



HAL
open science

Amélioration de la méthode ” Hydrodynamic Analysis for Automatic Creation of High-fidelity Analogous Models with AI ” (HAACHAMA) pour son application sur des données réelles

Bastien Lagneaux, Corentin Porcon, Jerome Keribin, Dixia Fan, Florence Razan, Gurvan Jodin

► To cite this version:

Bastien Lagneaux, Corentin Porcon, Jerome Keribin, Dixia Fan, Florence Razan, et al.. Amélioration de la méthode ” Hydrodynamic Analysis for Automatic Creation of High-fidelity Analogous Models with AI ” (HAACHAMA) pour son application sur des données réelles. JCGE, GDR SEEDS, Jun 2024, Le Croisic (FR), France. hal-04700412v2

HAL Id: hal-04700412

<https://hal.science/hal-04700412v2>

Submitted on 24 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.

Amélioration de la méthode “ Hydrodynamic Analysis for Automatic Creation of High-fidelity Analogous Models with AI ” (HAACHAMA) pour son application sur des données réelles.

Bastien LAGNEAUX *

* dept. de Mécatronique,
IETR UMR CNRS 6164,
ENS Rennes, Bruz, France
bastien.lagneaux@ens-rennes.fr

Corentin PORCON *

* dept. de Mécatronique,
IETR UMR CNRS 6164,
ENS Rennes, Bruz, France
corentin.porcon@ens-rennes.fr

Jerome KERIBIN *

* dept. de Mécatronique,
ENS Rennes, Bruz, France
jerome.kiribin@ens-rennes.fr

Dixia FAN *

* school of Engineering,
Westlake University,
Hangzhou, China
fandixia@westlake.edu.cn

Florence RAZAN *

* dept. de Mécatronique,
OASIS, IETR UMR CNRS 6164,
ENS Rennes, Bruz, France
florence.razan@ens-rennes.fr

Gurvan JODIN *

* dept. de Mécatronique,
IETR UMR CNRS 6164,
ENS Rennes, Bruz, France
gurvan.jodin@ens-rennes.fr

RESUME - Cet article porte sur l'automatisation de la création d'un jumeau numérique. Il se concentre sur l'amélioration d'un *pipeline* de détection automatique pour la création de jumeaux numériques qui, à partir de vidéos de poisson, génère une simulation hydrodynamique analogue. Deux points clés nécessaires à l'application du *pipeline* à des vidéos réelles de poissons sont mis en lumière : la création d'un jeu de données de qualité, et l'amélioration du jumeau numérique lors de l'intégration de la dynamique des fluides computationnelle (CFD). Pour le premier point, nous explorons deux méthodes de *labellisation* : l'utilisation d'OpenCV et la segmentation manuelle. Concernant le second point, nous nous focalisons sur la résolution des équations dans le solveur CFD. Enfin, nous utilisons les résultats de la *labellisation* manuelle comme entrée du *pipeline* et comparons les résultats à des données provenant de capteurs physiques, afin de valider notre approche.

ABSTRACT - This article automating the generation of a digital twin. It focuses on enhancing a pipeline of automatic detection for creating digital twins for practical application. This pipeline detects a fish inside a video and computes its main parameters to generate a hydrodynamic simulation. We highlight two key points necessary for applying the *pipeline* to real fish videos: creating a quality dataset and improving the digital twin during the integration of computational fluid dynamics (CFD). For the first point, we explore two labeling methods: using OpenCV and manual segmentation. Regarding the second point, we focus on solving equations in the CFD solver. Finally, we use the results of manual labeling as input for the *pipeline* and compare the results to data from physical sensors to validate our approach.

MOTS-CLES - Vision par ordinateur, Intelligence Artificielle, Automatisation, Mécanique des fluides, Jumeaux Numériques, Bio-inspiration.

1. Introduction

La technologie des jumeaux numériques s'est révélée être un outil pour simuler et comprendre les systèmes complexes dans divers domaines, de la biologie au génie électrique. Cet article optimise la méthode HAACHAMA pour des applications pratiques [1]. L'objectif principal de cette étude est d'optimiser l'automatisation de la création de jumeaux numériques dans l'étude du comportement des poissons.

