

SYSTÈME EXPÉRIMENTAL DE CAPTEURS DE PRESSION SYNCHRONISÉS POUR MESURES HYDRODYNAMIQUES

EXPERIMENTAL SYSTEM OF SYNCHRONIZED PRESSURE SENSORS FOR HYDRODYNAMIC MEASUREMENTS

C. PORCON⁽¹⁾, B. LAGNEAUX⁽¹⁾, G. JODIN⁽¹⁾, F. RAZAN⁽¹⁾, B. SUN⁽²⁾
*corentin.porcon; bastien.lagneaux; florence.razan; guruan.jodin (@ens-rennes.fr);
sunboai (@westlake.edu.cn)*

⁽¹⁾L'Institut d'Electronique et des Technologies du numérique, ENS Rennes, Bruz

⁽²⁾School of Engineering, Westlake University, Hangzhou, Chine

Résumé

L'objectif principal de ce projet est de caractériser les traces hydrodynamiques laissées par les poissons lors de leurs déplacements afin de mieux comprendre leurs interactions sociales. Ce projet nécessite une expertise en hydrodynamique, intelligence artificielle, électronique et éthologie, ce qui a abouti à une collaboration internationale. Pour ce faire, un jumeau numérique du poisson a été développé en modélisant les déplacements et déformation du spécimen à partir de vidéos de trajectoires de poissons. Ce modèle a été intégré dans un outil de dynamique des fluides computationnelle (CFD) pour simuler les traces hydrodynamiques et comprendre les phénomènes observés. Parallèlement, un système de mesure de pression a été conçu pour détecter les variations de pression dans l'environnement aquatique, permettant la validation du modèle numérique grâce à une fusion de données.

Summary

The primary objective of this project is to characterize the hydrodynamic traces left by fish during their movements to better understand their social interactions. This project requires expertise in hydrodynamics, artificial intelligence, electronics, and ethology, which has led to an international collaboration. To achieve this, a digital twin of the fish was developed by modeling the movements and deformations of the specimen based on video recordings of fish trajectories. This model was integrated into a computational fluid dynamics (CFD) tool to simulate the hydrodynamic traces and understand the observed phenomena. In parallel, a pressure measurement system was designed to detect pressure variations in the aquatic environment, enabling the validation of the digital model through data fusion.

I – Introduction

Les poissons laissent dans leur sillage des structures tourbillonnaires cohérentes qui dans les conditions de leur nage demeurent détectable par d'autres individus pendant plusieurs minutes [2]. Nous appelons ces phénomènes des traces hydrodynamiques et les éthologues émettent l'hypothèse qu'elles fournissent des informations utilisées par les autres individus sur la présence et le comportement de l'individu qui les a créées. Comprendre et modéliser ces empreintes offrent des perspectives d'étude sur les comportements et les stratégies des poissons dans leur milieu naturel. Une approche combinant observations expérimentales et modélisation numérique est proposée pour caractériser fidèlement ces phénomènes. Ce projet s'inscrit dans une collaboration interdisciplinaire, mettant en synergie l'expertise en hydrodynamique et IA de l'Université de Weslake et les compétences en électronique et en simulation du laboratoire IETR de l'ENS Rennes. Cette approche pluridisciplinaire permet d'aborder la complexité des interactions sociales des poissons dans leur environnement.

Bien que des avancées aient été réalisées dans l'étude des interactions sociales des animaux marins, la compréhension des traces hydrodynamiques laissées par les poissons reste limitée. Ces traces, qui se manifestent par des variations de pression et de vitesse d'eau, peuvent être importante à la communication et à la navigation des poissons, mais leur caractérisation demeure un défi. Les méthodes de mesure et de modélisation actuelles présentent plusieurs limitations. Par exemple, la vélocimétrie par image de particules (PIV) permet d'accéder aux champs de vitesse dans le sillage des individus mais elle exige des installations complexes et génère des quantités de données massives difficiles à traiter. La vélocimétrie laser Doppler (LDV), quant à elle, reste difficile à appliquer sur de grandes zones de manière continue dans un environnement naturel. De plus, la LDV et la PIV nécessitent l'introduction de lasers dans l'environnement des poissons, ce qui pourrait affecter leur comportement.

Pour surmonter ces défis, l'utilisation de jumeaux numériques et de systèmes de mesure de pression offre une alternative prometteuse. Ces approches permettent de simuler les interactions des poissons avec leur environnement et de capturer des données hydrodynamiques.

L'objectif de cette étude est de caractériser les traces hydrodynamiques générées par les poissons en mouvement, à travers une approche combinant modélisation numérique et mesures expérimentales. Un jumeau numérique est développé pour simuler les perturbations hydrodynamiques observées dans l'environnement naturel des poissons. Pour affiner cette simulation, un système expérimental permet d'accéder aux variations de pression. Ces données expérimentales serviront à corriger le modèle numérique, assurant qu'il reflète fidèlement les conditions réelles. Enfin, en exploitant les données collectées, l'étude approfondira la compréhension des mécanismes de navigation et de communication des poissons à travers leurs traces hydrodynamiques. Les résultats attendus contribueront à enrichir les modèles écologiques existants.

