



## SUJET DE THESE

# BIOMIMETISME ET BIOINSPIRATION DE LA NAGE ANGUILLIFORME D'UN SERPENT : JUMEAU NUMERIQUE ET APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE

**Mots clefs :** Biomimétisme, Simulation numérique, Apprentissage automatique, Contrôle.

### Contexte de cette étude

Le battement des ailes d'un oiseau, le mouvement de nageoires d'un poisson ou l'ondulation du corps d'une anguille ou d'un serpent produisent l'un des plus complexe et efficace moyen de **locomotion** et de **propulsion** que l'on puisse trouver dans la nature.

La performance de la locomotion aquatique est étroitement liée à la circulation du fluide autour du corps de l'animal et principalement à l'intensité de l'écoulement induit en aval de la queue et à ses caractéristiques. Ce sillage qui se développe est constitué d'une allée tourbillonnaire de Von Karman dont les vortex sont émis périodiquement à chaque battement de la queue. La façon dont la queue se déplace dans le fluide (angle d'attaque, amplitude, fréquence ...) détermine les performances de la nage. Les animaux peuvent ajuster leur cinématique de nage pour optimiser la performance. Différents critères peuvent définir la performance, comme par exemple l'efficacité énergétique, la vitesse maximale (système proie-prédateur), ou encore la furtivité. La forme du corps et les propriétés tribologiques de la peau, qui influencent la poussée et la traînée produites par les animaux nageurs, doivent être prises en compte.

L'objectif central de cette thèse est de contribuer au développement d'un **modèle numérique basé sur des données réelles** telles que la géométrie, la cinématique, la texture de la peau (**data-driven numerical modeling**) afin de simuler les phénomènes complexes d'interaction fluide-structure (IFS) stationnaires, impliqués dans la nage anguilliforme au sein d'un écoulement visqueux incompressible en présence d'une surface libre. Il s'agira donc, à partir des données cinématiques et vélocimétriques qui caractérisent la nage des serpents, d'identifier les mécanismes hydrodynamiques qui permettront d'obtenir des estimations de l'efficacité de cette nage en termes de force propulsive et d'efficacité énergétique. La figure 1 présente des simulations préliminaires réalisées avec le code NaSCar (qui servira de base dans cette thèse) à partir de données synthétiques (non mesurées *in situ*).

Le **biomimétisme** et la **bioinspiration** sont des champs émergents de recherche scientifique qui tendent à comprendre puis à s'inspirer des mécanismes physiques mis en œuvre par la nature afin de les appliquer dans un contexte technologique (drones par exemple). On

peut s'attendre à ce que les différents paramètres intervenant dans la caractérisation d'un processus physique aient été optimisés par la nature après des millions d'années d'évolution. La nage anguilliforme est caractérisée par un certain nombre de paramètres qui définissent la cinématique ondulatoire de cette nage (amplitude et fréquence du mouvement oscillant, longitudinal et transversal, induit par le corps du serpent). En jouant sur ces différents paramètres d'entrée, il s'agira, par exemple, d'optimiser la **force propulsive** et l'**efficacité énergétique** qui découlent de cette cinématique. Des techniques d'apprentissage automatique (**Machine Learning**) seront utilisées afin de déterminer les paramètres optimaux permettant de maximiser la force propulsive et l'efficacité énergétique. Il sera intéressant de déterminer ainsi si la nature a été capable de proposer une solution optimale d'un point de vue énergétique.

Ce travail de thèse s'inscrit dans un projet ANR (Dragon II) plus large dans lequel collaborent des biologistes, des mécaniciens des fluides, des mathématiciens et des roboticiens. Un lien fort sera maintenu avec les expérimentateurs du projet et des données expérimentales sur la nage de serpents réels et de robots bio-inspirés seront disponibles afin de valider le modèle numérique. Le (la) candidat(e) sera amené(e) à participer à des campagnes de mesures à l'École Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles de Paris, à l'Institut PPRIME à Poitiers et au centre d'Études Biologiques de Chizé.

La thèse s'effectuera en alternance entre Inria Bordeaux - Sud-Ouest (équipe Memphis) et l'Institut PPRIME de Poitiers (équipe Curiosity).

## Programme de l'étude, méthodologies et moyens mis en œuvre

Les serpents partiellement immergés posent des défis spécifiques ; la simulation numérique nécessitera l'utilisation de méthodes qui couplent l'analyse des écoulements de surface libre avec l'interaction fluide-structure. L'écoulement du fluide autour de la structure déformable (corps du serpent) est dicté par le mouvement de cette structure. Inversement, la structure est elle-même influencée par les forces exercées par le fluide en mouvement.

