de l'essai $N°i$. Cette constante a été pris en compte durant l'analyse des résultats, car la configuration initiale φ_0 (robot/allée BvK) varie d'un essai à l'autre (les démarrages du système d'ailerons et du robot ne sont pas simultanés). Au total, pour chaque essai, neuf positions du robot sont étudiées avec un pas de $\Delta x_\varphi = 0.03m$. Les figures 6 (a) et (b) présentent respectivement les courbes des forces moyennes du robot en fonction de sa position x pour les deux essais N°1 et 2. Notons que ces deux essais ont été effectués dans les mêmes conditions expérimentales, afin d'effectuer, en plus, une étude de reproductibilité.

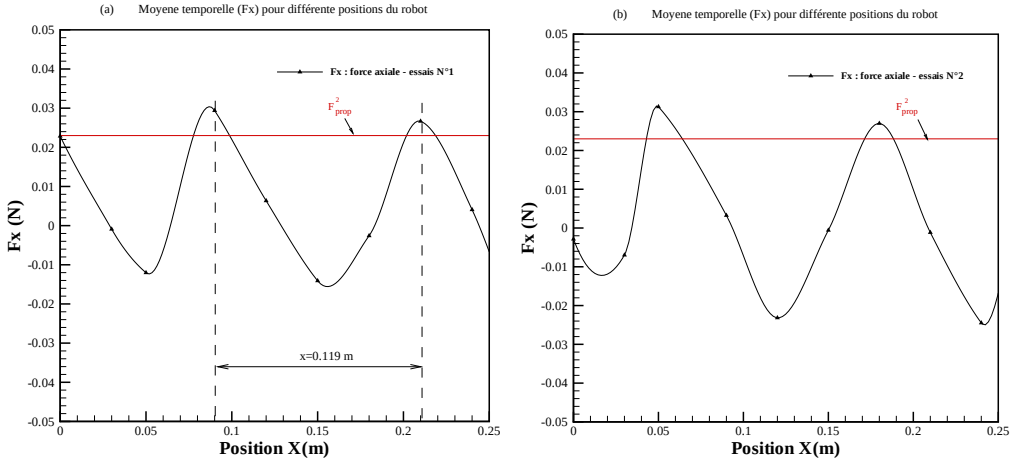

FIGURE 6 – Forces axiales moyennes en fonction de la position du robot dans l'allée BvK. Les deux courbes (a) et (b) représentent deux expériences réalisées dans les mêmes conditions, exception faite du temps initial t_0.

La force moyenne (F^2_{prop}) représentée en rouge, qui correspond à la propulsion du robot dans un écoulement uniforme, est utilisée comme valeur de référence pour notre étude. D'après la figure 6 (a), lorsque nous faisons varier la position du robot, la force moyenne varie d'une force propulsive $F_{max} > 0$ à une force de trainée $F_{min} < 0$. Ce phénomène est périodique et le même résultat est obtenu dans le deuxième essai, à la différence que, le décalage de phase initial observé entre les deux courbes est expliqué par la différence des temps initiaux $t^1_0 \neq t^2_0$. Nous déduisons alors la répétabilité de nos résultats.

D'après la figure 6 (a), lorsqu'on déplace le robot d'une distance de 9 cm environ de sa position initiale, la force de propulsion mesurée sur le robot augmente, et dépasse de 30 % sa capacité maximale de propulsion mesurée dans un écoulement uniforme de même vitesse U_∞. Ensuite, la force diminue pour atteindre un minimum (valeur négative) pour ensuite augmenter et dépasser à nouveau la valeur de référence. On constate dans ce cas, que pour ces deux positions ($x = 9$ cm et $x = 21$ cm) le robot profite de l'énergie de l'écoulement tourbillonnaire et sa force de propulsion est plus importante que lorsqu'il nage dans un écoulement uniforme.

4 Conclusions

Notre étude expérimentale sur l'interaction hydrodynamique apparaissant lors de la nage d'un robot anguilliforme dans une allée de type BvK présente une nouveauté dans le domaine de la recherche biomécanique de la nage en groupe. En effet, à notre connaissance, il nous semble que cette quantification expérimentale de l'augmentation de la force de propulsion due aux interactions hydrodynamiques n'avait pas été réalisée auparavant. Il en est de même pour l'étude paramétrique de la force en fonction du positionnement dans l'allée. En effet, nous avons constaté que lorsque les poissons nagent en formation de losange, le nageur placé dans l'allée BvK générée par les deux poissons amont, peut profiter de l'écoulement tourbillonnaire. D'après nos résultats, il peut augmenter sa force de propulsion d'environ 20 à 30%, ce qui est en accord avec les travaux théoriques de [2] et récemment de [3]. Ce résultat s'applique pour ces deux conditions : la nage synchronisée des poissons et le choix d'une configuration de phase entre le poisson positionné en arrière et les poissons placés devant. Plus précisément, certaines configurations du poisson par rapport au fluide (i.e. positions des vortex de l'allée BvK par rapport au corps) permettent d'extraire de l'énergie à l'écoulement, tandis qu'inversement, d'autres configurations peuvent être nuisibles au nageur placé dans le sillage.

Remerciement

Ce travail a été financé par la commission Européenne "Information Society and Media, Future and Emerging Technologies (FET)" contrat numéro 231845.

Références

[1] Liao, J. 2007 A review of fish swimming mechanics and behaviour in altered flows. *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences* **362** 1973-1993.

[2] Wheis, D. 1973 Hydrodynamics of fish schooling. *Nature* **241** 290-291.

[3] Candelier, F., Porez, M. et Boyer, F. 2012 Note on the swimming of an elongated-body in a nonuniform flow. *Journal of Fluid Mechanics* **716** 616-637.

[4] Matar, Y. Mars, 2013 Étude expérimentale de la nage anguilliforme : application à un robot biomimétique. *Thèse de doctorat, École des Mines de Nantes*

[5] Crespi, A. et Badertscher, A. et Guignard, A. et Ijspeert, A.J. 2005 Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. *Natural Locomotion in Fluids and on Surfaces* **1** 3024-3028.

[6] Godoy-Diana, Ramiro et Aider, Jean-Luc et Wesfreid, José Eduardo 2008 Transitions in the wake of a flapping foil. *Phys. Rev. E.* **77** 308-314.