II – Revue de la Littérature

Le projet se distingue par son approche pluridisciplinaire, impliquant une convergence de savoirs provenant de plusieurs domaines : la biologie et le comportement des poissons, l'hydrodynamique, la simulation numérique, et l'électronique.

II – 1 Techniques actuelles pour la détection des traces hydrodynamiques

Dans la recherche scientifique et l'industrie, diverses technologies sont utilisées pour détecter et analyser les traces hydrodynamiques.

Des systèmes optiques comme la vélocimétrie par image de particules (PIV) est l'une des méthodes les plus courantes pour visualiser les écoulements fluides. Cette technique capture des images de particules en suspension dans l'eau, permettant de quantifier les mouvements de fluides, y compris les traces créées par les poissons. Cependant, la PIV présente des limitations, telles que son caractère invasif pour les poissons, de par les particules et un laser puissant nécessaire, ainsi que la grande quantité de données brutes générées, exploitable après un lourd et coûteux traitement. De plus, bien que certaines mesures aient été effectuées sur quelques individus, pour tirer des conclusions robustes sur les comportements sociaux et l'influence des traces hydrodynamiques, il est nécessaire d'avoir un grand nombre de répétitions. À l'heure actuelle, ces bases de données étendues ne sont pas encore disponibles, ce qui limite la capacité à analyser de manière exhaustive et représentative les comportements observés dans des conditions expérimentales prolongées [10] [5].

Les capteurs MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) ont émergé comme une technologie capable de détecter les variations du flux d'eau [8]. Certains de ces capteurs, inspirés du biomimétisme des poissons (Fig.1), sont conçus pour être sensibles aux perturbations hydrodynamiques. Cependant, ils sont encore en phase de développement et ne sont pas encore largement utilisés dans des applications pratiques [1]. Des capteurs de pression basés sur la technologie MEMS, qui convertissent les déformations d'une membrane due aux variations de pression en signaux électriques, sont disponibles dans le commerce. Il existe différents types de capteurs de pression, notamment les capteurs de pression absolue, qui mesurent la pression par rapport à un vide absolu, les capteurs de pression relative, qui utilisent la pression atmosphérique comme référence, et les capteurs différentiels, qui mesurent la différence de pression entre deux points.

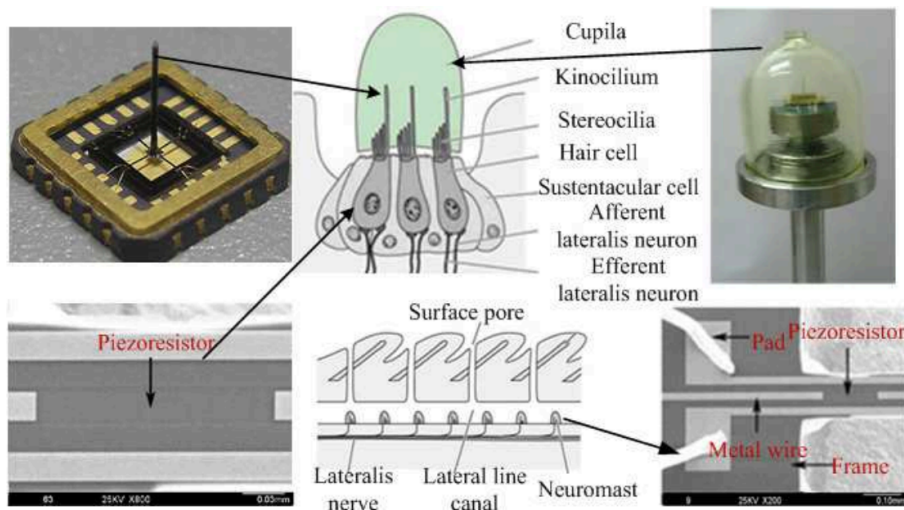


FIGURE 1 – Ensemble du capteur hydrophone vectoriel biomimétique MEMS [1]

II – 2 Capteurs Sensoriels et Perception Hydrodynamique des Poissons

II – 2.1 La Ligne Latérale des Poissons

Les poissons possèdent un système sensoriel unique appelé la ligne latérale, qui leur permet de détecter des changements subtils dans leur environnement aquatique. Ce système est composé de structures appelées neuromasts. Les neuromasts se trouvent le long de la ligne latérale, qui s'étend de la tête à la queue du poisson. Ils sont composés de cellules sensorielles ciliées (ou cellules chevelues) qui sont sensibles aux variations de mouvement et de pression dans l'eau [9].