Dans le premier volet de cette thèse, des développements numériques seront conduits afin de coupler une méthode de **frontière immergée (IBM)** pour prendre en compte le mouvement du serpent et une méthode pour traiter la surface libre (**méthode Level Set**), le tout dans un contexte **d'interaction fluide-structure** avec couplage rétroactif. Le code NasCar, développé à Inria Bordeaux, pourra servir de base aux futurs développements. Ce premier volet repose essentiellement sur une prise en main des outils de modélisation numérique pour apporter des premières réponses à des questions fondamentales.

- Dans un premier temps et dans une approche simplifiée, nous utiliserons un cylindre ellipsoïdal incliné et partiellement immergé pour mimer l'écoulement autour de la tête d'un serpent nageant à la surface. Le cylindre sera animé d'un mouvement sinusoïdal transversal et longitudinal, typique des serpents nageurs. L'objectif est d'élucider les mécanismes physiques sous-jacents qui génèrent la force de propulsion, ce qui est un élément clé pour s'attaquer au problème persistant de l'efficacité de la nage.
- Dans un second temps, nous engloberons toute la complexité de ce problème, en tenant compte d'un serpent dans sa globalité (tête, corps et queue) ayant immergé une partie ou la totalité de son corps. Nous chercherons à déterminer la force propulsive et

l'efficacité énergétique qui découleront d'une géométrie du serpent et d'une cinématique de la nage qui seront imposées. Des résultats préliminaires sont obtenus sur la figure 1. Il conviendra d'apporter des améliorations à ces résultats.

A partir de vidéos réalisées sur des serpents réels, nous pourrons extraire la cinématique de la nage réelle (*pour découpler le mouvement imposé par le serpent des effets hydrodynamiques*), déterminer la géométrie du corps du serpent lorsque celui-ci est immergé (*l'effet de flottabilité modifie la géométrie*), et modéliser l'influence de la texture de la peau du serpent. Ainsi à partir de **données réelles** obtenues à partir d'expériences effectuées conjointement par les expérimentateurs associés à ce projet nous pourrons créer un **jumeau numérique**.

Enfin, dans le dernier volet de la thèse, différentes stratégies de contrôle innovantes reposant sur des méthodes **d'apprentissage automatique (machine learning, algorithmes génétiques)** seront appliquées afin de déterminer les conditions optimales de la nage qui maximisent la force propulsive du serpent.

