



Développement d'un système de capteurs de pression pour caractériser des traces hydrodynamiques pour l'optimisation des simulations d'un jumeau numérique dans un environnement maîtrisé

Corentin Porcon, Bastien Lagneaux, Florence Razan, Gurvan Jodin, Nadia Maria Hamilton, James Herbert-Read

► To cite this version:

Corentin Porcon, Bastien Lagneaux, Florence Razan, Gurvan Jodin, Nadia Maria Hamilton, et al.. Développement d'un système de capteurs de pression pour caractériser des traces hydrodynamiques pour l'optimisation des simulations d'un jumeau numérique dans un environnement maîtrisé. JCGE 2024, GRD seeds, Jun 2024, Croisic, France. <hal-04700428>

HAL Id: hal-04700428

<https://hal.science/hal-04700428v1>

Submitted on 17 Sep 2024

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.



Distributed under a Creative Commons CC0 1.0 - Universal - International License

Développement d'un système de capteurs de pression pour caractériser des traces hydrodynamiques pour l'optimisation des simulations d'un jumeau numérique dans un environnement maîtrisé

Corentin PORCON*, Bastien LAGNEAUX[†], Florence RAZAN[‡], Gurvan JODIN[§]

^{*†‡§}Dept. de Mécatronique, IETR UMR CNRS 6164, ENS Rennes, Campus de Ker lann, Bruz, France
{corentin.porcon, bastien.lagneaux, florence.razan, gurkan.jodin}@ens-rennes.fr

Nadia MARIA HAMILTON[¶], James HERBERT-READ^{||}

^{¶||}Dept. of Zoology, Cambridge University, Cambridge, United Kingdom
{nmh60, JH2223}@cam.ac.uk

RESUME - CETTE COMMUNICATION EXPOSE LE DEVELOPPEMENT D'UN SYSTEME DE CAPTEURS POUR CARACTERISER LES TRACES HYDRODYNAMIQUES D'UN CORPS IMMERGE, DANS LE BUT D'OPTIMISER UN JUMENT NUMERIQUE REPRODUISANT LE COMPORTEMENT DES POISSONS DANS LEUR ENVIRONNEMENT AQUATIQUE. CETTE ETUDE PRESENTE LE DEVELOPPEMENT D'UN SYSTEME PERMETTANT LA DETECTION DES VARIATIONS DE PRESSION ENGENDREES PAR LE MOUVEMENT DES POISSONS. LES RESULTATS OBTENUS DEMONTRENT LA CAPACITE DU SYSTEME A DETECTER CES TRACES HYDRODYNAMIQUES, DES SIGNAUX APRES LE PASSAGE D'UN POISSON. OUVRANT AINSI DE NOUVELLES PERSPECTIVES POUR L'ETUDE DU COMPORTEMENT ANIMAL ET DES DYNAMIQUES HYDRODYNAMIQUES. L'ORIGINALITE DE CE TRAVAIL RESIDE DANS L'ADOPTION D'UNE APPROCHE NON INVASIVE, CARACTERISEE PAR UNE MISE EN PLACE SIMPLE DU SYSTEME ET UNE GESTION DE DONNEES ALLEGEE.

MOTS-CLES - Traces hydrodynamiques, Jumeau numérique, Poissons, Environnement aquatique, Capteurs de pression, Comportement animal, Dynamiques hydrodynamiques.

1. Introduction

L'étude des traces hydrodynamiques laissées par les poissons dans leur milieu naturel représente un champ de recherche sur le comportement animal, notamment pour l'étude de leurs interactions sociales. C'est toute cette question que s'est posé le Zoologue James HERBERT READ de l'Université de Cambridge qui est l'une des parties prenantes du projet avec Université de Westlake et l'ENS Rennes.