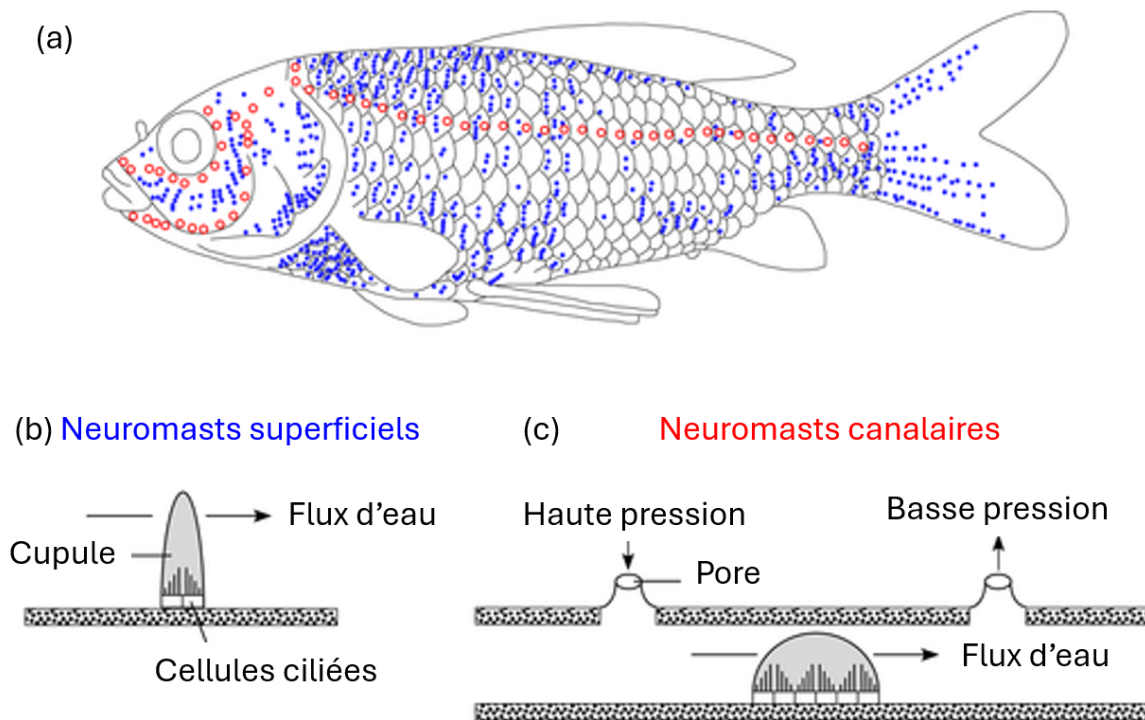


FIGURE 2 – (a) Distribution des neuromasts chez un téléostéen, le poisson rouge ; (b) Schéma d'un neuromasts superficiel ; (c) Schéma d'un neuromastes canaux [6]

Les neuromasts sont de deux principaux types : les neuromasts superficiels, situés à la surface de la peau, et les neuromasts canaux, localisés dans des canaux sous-cutanés remplis de fluide. Les neuromasts superficiels détectent principalement les mouvements d'eau à basse fréquence (quelques Hz), tandis que les neuromasts canaux sont plus sensibles aux changements de pression de l'eau à des fréquences plus élevées (plusieurs dizaine de Hz) [3]. Ces capteurs sont reliés au système nerveux central, où les signaux sont traités pour générer des réponses comportementales adaptées (Fig. 2).

Ce système sensoriel permet aux poissons de percevoir leur environnement de manière passive, en détectant les perturbations créées par d'autres organismes, des objets en mouvement ou des structures sous-marines. Il est bien établi que les poissons utilisent leur ligne latérale pour naviguer dans des eaux troubles, où la vision est limitée. Il est également supposé que la ligne latérale joue un rôle dans la détection de la proximité des prédateurs et dans le suivi des vibrations générées par une proie en mouvement [7].

II – 2.2 Interactions Sociales et la Prédation des Poissons à Travers les Traces Hydrodynamiques

Les études ont montré que les poissons utilisent leurs capacités sensorielles pour des interactions sociales. Par exemple, une recherche menée par Hanke, Brucker et Bleckmann a démontré que les empreintes hydrodynamiques laissées par les poissons, comme les carpes, peuvent persister dans l'eau jusqu'à 5 minutes après leur passage. Cette persistance permet la localisation d'un congénère ou d'un banc [2].