Dans le domaine des environnements aquatiques, les animaux laissent derrière eux des traces de mouvement hydrodynamiques, une empreinte liquide distinctive, contenant des détails cruciaux sur la taille, l'identité et les mouvements passés [2]. Cet outil combine des données provenant de capteurs physiques avec une approche par simulation, rapide et peu coûteuse. L'objectif principal consiste à analyser les traces hydrodynamiques ainsi qu'à comprendre comment les animaux les interprètent et les utilisent dans les environnements liquides. Les poissons sont sensibles par les neuromastes des canaux à ces traces qui génèrent des tourbillons avec des informations sur la pression et la vitesse [3]–[5]. Malgré le rôle connu de ces traces dans l'optimisation de l'efficacité de la nage [6], leur fonction pour guider les animaux dans les tâches de recherche et d'évitement de navigation reste largement inexploré.

L'article est structuré comme suit : tout d'abord, les méthodes employées sont détaillées, englobant l'acquisition de données d'entraînement à travers différents scénarios, le processus de *labellisation* utilisant à la fois OpenCV et des techniques de segmentation manuelle, ainsi qu'une analyse comparative des deux approches de *labellisation*. Ensuite, des simulations sont générées à partir des données labellisées en utilisant le *pipeline* décrit dans [1]. Enfin, une comparaison entre les simulations et les données réelles est réalisée en vue d'optimiser la méthodologie.

Cette étude a vocation à proposer une méthode pour le développement de robots bio-inspirés conçus avec des actionneurs souples [7].

2. Méthodologie

Dans l'étude [1], une méthode visant à générer automatiquement des simulations numériques à partir de vidéos a été développée. Ce travail constituait une preuve de faisabilité montrant des améliorations significatives en terme de dynamisme des jumeaux numériques. La deuxième étape consiste à appliquer cette méthode à des cas concrets pour évaluer son efficacité en conditions réelles. Pour cela, plusieurs questions doivent être abordées en premier lieu. La première question concerne le type de *labellisation* nécessaire pour construire le futur jeu de données destiné à l'entraînement du modèle YOLO [8] réaliste. À cet égard, les *labels* obtenus par seuillage avec OpenCV sont comparés à ceux obtenus manuellement à l'aide d'outils de segmentation. La deuxième étape consiste à comparer les résultats de pression issus de la simulation numérique et ceux issus de capteurs physiques, afin d'évaluer la fidélité de nos jumeaux numériques. Les sections suivantes présentent donc les scénarios d'expérimentation utilisés, suivis de l'analyse de l'impact de la méthode de *labellisation*, et enfin, la méthode d'analyse de fidélité.

2.1 Scénarios expérimentaux

Comme indiqué dans l'introduction, l'un des objectifs de la méthode est de générer automatiquement une simulation numérique à partir de vidéos expérimentales, ce qui permettrait une meilleure compréhension du comportement des poissons. Ces vidéos expérimentales sont obtenues à partir de prises de vue au-dessus d'un bassin équipé de capteurs de pression, tel que décrit en détail dans l'article de C. Porcon et al. 'Développement d'un système de capteur de pression pour caractériser des traces hydrodynamiques pour l'optimisation des simulations d'un jumeau numérique dans un environnement maîtrisé', soumis à cette même conférence. Il convient de souligner que ces expériences sont réalisées sous lumière infrarouge afin de priver les poissons de leur vision, les incitant ainsi à utiliser d'autres sens, en particulier celui issu de leur ligne latérale.

Ce choix conduit à l'obtention de vidéos monochromes présentant peu de contraste entre le poisson, le fond du bassin et les zones d'ombre dans lesquelles il peut évoluer. C'est pourquoi une comparaison entre deux méthodes de *labellisation* a été réalisée, afin de déterminer celle qui est la moins affectée par les conditions d'éclairage défavorables.