Tout objet immergé laisse un sillage après son passage, contenant des traces hydrodynamiques, des tourbillons constituées de motifs complexes et fragile du champ de vitesse et de pression qui persistent dans le temps. Cependant, la caractérisation de ces traces et la compréhension de leur persistance restent des défis majeurs dans les études en raison de la difficulté à mesurer et à reproduire ces phénomènes hydrodynamiques. Dans ce contexte, nous avons développé un système de mesure via des capteurs de pression, permettant de détecter les variations de pressions laissées par les mouvements des poissons. Cette approche, vise à surmonter les limitations des méthodes traditionnelles et à offrir une compréhension plus profonde des dynamiques hydrodynamiques dans les milieux aquatiques. L'objectif de cette première partie d'étude : Démontrer la capacité de ce système à détecter fidèlement les traces hydrodynamiques dans différentes conditions, expérimentales et réelles. Ce système a pour objectif d'être intégré à un jumeau numérique présenté dans une autre communication soumise au congrès [1] dans le but de corriger les simulations qui, dans certains cas, ne parviennent pas à reproduire fidèlement les comportements observés dans la réalité. En effet, les prévisions diffèrent du comportement du système réel, en raison de multiples paramètres non pris en compte dans les simulations. Ceci est d'autant plus valable pour les systèmes chaotiques en mécanique de fluides. Les principales raisons sont la connaissance de l'état initial de l'écoulement, de la géométrie du poisson, la simulation réalisée sur un plan et non en trois dimensions, et les approximations inhérentes à la modélisation utilisée en simulation. Cette intégration vise à améliorer la précision et la fiabilité des prédictions faites par le modèle numérique, en prenant en considération un spectre plus large de variables et en corrigeant les écarts entre les données simulées et les observations empiriques.

2. Etat de l'art

Une trace hydrodynamique désigne l'ensemble des perturbations générées dans un fluide par le passage ou le mouvement d'un corps. Ces traces se manifestent sous forme de tourbillons caractérisés par des variations de pression, de vitesse et de direction de l'écoulement (Figure 1). La compréhension de ces traces dans les environnements aquatiques a longtemps constitué un domaine d'intérêt pour les biologistes marins et les ingénieurs intéressés par les mécanismes de locomotion et d'interaction chez les poissons [2]. Ces traces, générées par les mouvements des poissons, engendrent des modèles complexes de flux qui peuvent influencer le comportement d'autres organismes aquatiques et jouer un rôle significatif dans les dynamiques de l'écosystème.

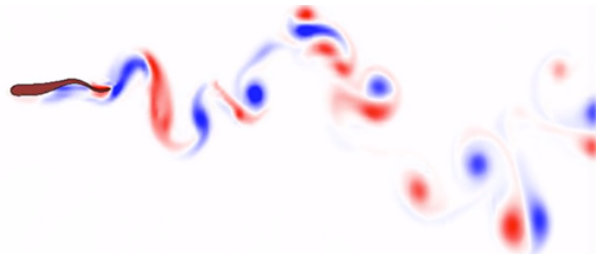


Figure 1: Poisson avec son sillage tourbillonnaire. Le champ de vorticité issu d'une simulation 2D est tracé où les couleurs rouge et bleu indiquent des valeurs de signe opposées.

2.1 Etudes sur les traces Hydrodynamiques

Des recherches antérieures ont démontré que les poissons laissent des traces hydrodynamiques plusieurs minutes après leur passage [3]. La Figure 2 présente l'évolution de la vitesse de l'eau dans le sillage d'un poisson en fonction du temps. Il est notamment observé que même après 5 minutes, le niveau est encore détectable par un autre animal qui viendrait traverser le sillage [4].

De plus des études se sont intéressées aux différents positionnements des poissons lors d'une nage en groupe, la nage anguilliforme qui permet une nage efficace et économe en énergie en utilisant ces tourbillons [5]. Ces tourbillons sont d'ailleurs captés par les organes proprioceptifs des poissons [6].