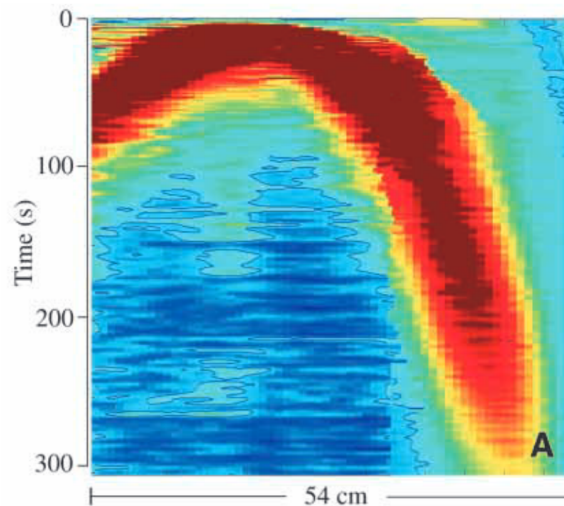


FIGURE 3 – Mesure via PIV de la vitesse de l'eau en fonction du temps après un passage d'un poisson de taille de 10cm de 0 à 300 s. Chaque ligne horizontale correspond à un instant. Chaque point d'une ligne horizontale correspond à la moyenne de la vitesse sur la vertical. La vitesse de l'eau varie de 0.2 mm.s^{-1} (bleu) à 17 mm.s^{-1} (rouge) [2]

Dans cette expérience, la vitesse de l'eau suite au passage d'un poisson est mesurée pour étudier la structure de son sillage hydrodynamique. La Fig. 3 montre l'évolution temporelle de sa vitesse, où le rouge correspond aux vitesses les plus élevées et le bleu foncé aux plus faibles, avec une ligne bleue marquant la vitesse de $0,2 \text{ mm.s}^{-1}$, considérée comme étant au-dessus du seuil de sensibilité des systèmes de ligne latérale des poissons. Afin de simplifier les données, les vitesses sont moyennées sur les colonnes de chaque champ de vecteurs, réduisant chaque champ à une seule ligne, puis les lignes issues de différents moments (espacés d'une seconde) sont empilées pour offrir une vue d'ensemble de l'évolution temporelle du sillage. Dans l'exemple de la Fig. 3, construit à partir de deux caméras, la largeur du sillage est visible. Le poisson, mesurant 10 cm, entre dans le champ de vision à 0 seconde et le quitte entre 1,6 et 5,2 secondes. Les vitesses de l'eau générées par son mouvement sont suivies sur une période de 300 secondes, permettant ainsi d'analyser la dissipation progressive du sillage au fil du temps.

Une autre étude [7] a exploré comment les poissons, en particulier ceux qui chassent dans des environnements à faible luminosité ou de nuit, parviennent à localiser leurs proies. Les poissons prédateurs nocturnes, tels que certains silures, sont capables de détecter leurs proies même dans l'obscurité totale ou dans des eaux turbides, où la vision est fortement limitée. Dans cette expérience, deux poissons ont été lâchés : une proie d'abord, suivie du prédateur dix minutes plus tard, à une distance d'environ dix centimètres. Il a été observé que le prédateur commence rapidement à suivre la proie. Bien que ces observations suggèrent que les poissons arrivent à détecter des congénères, il est important de souligner que d'autres mécanismes, tels que la détection de substances chimiques dans l'eau, peuvent également contribuer à ces comportements (Fig. 4).

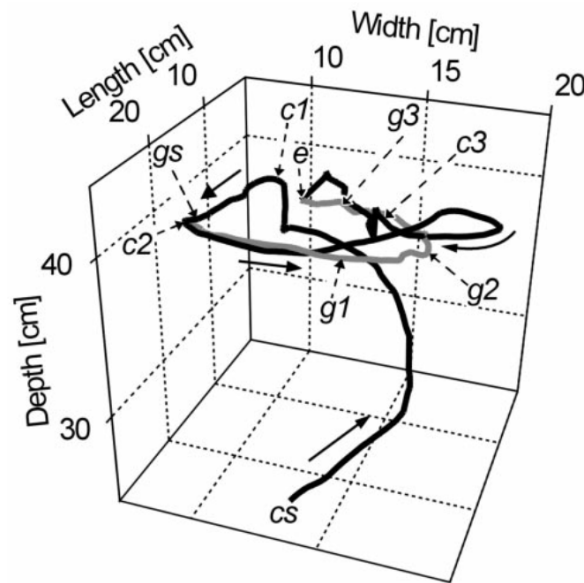


FIGURE 4 – Graphique tridimensionnel avec information temporelle d'une attaque classée comme un suivi de sillage. En noir, le prédateur ; en gris, la proie. Les axes sont gradués en centimètre et correspondent aux positions calibrées dans le bassin de test. Les flèches pleines indiquent la direction de nage. Trois points dans le temps (1 = 11,3 s, 2 = 8,6 s et 3 = 3,4 s avant l'attaque) ont été choisis pour indiquer les positions des deux poissons : c1 à c3 correspondent aux positions du silure, et g1 à g3 correspondent à celles du guppy (par exemple, c2 et g2 sont des positions synchrones). De plus, les premiers (cs et gs) et derniers (e) points des deux trajectoires sont pris au même moment. Le suivi de la trajectoire semble commencer lorsque la proie est en g2 et le prédateur en c2. [7]

Ces études confirment que les capteurs sensoriels sont essentiels pour la communication, la chasse, la navigation et la formation de structures sociales parmi les populations de poissons. Toutefois, bien que les poissons semblent utiliser ces informations pour interagir avec leur environnement et leurs congénères, les processus exacts par lesquels ces interactions se déroulent restent encore partiellement compris. De plus certaines hypothèses comme l'indépendance aux stimuli olfactifs, sonores ou encore la présence effective de traces hydrodynamiques ne sont pas abordées.