2.2 Différences entre les méthodes de *labellisation*

L'objectif central de la méthode HAACHAMA est de simplifier et d'obtenir rapidement la création de jumeaux numériques fidèles et déformables au court du temps. Cette approche repose sur l'utilisation d'un modèle YOLO qui doit être préalablement entraîné. Cela nécessite la génération d'un jeu de données dédié à l'objet à détecter. Dans une première phase, la simplification de la création d'un jeu de données tout en préservant la qualité des résultats est étudiée, en utilisant deux méthodes de *labellisation* distinctes.

La première méthode implique la segmentation manuelle d'images extraites de certaines vidéos, où nous définissons manuellement un polygone entourant précisément l'objet à détecter. Il s'agit de sélectionner le contour du poisson en excluant son ombre, ses moustaches, nageoires pectorales et dorsales, tout en conservant la queue jusqu'à sa fine fin. Bien que chronophage, cette méthode est considérée comme le *label* de référence, car elle repose sur une détermination manuelle du contour de l'objet.

La seconde méthode exploite le package Python OpenCV. Dans un premier temps, une partie de la vidéo ne contenant pas le spécimen à détecter est isolée pour en extraire l'image médiane, soit l'image de fond. Cette image est ensuite soustraite des parties de la vidéo contenant le poisson, qui sont seuillées pour ne garder que les zones les plus distinctes du fond. Puisque le poisson occupe la plus grande partie seuillée de l'image, seul cet élément est conservé, produisant ainsi un masque de détection centré sur le poisson. Enfin, le contour de la zone correspondant au poisson est identifié et convertit en un fichier texte qui servira de *label* pour l'entraînement du modèle YOLO.

Cette approche fournit deux fichiers de *labels* pour chaque image inclus dans notre jeu de données. Ensuite, une comparaison est réalisée, comprenant deux aspects : une évaluation qualitative pour déterminer si la *labellisation* OpenCV capture tous les éléments du poisson sans inclure des éléments du fond, et une évaluation quantitative pour mesurer les valeurs de mAP50 et mAP50-95 (mean Average Precision) [1], qui sont les métriques classiquement utilisées dans l'évaluation des tâches de détection, entre les deux *labels*. Plus ces métriques se rapprochent de 1, plus la *labellisation* OpenCV se rapproche de la *labellisation* manuelle, la plus proche du réel.

2.3 Comparaison entre la CFD et les capteurs physiques

La question de la *labellisation* étant résolue, l'étape suivante consiste à tester le *pipeline* dans des conditions réelles. L'entraînement du modèle n'ayant pas encore été effectué, les *labels* sont utilisés comme entrée du *pipeline* et pour analyser le résultat de la simulation numérique qui en découle.

L'algorithme est modifié pour lui permettre d'utiliser tous les fichiers de *label* correspondant à une même vidéo, tout en maintenant le reste de la méthode inchangé, fournissant ainsi les fichiers nécessaires à la génération du jumeau numérique. Dans le cadre de cette vérification des performances, une étape supplémentaire est nécessaire : le dimensionnement du problème. En effet, LilyPad [9], le logiciel de CFD utilisé dans HAACHAMA, permet une