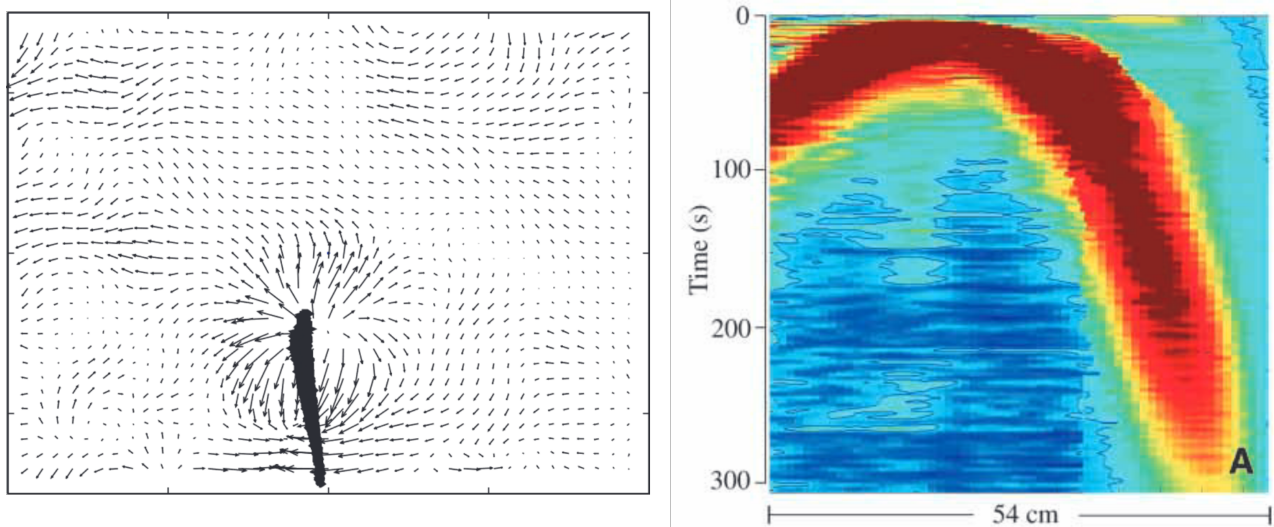


Figure 2: (À gauche) Vitesse de l'eau représentées sous forme de vectoriels. (À droite) Mesure via PIV (principe expliqué en 2.2) de la vitesse de l'eau en fonction du temps après un passage d'un poisson (10cm) de 0 à 300 s. La vitesse de l'eau varie de 0.2 mm.s^{-1} (bleu) à 17 mm.s^{-1} (rouge) [4]

2.2 Moyen de mesure

2.2.1 Mesure par vélocimétrie d'images de particules

Couramment utilisé afin de déterminer les champs de vitesse dans un flux, [7]. Cette méthode réalise une capture d'images haute résolution des particules en suspension dans le fluide pour visualiser et analyser les écoulements de fluides. Elle permet de suivre le mouvement des particules et d'obtenir des informations sur la vitesse et la direction du flux. Cependant, l'installation de la PIV est complexe et nécessite l'ajout de particules dans l'eau ainsi qu'un laser puissant, ce qui peut être invasif pour l'environnement étudié. De plus, la PIV génère une grande quantité de données, ce qui rend difficile l'analyse et la gestion de ces données. Ce traitement des données limite le nombre de tests pouvant être effectués, ce qui est un gros défaut quand de nombreux essais sur différents individus sont nécessaires pour des analyses statistiques.

2.2.2 Mesure par la pression

Cette étude développe une nouvelle méthode de mesure de traces hydrodynamiques basées sur des capteurs de pression. Trois catégories principales de capteurs se distinguent par principe de mesure. Les capteurs de pression absolue mesurent la pression en référence au vide parfait, soit 0 pascal (Pa), où la déformation de la membrane du capteur reflète la pression absolue de l'environnement. Les capteurs de pression relative évaluent la pression en la comparant à la pression atmosphérique standard (101 325 Pa). Enfin, les capteurs de pression différentielle, qui présentent des avantages significatifs pour cette étude, possèdent deux entrées pour mesurer la différence de pression entre deux points. Etant donné l'environnement de l'étude et la gamme de pression visée, les capteurs de pression différentiels sont les plus adaptés, mais également réduire les bruits parasites. En effet, le capteur différentiel a la capacité d'annuler les perturbations communes aux deux points de mesure. Si la même perturbation affecte les deux entrées, elle se trouve éliminée dans la mesure finale, selon l'équation (1).

$$P = (P_2 + \text{bruit}) - (P_1 + \text{bruit}) = P_2 - P_1 \quad (1)$$

D'autres technologies de mesure existent également, telles que les hydrophones [8] conçus pour détecter les variations de pression acoustique dans l'eau, offrant ainsi une autre approche pour étudier les interactions fluides, cette technologie ne peut être déployée sous forme d'un réseau du à son coût élevé (plusieurs milliers d'euros par capteur). Par ailleurs, il existe des capteurs bio-inspirés des mécanismes sensoriels des organismes vivants [6] [2] pour détecter les mouvements et les flux fluides de manière biomimétique. Cependant, ces capteurs n'ont pas encore trouvé de véritables applications pratiques. [9]. Ces recherches élargissent notre compréhension des méthodes de mesure pour l'étude des phénomènes hydrodynamiques.