II – 2.3 Défis Actuels et Perspectives pour la Caractérisation des Traces Hydrodynamiques

Malgré les avancées dans la compréhension du fonctionnement de la ligne latérale et de ses implications pour le comportement des poissons, il subsiste des lacunes concernant la caractérisation précise des traces hydrodynamiques laissées par les poissons en mouvement. Bien que l'on sache que ces empreintes peuvent persister, la structure exacte de ces traces, ainsi que leur évolution dans le temps et l'espace, restent mal caractérisées. En outre, il manque actuellement une compréhension fine des paramètres hydrodynamiques qui influencent la formation de ces traces. Sans cette connaissance, il est difficile de reproduire artificiellement ces traces de manière réaliste pour des applications expérimentales ou en modélisation. L'un des principaux obstacles est également le manque de données suffisantes sur un grand nombre d'individus. Ce qui ne permet pas de tirer des conclusions généralisables sur les comportements. Pour parvenir à des observations comportementales robustes, il serait nécessaire d'accumuler un large ensemble de données couvrant une variété de conditions et d'individus, ce qui fait défaut dans les bases de données actuelles. Par conséquent, une caractérisation précise et une modélisation des traces hydrodynamiques tenant compte des conditions réelles de l'environnement des poissons restent encore à développer.

Après avoir revu les techniques existantes, étudier le comportement et la perception des poissons dans le cadre de la détection des traces hydrodynamiques, nous avons défini une méthodologie adaptée à nos objectifs. Celle-ci repose sur une approche combinant la modélisation numérique et les mesures expérimentales, que nous détaillons dans la section suivante.

III – Méthode expérimentale

III – 1 Introduction

Ce projet est structuré en deux volets principaux, développés en parallèle. Le premier volet, pris en charge par un membre de l'équipe, concerne le développement d'un jumeau numérique. Le second volet, consacré au développement du réseau de capteurs, est dirigé sous ma supervision.

Le concept de jumeau numérique implique la création d'une réplique numérique dynamique d'un système physique réel, dans ce cas, un poisson en interaction avec son environnement aquatique. L'objectif principal de cette approche est de modéliser et de simuler les traces hydrodynamiques générées par les poissons lors de leurs déplacements.

Le jumeau numérique est développé en intégrant plusieurs types de données, notamment les données de trajectoire et la forme des poissons capturées par vidéo. La modélisation est réalisée en utilisant la méthode HAACHAMA[4], qui permet de générer des représentations numériques des perturbations hydrodynamiques créées par le mouvement des poissons.

Le processus de correction prévu du jumeau numérique repose sur une validation de la simulation par rapport aux données de pression mesurées. Dans une future étape, ces simulations seront fusionnées avec les valeurs mesurées pour ajuster et affiner le modèle numérique, assurant ainsi que les prédictions du modèle reflètent fidèlement les conditions réelles. Cette étape de correction est essentielle pour réduire l'écart entre le comportement modélisé et le comportement observé, garantissant la robustesse et la précision des simulations.

III – 2 Le système de mesure de pression

Dans le cadre de cette étude, le système de mesure de pression est essentiel pour capturer les variations hydrodynamiques induites par le mouvement des poissons dans l'eau. Les variations de pression sont une signature des perturbations hydrodynamiques et leur analyse permet de comprendre la dynamique des fluides autour des objets en mouvement, tels que les poissons.

Pour détecter efficacement les traces hydrodynamiques laissées par les poissons, en particulier ceux de la famille des Gasterosteidae, le système de mesure doit répondre à des spécifications. Pour illustrer la sensibilité nécessaire du capteur, considérons une estimation simplifiée de la pression dynamique générée par un poisson de 10 cm comme dans l'expérience de M. J. WOLFGANG [10] déplaçant l'eau à une vitesse de 0.08 m s^{-1} . La pression dynamique P_d générée peut être calculée :

$$P_d = \frac{1}{2}\rho v^2 = \frac{1}{2} \times 1000 \text{ kg m}^{-3} \times (0.08 \text{ m s}^{-1})^2 = 3.2 \text{ Pa} \quad (1)$$

Le système de mesure est constitué de plusieurs capteurs de pression placés dans le bassin expérimental. Ces capteurs, avec une sensibilité de $\pm 0.1 \text{ Pa}$, détectent les moindres fluctuations de pression causées par les poissons en mouvement, permettant ainsi d'identifier les variations dynamiques du flux aux différents points de mesure.