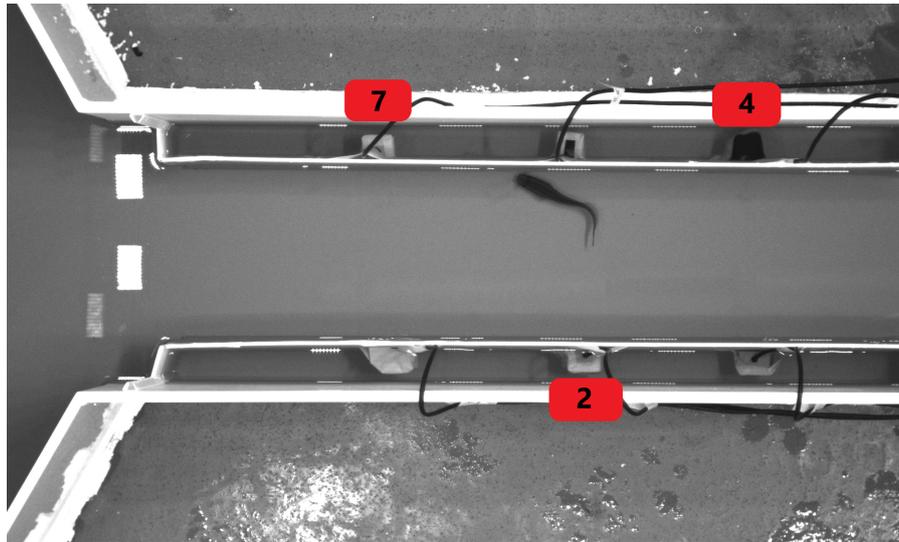


Figure 1: Exemple d'image obtenue à partir des vidéos des expériences (114e image). 7, 4 et 2 correspondent aux capteurs physiques utilisés dans le reste de ce papier.

résolution adimensionnée des équations de la mécanique des fluides. Ainsi, il est essentiel d'ajuster la simulation pour prendre en compte les spécificités de l'étude, ce qui implique de calculer la viscosité dynamique adimensionnée ainsi que le pas de temps adimensionné.

La simulation étant réalisée, une carte de pression peut être obtenue, dont les valeurs en différents points peuvent être extraites. Les valeurs en Pascals correspondant aux emplacements des capteurs dans le bassin, sont obtenues avec l'équation 1 :

$$\Delta p(x, t) = p^*(x, t) \rho U_\infty^2 \quad (1)$$

Avec :

- $\Delta p(x, t)$ la variation de pression statique mesurée
- $p^*(x, t)$ la pression adimensionnée obtenue en sortie de la CFD
- ρ la masse volumique du fluide, de l'eau salée
- U_∞ la vitesse de l'écoulement loin du corps

La comparaison des courbes expérimentales et simulées permet d'évaluer la fidélité du jumeau numérique. Les résultats seront discutés dans la section suivante.

3. Résultats

3.1 Analyse comparative entre la segmentation par OpenCV et la manuelle

Quatre essais ont été réalisés, conduisant à la capture de quatre vidéos, un extrait de 2,4 secondes à un taux de rafraîchissement de 100 images par seconde a été retenu. Cet extrait est ensuite segmenté en images individuelles, telle que celle illustrée dans la Figure 1. Ces images sont par la suite soumises à une *labellisation* par les deux méthodes expliquées dans la section précédente.

Les résultats montrent que pour certaines images extraites, le masque de *labellisation* généré par OpenCV ne représente pas le poisson. La Figure 2 montre l'apparition d'une seconde queue. De plus, ce problème ne semble pas pouvoir être résolu par une simple modification des paramètres de seuillage d'OpenCV. En effet, dans certains cas, le poisson est confondu avec son ombre, et le seuillage entraîne la suppression de certaines parties du poisson. Cette divergence significative entre le masque généré par OpenCV et le poisson réel, représentée par la *labellisation* manuelle, est clairement visible lorsqu'on superpose les deux, comme illustré dans la Figure 3.

Ces observations sont corroborées par une analyse quantitative des différences entre les deux méthodes de *labellisation*. Les calculs des métriques mAP50 et mAP50-95 donnent des valeurs de mAP50= 0.68 et mAP50-95 = 0.42, qui indiqueraient, dans le cadre d'un entraînement de modèle de détection, que le modèle n'a pas correctement appris à reproduire l'information contenue dans les *labels*. En conclusion, malgré le gain de temps substantiel offert par la *labellisation* par OpenCV dans la création du jeu de données, il est évident que la *labellisation* manuelle reste préférable dans le cadre de notre projet.



Figure 2: Masque de segmentation défectueux obtenue par OpenCV.