2.3 Justification de Notre Approche

L'objectif de notre étude est de concevoir un système de mesure de pression, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives dans la compréhension des interactions entre les poissons et leur environnement aquatique. Après avoir effectué une revue de la littérature, il est devenu évident qu'aucun système existant ne répondait à nos exigences spécifiques. En effet, les systèmes disponibles étaient soit trop invasifs, soit trop coûteux, limitant ainsi le nombre de points de mesure et la précision, soit trop complexes sur le plan expérimental. Afin de pallier ces problèmes, un cahier des charges a été élaboré pour guider le développement d'un système répondant à nos besoins. Un système pouvant être scalable en nombre de point de mesure synchronisé à une fréquence d'échantillonnage raisonnable pour le traitement des données.

3. Description du système de mesure développé

3.1 Système de mesure des traces hydrodynamiques

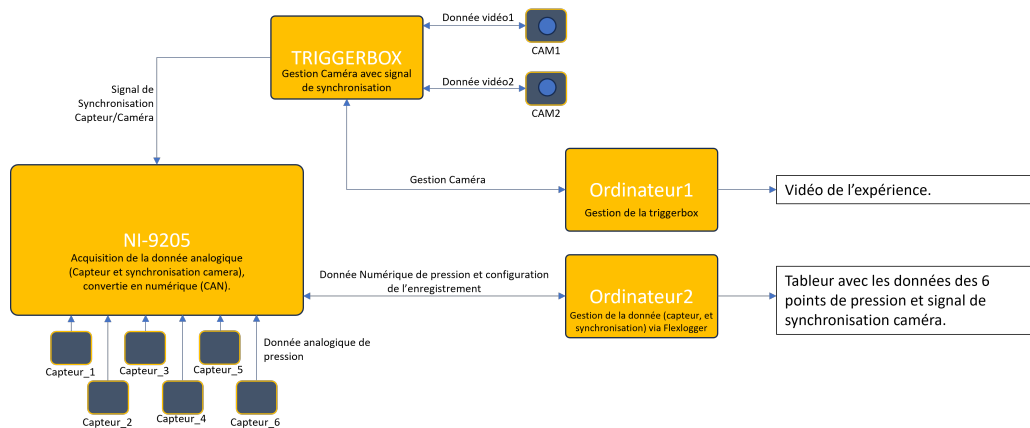


Figure 3: Schéma synoptique de la chaîne d'acquisition

Pour investiguer les traces hydrodynamiques laissées par les poissons, Un système de mesure a été conçu et fabriqué. La figure 3 représente ce système qui intègre un réseau de capteurs de pression, couplés à un dispositif de synchronisation pour la capture vidéo, permettant ainsi une corrélation précise entre les données de pression et les mouvements observés. Ce système repose sur une unité d'acquisition NI-9205, qui recueille les signaux analogiques issus de six capteurs de pression 3.2. Ces signaux sont ensuite convertis numériquement dans un fichier TDMS, via un logiciel propriétaire "FlexLogger" de chez National Instrument. Le système de capture vidéo est développé par LOOPBIO (Autriche). La synchronisation est assurée par une carte électronique nommée TRIGGERBOX. La synchronisation entre les capteurs de pression et les 2 caméras étant essentielle pour une analyse cohérente. Un signal de synchronisation provenant de la TRIGGERBOX génère des impulsions à chaque image de la vidéo. Cela permet de synchroniser l'acquisition des données de pression et le déclenchement des caméras (CAM1 et CAM2), assurant une corrélation temporelle entre les deux types de données. Le système de mesure est administré via deux ordinateurs distincts. L'ordinateur1 est dédié à la gestion des caméras et de la TRIGGERBOX, qui coordonne les signaux de déclenchement pour la capture vidéo synchronisée. L'ordinateur2 est responsable de la gestion des données de pression et de la synchronisation, enregistrant les mesures. Après acquisition, les données de pression sont compilées dans un tableau, comprenant les mesures des six points de pression et le signal de synchronisation caméra.