Lors du déplacement des poissons dans le bassin, des gradients de pression et de vitesse se forment dans le fluide environnant. Selon l'équation de Bernoulli, cette équation relie la pression statique (pression atmosphérique), la pression dynamique ($\frac{1}{2}\rho v^2$), et la pression due à la hauteur (ρgh). Le long d'une ligne de courant, la somme de ces termes reste constante. Avec un capteur différentiel, la mesure est simplifiée. Ce type de capteur annule les termes constants comme la pression statique globale et la pression due à la hauteur, se concentrant uniquement sur les variations de pression dynamique dues au mouvement du poisson.

En captant les fluctuations de pression associées aux changements de vitesse du fluide générés par le poisson, ce dispositif permet une analyse des effets du mouvement du poisson dans une eau statique. Les capteurs de pression, placés sur la paroi du bassin, mesurent ces variations dynamiques. En éliminant l'influence de la pression statique, ils mettent en évidence les perturbations locales et les effets de recirculation créés par le mouvement du poisson. Cette approche permet de caractériser les variations de pression générées et étudier les impacts du déplacement du poisson dans l'eau (Fig. 5).

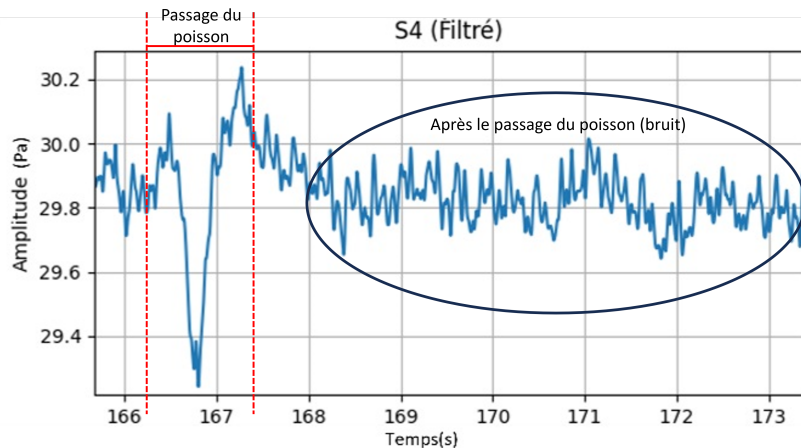


FIGURE 5 – Mesure lors d'un passage de poisson à proximité d'un capteur de pression

III – 3 Configuration expérimentale

Pour analyser les traces hydrodynamiques générées par des poissons, des expériences ont été menées à l'Université de Cambridge. Ces expériences ont impliqué l'utilisation simultanée de capteurs de pression et d'enregistrements vidéo afin de mesurer et modéliser les perturbations hydrodynamiques.

Le protocole expérimental consistait à placer un poisson vivant (poisson-chat rayé, *Plotosus lineatus*) dans un bassin équipé de six capteurs de pression, positionnés sur la paroi du bassin (Fig. 6). Après une période de stabilisation pour calmer l'eau, le poisson était libéré et attiré vers la sortie du canal par une plante située de l'autre côté du bassin. Pendant que le poisson se déplaçait, les capteurs mesuraient les variations de pression sur la paroi du bassin.

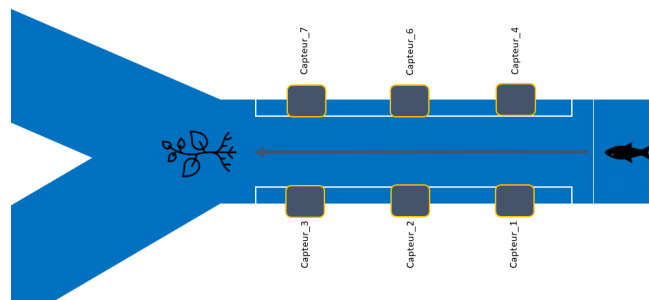


FIGURE 6 – Schéma du bassin Y de l'Université de Cambridge

Pour analyser les données, un outil a été développé afin de mettre en relation les mesures de pression (en fichiers .TDMS) et les enregistrements vidéo (.MP4). Ce programme, codé en Python, dispose d'une interface graphique intuitive (Fig. 7) qui permet de synchroniser et visualiser les données de pression et les vidéos du mouvement des poissons. L'interface permet à l'utilisateur de naviguer facilement à travers les vidéos et d'observer les variations de pression capturées en temps réel en fonction des mouvements des poissons. Le code source de cet outil, ainsi que la documentation détaillant son utilisation, sont disponibles en accès libre sur le dépôt GitLab à l'adresse suivante : <https://gitlab.com/PortCom41/fish-analysis>.