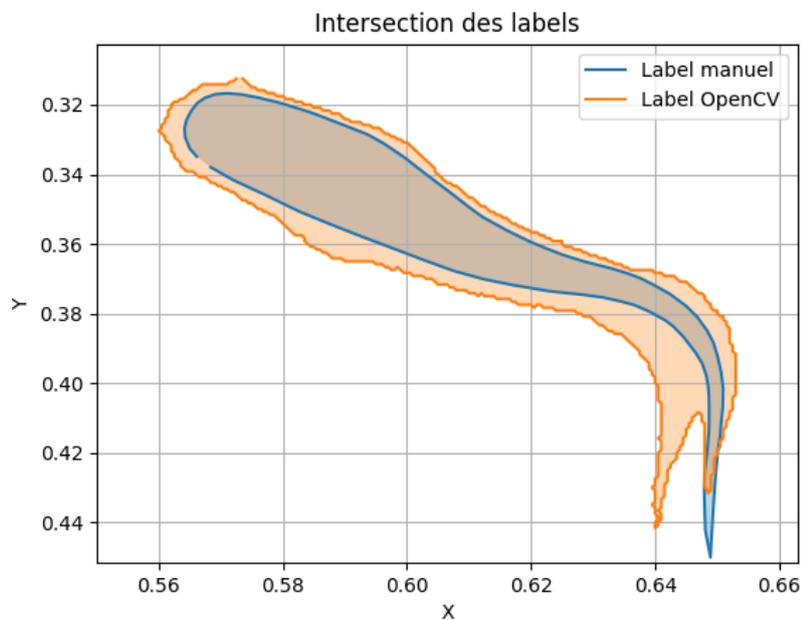


Figure 3: Superposition du *label* manuel avec le *label* défectueux obtenue par OpenCV.

3.2 Analyse comparative entre le jumeau numérique et les données expérimentales

LilyPad est configuré de manière à ce que la résolution de l'équation de Navier-Stokes adimensionnée, $\frac{Du^*}{Dt} = -\frac{dp}{dx} + \nu \frac{d^2u}{dx^2}$ [9], nécessite deux paramètres clés : la **viscosité cinématique adimensionnée** et le **pas de temps adimensionné**. Pour déterminer ces paramètres, la taille du poisson est mesurée à partir de l'extrait vidéo ainsi que d'une vidéo de calibration comportant une mire. En utilisant la taille du bassin et celle de la grille de simulation, le coefficient d'adimensionnement des longueurs h est également calculé et permet d'obtenir ainsi $L^* = 31$ mailles et $h = 0,004$ m/maille. En parallèle, le nombre de Reynolds du poisson dans de l'eau salée est calculé avec l'équation 2 :

$$Re = \frac{\rho UL}{\eta} = \frac{0,279 \times 0,124}{1,044 \cdot 10^{-6}} = 33141 \quad (2)$$

Avec :

- Re le nombre de Reynolds
- ρ la masse volumique
- η la viscosité dynamique
- U la vitesse du poisson
- L la taille caractéristique du poisson

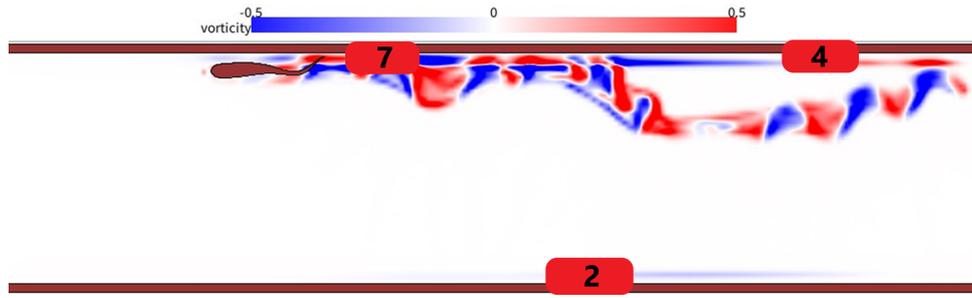


Figure 4: Dernière image de la simulation adimensionnée, représentant la vorticité générée par le jumeau numérique.