3.2 Description des capteurs

Les mesures hydrodynamiques de cette étude reposent sur l'utilisation de capteurs de pression différentielle de référence SM7391 de la marque TE Connectivity (Schaffhouse, Suisse). Ces capteurs ont une gamme de gradients de pression allant jusqu'à ± 0.1 Pa, nécessaire pour l'analyse des sillages laissés par les poissons [1]. La plage de mesure de ces capteurs a été spécifiquement adaptée pour couvrir les écarts de pression dans l'environnement aquatique, allant de -500 à 500 Pa. Pour garantir une fonctionnalité durable sous l'eau, ces capteurs ont été encapsulés dans une résine intégrés à un PCB (Printed Circuit Board). La conception de la carte électronique repose principalement sur l'intégration du capteur de pression et du filtre actif de référence MAX7400CSA. Ce dernier permet la réalisation d'un filtre passe-bas avec une fréquence de coupure fixée à 1 kHz, puis d'un filtre passe haut (filtre passif, CR) afin de supprimer la composante continue du signal. Cette caractéristique permet d'éliminer les fréquences indésirables et garantir la fiabilité des mesures de pression. En outre, la carte électronique est équipée de composants passifs destinés à filtrer les parasites, notamment sur le circuit d'alimentation. Cette configuration vise à réduire au maximum les interférences externes susceptibles d'affecter la précision des mesures de pression.

4. Protocole expérimental

4.1 L'environnement robotisé

Les expériences ont été réalisées dans un towing tank [12] de 60x20 cm avec un portique motorisé suivant X et une palme dont le battement est motorisée en rotation RZ (Figure 4) permettant de reproduire la nage d'un poisson avec le foil (profil hydrodynamique) de 8cm. L'objet immergé a pour forme un NACA 0012 faisant la longueur du bassin à une vitesse de 0,1 m/s et en oscillant de $+45^\circ$ à -45° avec une fréquence de 0.8 Hz.

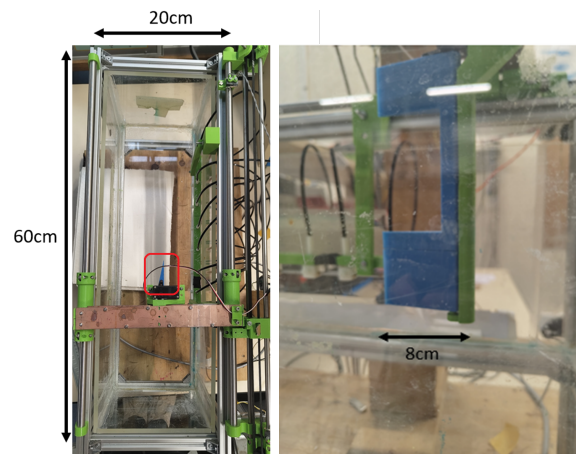


Figure 4: (A Gauche) Le Towing tank vue du dessus avec le foil entouré en rouge. (A Droite) : Le Towing tank vue de gauche avec le foil en plastique bleu articulée et motorisée en rotation oscillante le long de son guidage en rotation par la pièce en plastique verte. Le bord d'attaque est du côté droit de la photographie.

4.2 Mesure de la pression

Une simulation de la même expérience est effectuée à l'aide d'une simulation CFD (LilyPad), donnant une amplitude de 10 Pa. Parallèlement, une expérience pratique est menée avec les capteurs, confirmant ainsi l'ordre de grandeur (Figure 5).