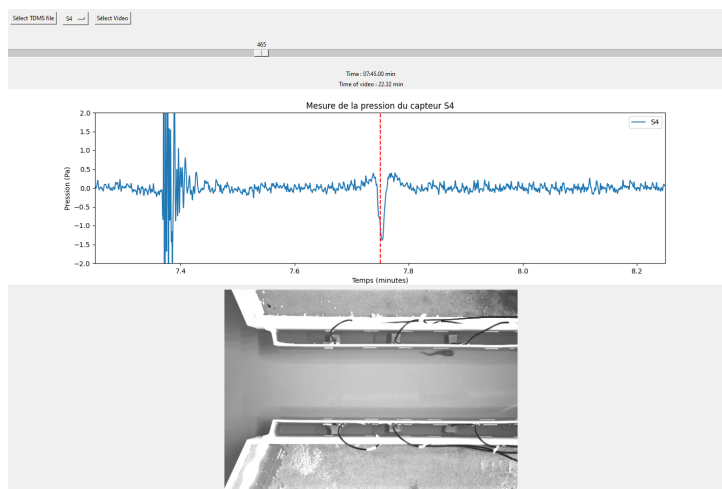


FIGURE 7 – Capture d'écran de l'outil développé au Laboratoire IETR. Visualisation d'une diminution de la pression sur le capteur S4 suite au passage du poisson

IV – Discussion des résultats

Les vidéos des expériences sont ensuite utilisées pour introduire les données dans une simulation numérique via la méthode HAACHAMA [4]. Cette méthode permet de modéliser les traces hydrodynamiques en fonction des trajectoires et l'enveloppe du poisson observées en vidéo, fournissant ainsi une représentation numérique des perturbations générées par le mouvement du poisson (Fig. 8).

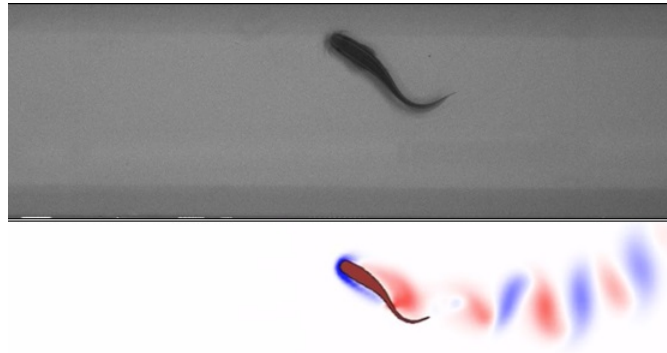


FIGURE 8 – En haut : Capture Vidéo de l'expérience ; En bas : Résultat de la méthode HAACHAMA

Les résultats montrent que le jumeau numérique, basé sur les vidéos des mouvements des poissons, offre une bonne représentation des variations de pression. Les simulations de pression alignent bien les amplitudes et tendances avec les mesures expérimentales (Fig. 9), confirmant l'efficacité de la méthode vidéo pour capturer les perturbations hydrodynamiques.

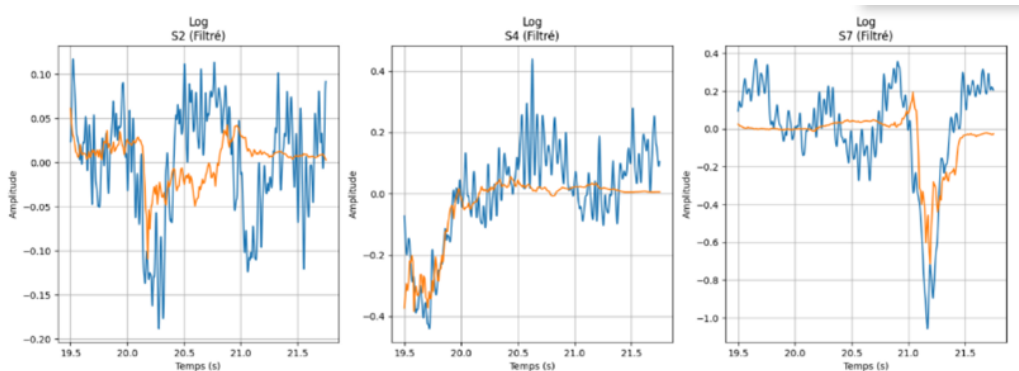


FIGURE 9 – Comparaison des courbes de pression, avec en bleu la pression mesurée par les capteurs physiques, et en orange la pression redimensionnée extraite du jumeau numérique

Cependant, des divergences subsistent dans la représentation des perturbations hydrodynamiques. Ces écarts peuvent être attribués à plusieurs facteurs clés :

- **Simulation 2D** : La réduction de l’environnement à 2D peut omettre des détails importants de la troisième dimension, notamment la profondeur du poisson et la tridimensionnalité des sillages, expliquant certaines imprécisions dans les variations de pression.
- **Précision de la reconnaissance de forme** : Comme mentionné dans les limitations de HAACHAMA [4], une imprécision concernant la forme et sa dynamique peut entraîner une simulation numérique moins représentative. Toutefois, étant donné les autres hypothèses (modélisation 2D, faible fidélité), une erreur sur la forme a un impact limité tant que la dynamique du mouvement de la queue est correctement reproduite, car ce sont ces mouvements qui génèrent les principaux tourbillons dans le sillage.
- **Perturbations extérieures** : Les facteurs externes non modélisés, comme les courants ou turbulences dans le bassin, peuvent introduire des différences entre les mesures et les simulations. Par exemple les vagues provoquées lors de l’ouverture des trappes. Ces perturbations sont faibles mais néanmoins existantes.
- **Erreurs des modèles** : Les approximations nécessaires pour la simulation ou encore les valeurs numériques des propriétés de matériaux peuvent affecter la précision des détails fins des signaux de pression.