  partir de ces données, la viscosité cinématique adimensionnée est déterminée avec : $\nu^* = L^*/Re = 9.10^{-4}$, où L^* représente la taille adimensionnée du poisson. Cette valeur, très faible par rapport à 1, pose un problème vis-à-vis du solver de LilyPad, qui recommande généralement de ne pas avoir un ν^* trop inférieur à 1. Cette valeur est donc artificiellement modifiée pour atteindre $\nu^* = 0,095$, ce qui permet ensuite de calculer le pas de temps adimensionné en tenant compte de la modification : $dt^* = \frac{dt \times \nu}{h^2 \times \nu^*} = 0,0069$, où dt correspond au pas de temps de la vidéo, c'est-à-dire le temps entre deux images. Ces calculs permettent d'obtenir une simulation dont les paramètres sont adaptés aux versions adimensionnées des variables physiques du scénario (voir Fig.4).

  partir de cette simulation, les pressions aux points correspondant aux capteurs dans le bassin, en particulier aux capteurs numérotés 7, 4 et 2 (cf. Fig.1) sont extraites. En redimensionnant les valeurs extraites à l'aide de la formule 1 et de la vitesse calculée précédemment, les courbes de pression réelles et simulées sont comparées sur la figure Fig.5. Les courbes présentent une évolution globalement similaire en ce qui concerne les perturbations les plus significatives, notamment lorsque le poisson passe devant les capteurs. Même le capteur 2, situé sur le mur opposé au passage du poisson, présente une dépression correspondante dans la simulation. En d'autres termes, bien que les résultats de la simulation ne soient évidemment pas suffisamment précis pour remplacer intégralement les capteurs physiques, l'écoulement étant tridimensionnel alors que la simulation est en 2D, ils fournissent néanmoins une information de basse fidélité qui permet de générer une grande quantité de données sur la nage du poisson. Ces données ont d'autant plus de valeur que la dynamique des tourbillons dans le sillage de poissons similaires aux poissons chats, comme ceux utilisés dans ces expériences, sont proche du comportement théorique de tourbillons 2D, comme on peut le voir dans [10]. Ces données peuvent ensuite être fusionnées avec les quelques mesures provenant des véritables capteurs afin de pallier la limitation de la mesure physique.

4. Conclusion

En conclusion, ces travaux ont permis de mettre en lumière les défis et les avancées significatives dans le domaine de la création automatisée de jumeaux numériques pour l'étude des comportements hydrodynamiques des organismes vivants. Nous avons développé une méthode exploitant l'algorithme YOLOv8, permettant ainsi de générer des jumeaux numériques réalistes reproduisant fidèlement les mouvements hydrodynamiques des poissons.

L'analyse comparative entre les résultats de simulation et les données expérimentales a révélé des similitudes remarquables dans les perturbations les plus significatives, même si les résultats de la simulation ne peuvent pas encore remplacer entièrement les capteurs physiques. Ces résultats encourageants ouvrent la voie à de futures recherches visant à perfectionner notre méthode et à l'appliquer à des scénarios réels.