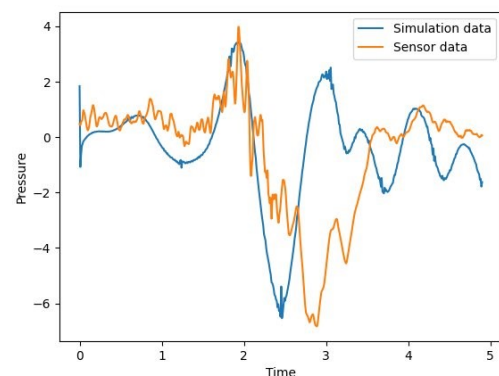


Figure 5: Evolution des pressions du capteur de pression en orange et de la simulation en bleu dans le Towing tank durant le passage du robot

5. Résultat en cas réel

Suite de la validation du système pour un capteur, cinq capteurs ont été ajoutés, étendant ainsi la capacité à effectuer des mesures en six points distincts. Le système amélioré a été soumis à des tests dans des conditions expérimentales réelles, mettant en jeu des poissons de la famille des Gasterosteidae (Figure 7). Le passage du poisson devant le réseau de capteur, le poisson est déposé dans le sas, puis après plusieurs secondes lorsque l'eau est calme, le poisson est lâché et attiré par la plante qui se trouve à l'opposé du canal. Cette expérience sera réalisée plusieurs fois afin de capturer plusieurs traces hydrodynamiques du poisson (Figure 6). Les deux captures illustrent le passage du poisson, générant une dépression de ± 0.6 Pa sur la paroi. Ces résultats permettent une distinction nette du passage du poisson malgré de faibles variations de pression.

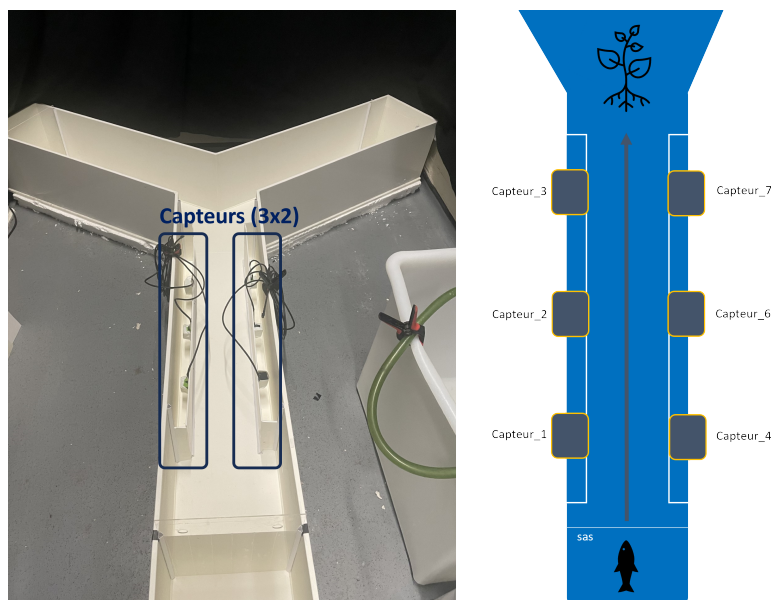


Figure 6: (À gauche) Photo Bassin et réseau de 6 capteurs pour expérimentation sur cas réelle. (À droite) Schéma de l'expérience avec localisation des capteurs