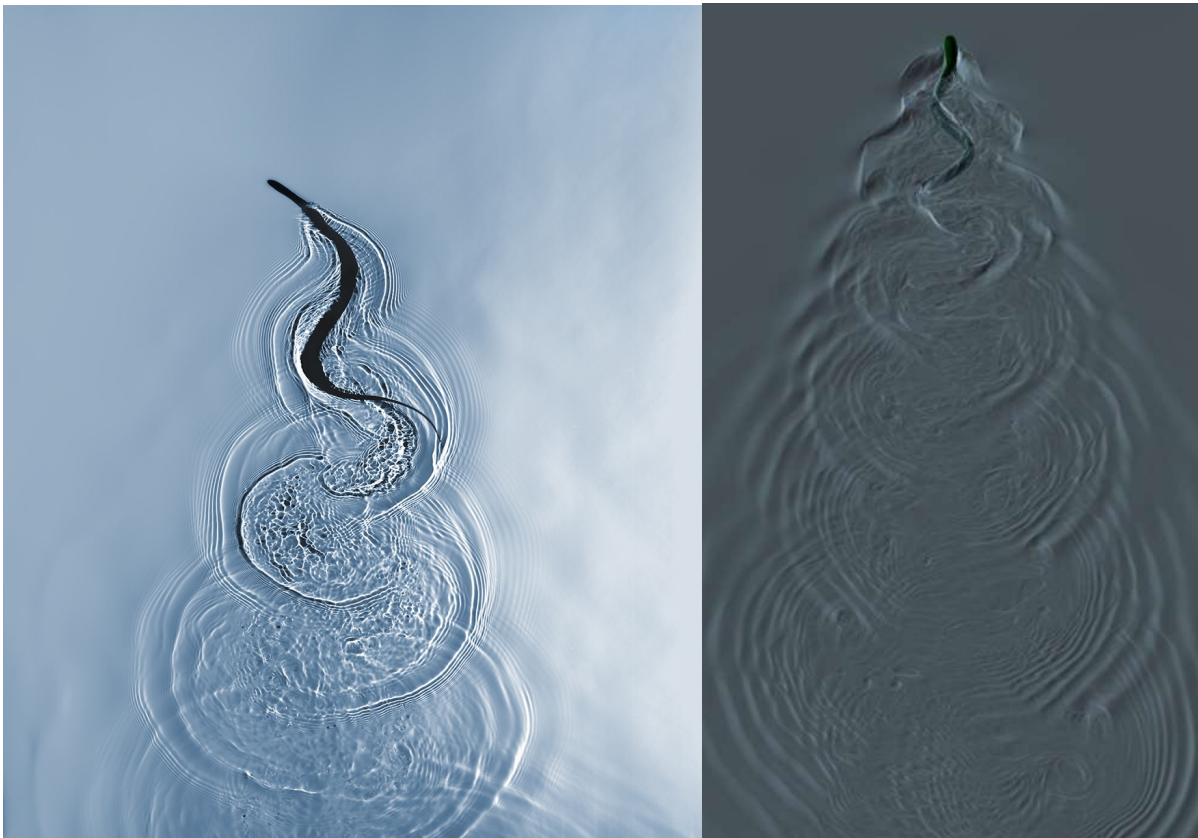


Figure 1 : Exemple de nage d'un serpent en surface. Serpent réel à gauche ; simulation numérique avec le code NaSCar à droite.

## Profil du (ou de la) candidat(e) et prérequis



Le (ou la) candidat(e) aura un Master en Mécanique des Fluides ou en Mathématiques appliquées. Il ou elle montrera des compétences avérées en méthodes numériques en mécanique des fluides.

Le (ou la) candidat(e) montrera une appétence pour l'interdisciplinaire, le développement et l'utilisation de codes de calcul. Un intérêt, voir des compétences, en Machine Learning seraient appréciées.

## Contacts

Philippe Traoré (PPRIME Poitiers)  
[philippe.traore@univ-poitiers.fr](mailto:philippe.traore@univ-poitiers.fr)

Michel Bergmann (Inria Bordeaux – Sud-Ouest)  
[Michel.bergmann@inria.fr](mailto:Michel.bergmann@inria.fr)  
05 40 00 35 36

## Références :

- [1] Bergmann & Iollo (2016)., Bioinspired swimming simulations. *J Comput Physics* 323, 310-321.
- [2] Bergmann et al. (2014). Effect of caudal fin flexibility on the propulsive efficiency of fish-like swimmer. *Bioinspiration & Biomimetics* 9, 046001.
- [3] Godoy-Diana & Thiria (2018). On the diverse roles of fluid dynamic drag in animal swimming and flying. *J Royal Society Interface* 15, 20170715.
- [4] Afroz et al. (2016). Experimental study of laminar and turbulent boundary layer separation control of shark skin. *Bioinspiration & Biomimetics* 12:016009.
- [5] Taylor et al. (2003). Flying and swimming animals cruise at a Strouhal number tuned for high power efficiency. *Nature* 425, 707-711.
- [6] Munk (2008). Kinematics of swimming garter snakes (*Thamnophis sirtalis*). *Comp Biochem Physiol A* 150, 131-135.
- [7] Brischoux (2010). Swimming speed variation in amphibious sea snakes (Laticaudinae): a search for underlying mechanisms. *J Exp Mar Biol Ecol* 394, 116-122.
- [8] Abdel-Aal (2017). Review of friction and surface properties of snakeskin. *Handbook of Research on Biomimetics and Biomedical Robotics*, 276
- [9] Kern & Koumoutsakos (2006). Simulations of optimized anguilliform swimming. *J Exp Biol* 209, 4841-4857.
- [10] Piñeirua et al. (2015). Resistive thrust production can be as crucial as added mass mechanisms for inertial undulatory swimmers. *Physical Review E*, 92, 021001.
- [11] Segall et al. (2019). Hydrodynamics of frontal striking in aquatic snakes: drag, added mass, and the possible consequences for prey capture success. *Bioinspiration & biomimetics* 14, 036005.
- [12] Gray (1933) Studies in animal locomotion i. the movement of fish with special reference to the eel. *Journal of Experimental Biology* 10 (1), 88–104.
- [13] Lighthill (1960) Note on the swimming of slender fish. *Journal of FluidMechanics* 9 (2), 305–317.
- [14] Lighthill (1969) Hydromechanics of aquatic animal propulsion. *Annual Review of FluidMechanics* 1 (1), 413–446.
- [15] Lighthill (1970) Aquatic animal propulsion of high hydromechanical efficiency. *Journal of FluidMechanics* 44 (02), 265–301.



- [16] Lighthill (1971) Large-amplitude elongated-body theory of fish locomotion. Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences 179 (1055), 125–138.