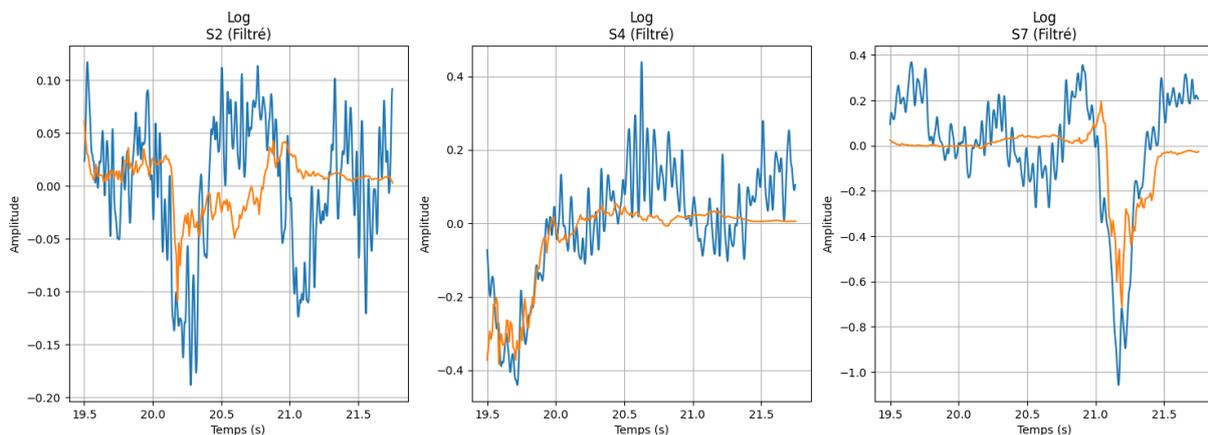


Figure 5: Comparaison des courbes de pression aux capteurs 2, 4 et 7, avec en bleue la pression mesurée par les capteurs physiques, et en orange la pression redimensionnée extraite du jumeau numérique.

Dans cette optique, nous sommes actuellement engagés dans le développement d'un modèle YOLO capable de segmenter de véritables poissons. Cette démarche nous permettra d'étendre l'applicabilité de notre méthode à une gamme plus large de situations et d'ouvrir de nouvelles perspectives de recherche dans les domaines de la biologie et du génie électrique.

En somme, notre travail constitue une avancée significative vers la création d'outils analytiques sophistiqués, offrant de nouvelles opportunités pour la compréhension des signaux hydrodynamiques émis par les organismes vivants et leur utilisation dans divers domaines d'application.

Remerciement

Ce projet a reçu des fonds de la part de l'organisation Human Frontier Science Program, sous le numéro RGY0059/2022.

References

- [1] B. Lagneaux, G. Jodin, D. Fan, J. Herbert-Read, C. Porcon, F. Razan, "An Automatic Highly Dynamical Digital Twin Design with YOLOv8 for hydrodynamic studies on living animals," ACSDA IEEE International Conference on Artificial Intelligence, Computer, Data Sciences and Applications, Feb 1st, Seychelles, 2024
- [2] D. Weihs, "SOME HYDRODYNAMICAL ASPECTS OF FISH SCHOOLING," p. 16.
- [3] E. G. Drucker and G. V. Lauder, "A hydrodynamic analysis of fish swimming speed: wake structure and locomotor force in slow and fast labriform swimmers," *Journal of Experimental Biology*, vol. 203, no. 16, Art. no. 16, Aug. 2000, doi: 10.1242/jeb.203.16.2379.
- [4] J. J. Videler, "The Scaling and Structure of Aquatic Animal Wakes," *Integrative and Comparative Biology*, vol. 42, no. 5, Art. no. 5, Nov. 2002, doi: 10.1093/icb/42.5.988.
- [5] S. Coombs, J. Janssen, and J. F. Webb, "Diversity of Lateral Line Systems: Evolutionary and Functional Considerations," in *Sensory Biology of Aquatic Animals*, J. Atema, R. R. Fay, A. N. Popper, and W. N. Tavolga, Eds., New York, NY: Springer New York, 1988, pp. 553–593. doi: 10.1007/978-1-4612-3714-3_22.
- [6] J. C. Liao, D. N. Beal, G. V. Lauder, and M. S. Triantafyllou, "Fish Exploiting Vortices Decrease Muscle Activity," *Science*, vol. 302, no. 5650, Art. no. 5650, Nov. 2003, doi: 10.1126/science.1088295.
- [7] Raj, A., Thakur, A. (2016). Fish-inspired robots: design, sensing, actuation, and autonomy—a review of research. *Bioinspiration Biomimetics*, 11, 031001.
- [8] G. Jocher, A. Chaurasia, and J. Qiu, *Ultralytics YOLOv8*. 2023. [Online]. Available: <https://github.com/ultralytics/ultralytics>
- [9] A. P. Maertens and G. D. Weymouth, "Accurate Cartesian-grid simulations of near-body flows at intermediate Reynolds numbers," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 283, pp. 106–129, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.cma.2014.09.007.
- [10] Hanke, W. O. L. F., Brücker, C., Bleckmann, H. O. R. S. T. (2000). The ageing of the low-frequency water disturbances caused by swimming goldfish and its possible relevance to prey detection. *Journal of Experimental Biology*, 203(7), 1193-1200.