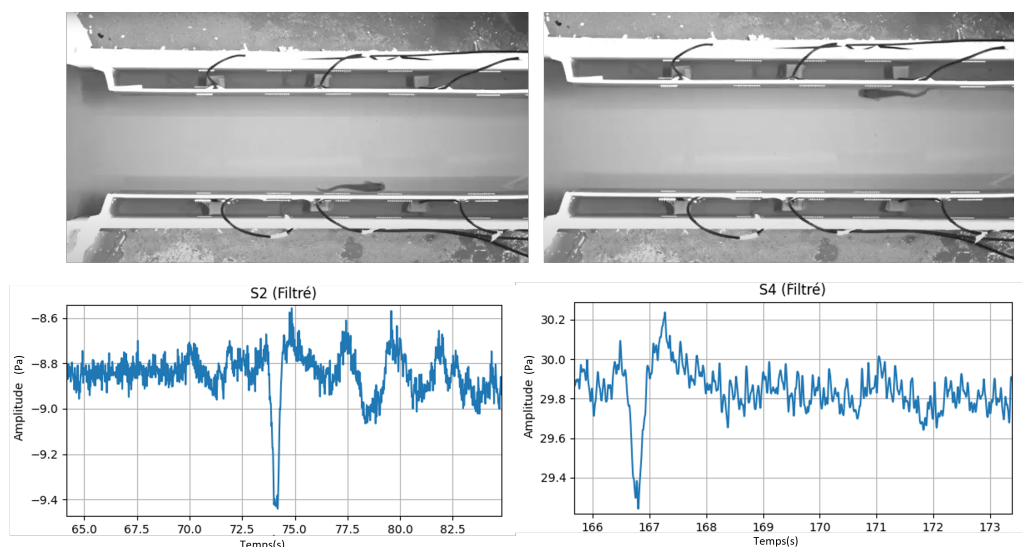


Figure 7: Variation de pression mesurée synchronisée avec la caméra

6. Conclusion et perspectives

En résumé, notre étude a abouti au développement d'un système de capteurs de pression électronique, testé avec succès dans des expériences impliquant des poissons. Les résultats obtenus ont démontré la capacité du réseau de 6 capteurs à détecter les faibles variations de pression générées par le passage des poissons, ouvrant ainsi de nouvelles possibilités pour l'étude des traces hydrodynamiques dans les environnements aquatiques. Ces premiers succès nous encouragent à poursuivre nos efforts pour améliorer davantage ce système. Nous envisageons tout d'abord d'augmenter le nombre de capteurs afin d'obtenir une couverture plus complète de l'environnement aquatique, ce qui améliorera la précision et la résolution des mesures. Parallèlement, nous prévoyons de développer une nouvelle version de capteur capable de numériser directement les données de pression sur la carte électronique. Cette évolution vise à réduire les interférences et les pertes électriques, garantissant ainsi des mesures de pression plus fiables et robustes figure 8.

De plus, nous avons l'intention de mettre au point un algorithme spécifique pour relier et calibrer les différents points de pression, afin de déterminer précisément les variations de pression entre ces points [10] [11]. Cette approche algorithmique enrichira notre système en lui conférant une capacité d'analyse avancée pour l'étude des traces hydrodynamiques. Enfin, nous prévoyons d'intégrer nos données expérimentales dans des simulations numériques et des jumeaux numériques, afin de valider et d'améliorer les modèles de comportement hydrodynamique des poissons dans leur environnement. Cela contribuera à une compréhension plus approfondie des interactions entre les poissons et leur milieu aquatique, tout en faisant progresser les méthodes de modélisation dans le domaine de l'hydrodynamisme. Cette approche multidisciplinaire offre des perspectives prometteuses pour l'étude et la compréhension des comportements aquatiques, ainsi que pour le développement de technologies innovantes dans le domaine de la biologie et de l'ingénierie hydrodynamique.

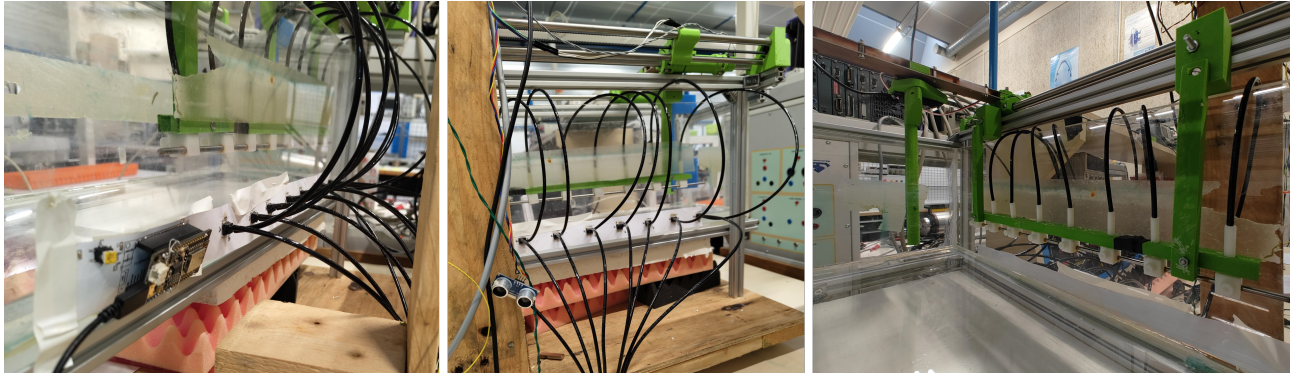


Figure 8: Système de 8 capteurs numériques géré par ESP8266 avec communication série vers un PC (créant un fichier Excel des données, échantillonnées à 500 Hz).