Les écarts observés soulignent la nécessité de prendre en compte les limitations du modèle sans la fusion de donnée et d’envisager cette amélioration supplémentaires pour capturer les nuances plus complexes des perturbations hydrodynamiques.

V – Conclusion

L’objectif de cette étude est de développer une méthode expérimentale pour modéliser les traces hydrodynamiques laissées par les poissons, en combinant observations vidéo et mesures de pression in situ dans une modélisation numérique. Le système de mesure de pression, associé à la synchronisation vidéo, a permis de recueillir des données suffisamment précises sur les perturbations hydrodynamiques. Ces données ont été utilisées pour valider le modèle numérique, confirmant ainsi son efficacité. Ainsi, cette étude propose une approche novatrice et non invasive pour analyser les comportements sociaux des poissons. Il reste maintenant quelques validations variées comme des visualisations avec colorant. Il est ensuite prévu de traiter un ensemble de plus d’une centaine d’expériences pour en extraire des statistiques sur le comportement des animaux. Ce projet ouvre la voie à des recherches futures qui pourraient explorer les impacts des variations environnementales sur les comportements des poissons et les interactions sociales.

VI – Remerciements

Nous tenons à exprimer notre gratitude pour le financement fourni par le programme HFSP (Human Frontier Science Program) dans le cadre du projet RGY0059/2022, qui a rendu cette recherche possible.

Références

- [1] Nan GUO, Guo ZHANG et Wen ZHANG. « Design and Experiment Research on MEMS Vector Hydrophone Vibration Damping Structure ». In : *Key Engineering Materials* 645-646 (mai 2015), p. 931-941. DOI : 10.4028/www.scientific.net/KEM.645-646.931.
- [2] Wolf HANKE, Christoph BRÜCKER et Horst BLECKMANN. « The Ageing of the Low-Frequency Water Disturbances Caused by Swimming Goldfish and Its Possible Relevance to Prey Detection ». In : *The Journal of experimental biology* 203 (mai 2000), p. 1193-200. DOI : 10.1242/jeb.203.7.1193.
- [3] A. KASUMYAN. « The Lateral Line in Fish: Structure, Function, and Role in Behavior ». In : *Journal of Ichthyology* 43 (déc. 2003), S175–S213.
- [4] Bastien LAGNEAUX et al. « An Automatic Highly Dynamical Digital Twin Design with YOLOv8 for hydrodynamic studies on living animals ». In : *2024 International Conference on Artificial Intelligence, Computer, Data Sciences and Applications (ACDSA)*. 2024, p. 1-7. DOI : 10.1109/ACDSA59508.2024.10467329.
- [5] James LIAO et al. « Fish Exploiting Vortices Decrease Muscle Activity ». In : *Science (New York, N.Y.)* 302 (déc. 2003), p. 1566-9. DOI : 10.1126/science.1088295.
- [6] Joachim MOGDANS. « Sensory ecology of the fish lateral-line system: Morphological and physiological adaptations for the perception of hydrodynamic stimuli ». In : *Journal of Fish Biology* 95 (mai 2019). DOI : 10.1111/jfb.13966.
- [7] Kirsten POHLMANN, Jelle ATEMA et Thomas BREITHAUPT. « The importance of the lateral line in nocturnal predation of piscivorous catfish ». In : *The Journal of experimental biology* 207 (sept. 2004), p. 2971-8. DOI : 10.1242/jeb.01129.
- [8] Hamid SAHEBAN et Zoheir KORDROSTAMI. « Hydrophones, Fundamental Features, Design Considerations, and Various Structures: A Review ». In : *Sensors and Actuators A: Physical* 329 (avr. 2021), p. 112790. DOI : 10.1016/j.sna.2021.112790.
- [9] Shane WINDSOR et Matthew MCHENRY. « The influence of viscous hydrodynamics on the fish lateral-line system ». In : *Integrative and comparative biology* 49 (déc. 2009), p. 691-701. DOI : 10.1093/icb/icp084.
- [10] MJ WOLFGANG et al. « Near-body flow dynamics in swimming fish ». In : *The Journal of experimental biology* 202 (Pt 17) (oct. 1999), p. 2303-27. DOI : 10.1242/jeb.202.17.2303.