6.1 Remerciement

Nous tenons à exprimer notre gratitude au financement fourni par le programme HFSP (Human Frontier Science Program) dans ce projet RGY0059/2022, qui a rendu cette recherche possible. Nous remercions également tous les collaborateurs et les institutions impliqués dans ce projet pour leur précieuse contribution et leur soutien continu.

References

- [1] Amélioration de la méthode "Hydrodynamic Analys for Automatic Creation of high-idelity Analogous Models with AI" (HAAHAMA) pour son application sur des données réelles, par Bastien LAGNEAUX et al.
- [2] G. Liu, A. Wang, X. Wang, et P. Liu, A Review of Artificial Lateral Line in Sensor Fabrication and Bionic Applications for Robot Fish , Applied Bionics and Biomechanics, vol. 2016, p. 1-15, 2016, doi: 10.1155/2016/4732703.
- [3] Niesterok B, Hanke W. Hydrodynamic patterns from fast-starts in teleost fish and their possible relevance to predator-prey interactions. J Comp Physiol A Neuroethol Sens Neural Behav Physiol. 2013 Feb;199(2):139-49. doi: 10.1007/s00359-012-0775-5. Epub 2012 Nov 21. PMID: 23180046.
- [4] W. Hanke, C. Brücker, et H. Bleckmann, The Ageing of the Low-Frequency Water Disturbances Caused by Swimming Goldfish and Its Possible Relevance to Prey Detection , The Journal of experimental biology, vol. 203, p. 1193-200, mai 2000, doi: 10.1242/jeb.203.7.1193.
- [5] Y. Matar, F. Candelier, C. Sollicc, A. Isjpeert, et F. Boyer, Étude expérimentale des interactions hydrodynamiques survenant lors de la nage anguilliforme dans une allée Bénard Von-Karman , in CFM 2013 - 21ème Congrès Français de Mécanique, A. F. de Mécanique, Éd., in Congrès français de mécanique. Bordeaux, France: AFM, Maison de la Mécanique, 39/41 rue Louis Blanc - 92400 Courbevoie, août 2013. Consulté le: 21 novembre 2023. Disponible sur: <https://hal.science/hal-03439851>
- [6] M. S. Triantafyllou, G. D. Weymouth, et J. Miao, Biomimetic Survival Hydrodynamics and Flow Sensing , Annual Review of Fluid Mechanics, vol. 48, n 1, p. 1-24, 2016, doi: 10.1146/annurev-fluid-122414-034329.
- [7] Q. Liao et al., Development of an in situ underwater particle image velocimetry (UWPIV) system , Limnology Ocean Methods, vol. 7, n 2, p. 169-184, févr. 2009, doi: 10.4319/lom.2009.7.169.
- [8] Saheban, H., Kordrostami, Z. (2021). Hydrophones, fundamental features, design considerations, and various structures: A review. Sensors and Actuators A: Physical, 329, 112790.
- [9] J. C. Liao, A Review of Fish Swimming Mechanics and Behaviour in Altered Flows , Philosophical Transactions: Biological Sciences, vol. 362, n 1487, p. 1973-1993, 2007.
- [10] Q. Leclerc, A. Pereira, A. Finez, et P. Souchotte, Indirect calibration of a large microphone array for in-duct acoustic measurements , Journal of Sound and Vibration, vol. 376, p. 48-59, 2016, doi: 10.1016/j.jsv.2016.04.033.
- [11] K. Nambur Ramamohan, S. P. Chepuri, D. Fernandez Comesaña, G. Pousa, et G. Leus, Blind Calibration for Acoustic Vector Sensor Arrays. 2018, p. 3548. doi: 10.1109/ICASSP.2018.8462035.
- [12] Zhangyang Qi, Jiashun Guan, Ang Li, Gurvan Jodin, Dixia Fan, Filippos Tourlomousis. AI-Powered Self-Propelled Flapping Foil Experimentation: Construction and Control of a Deep Reinforcement Learning Driven Intelligent Testing Platform. Global OCEANS conference 2021, San Diego – Porto, September 20–23, 2021.