

Projet de recherche doctoral (PRD) : Dynamique des fluides de la nage des serpents

Encadrement : **R. Godoy-Diana** (Laboratoire PMMH, UMR7636 CNRS, ESPCI Paris-PSL, Sorbonne Université, Université de Paris) ; **A. Herrel** (MECADEV, UMR7179 CNRS, MNHN) ; **X. Bonnet** (CEBC, CNRS /Université de la Rochelle).

État de l'art

Les mouvements locomoteurs sont d'une telle complexité, en particulier lorsque des parties déformables du corps interagissent avec l'environnement, que seule une approche combinant des mesures expérimentales avec des modèles numériques est assez puissante pour caractériser, analyser, puis tester la variété des cinétiques qui existent dans le règne animal^{1,2}. En effet, les variations des modes et des performances locomotrices reflètent l'étendue de la diversité biologique au niveau intra- et interspécifique. D'ailleurs, la presque totalité des publications récentes qui portent sur l'étude de la biomécanique du déplacement fait appel à la modélisation³⁻⁵. Un excellent exemple de cette complexité est celui des mouvements ondulatoires des vertébrés, dont le corps souple et déformable interagit avec le substrat en fonction de la cinétique du déplacement, notamment en milieu aquatique⁶⁻⁹.

Mais en contrepoint de ces difficultés, les serpents offrent un modèle extrêmement unifié de mode locomoteur. En effet, malgré une grande diversité biologique (plus de 3.400 espèces terrestres, fouisseuses, arboricoles, aquatiques...), le déplacement par ondulations latérales est opérant dans de très nombreux milieux : sur le sol, dans les galeries, dans les arbres, dans le sable ou dans l'eau par exemple¹⁰. C'est précisément cette polyvalence inégalée d'un seul mode locomoteur qui motive le développement exponentiel des recherches en biomimétique des principaux laboratoires de robotique¹¹⁻¹⁴. Toutes les espèces de serpents, terrestres, amphibiens et marines sont capables de nager ; la reptation par ondulations prédispose l'animal à la nage. Mais la façon dont un individu modifie sa cinétique ondulatoire en passant d'un milieu à un autre est un champ totalement vierge : les transitions de cinétique ondulatoire qui permettent à un animal de ramper puis de nager, échappent encore aux modèles empiriques et théoriques.

En apparence, les mouvements ondulatoires semblent à peu près identiques dans tous les milieux. Pourtant, les relations avec le substrat sont radicalement différentes dans un milieu solide où l'animal utilise des points (ou des surfaces) d'appui versus dans l'eau où les forces propulsives proviennent des écoulements tourbillonnaires générés par les ondulations^{9, 15-16}. Si la reptation sur le sol est relativement bien caractérisée, la cinétique ondulatoire de la nage des serpents est beaucoup moins bien connue. Ce projet de thèse vise cette lacune. Une hypothèse centrale est qu'un serpent qui nage optimise l'amplitude et la fréquence des ondulations afin de maximiser la production de force propulsive tout en minimisant la dépense énergétique des mouvements musculaires en fonction de son anatomie qui peut être assez différente d'une espèce à l'autre. A notre connaissance cette hypothèse n'a jamais été testée, notamment parce que la modélisation de l'efficacité de la nage ondulatoire des serpents n'est pas suffisamment développée sur les plans empiriques et théoriques. La première étape à franchir consiste justement à établir un lien fonctionnel entre la nage ondulatoire et la production de forces propulsives. Cette étape représente le verrou scientifique central de ce projet.

Objectifs interdisciplinaires

Le principal objectif scientifique du projet consiste à concevoir et développer une méthode pour estimer l'efficacité propulsive des différentes manœuvres de nage utilisées par les serpents. Cette question biomécanique servira d'une part à éclairer des questions de biologie évolutive, et d'autre part à établir des principes bio-inspirés pour la conception des robots nageurs. L'approche est fondamentalement interdisciplinaire puisqu'elle repose sur la zoologie, la mécanique des fluides et la modélisation. En effet, il est nécessaire d'atteindre les trois objectifs spécifiques suivants :

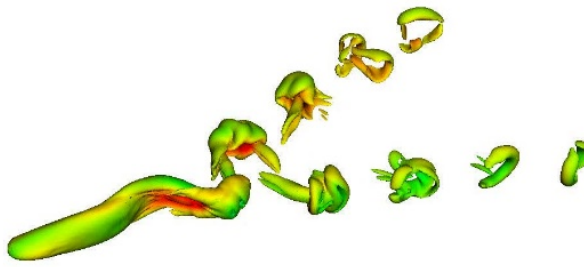


Figure : Visualisation 3D des structures tourbillonnaires modélisées lors de la nage d'une « anguille » virtuelle dont la cinétique de nage a été imposée numériquement [Bhalla et al. 2013]¹⁷.

- 1) D'acquérir des séquences précises et pertinentes des cinétiques de la nage de serpents. Il sera alors primordial de différencier une nage de routine d'une nage de fuite panique par exemple. En effet, si dans la première modalité de nage l'animal devrait optimiser la balance entre l'effort énergétique et l'efficacité de la nage, dans la seconde il devrait déplacer le compromis vers la maximisation de la vitesse ou de l'accélération au détriment de l'économie énergétique. Des paramètres comme l'endurance, la résistance, ou la fatigue durant l'effort devront être caractérisés pour caractériser correctement les régimes ondulatoires qui optimisent la production des structures tourbillonnaires. L'expertise de terrain dans l'étude des serpents de l'équipe d'encadrement (X. Bonnet et A. Herrel) sera primordiale pour extraire et interpréter correctement les séquences de nage qui serviront de substrat à la modélisation.
- 2) De mesurer simultanément l'écoulement tourbillonnaire généré par l'animal en déplacement et les mouvements exacts de l'animal. Idéalement, des vidéos des éléments du squelette dont les mouvements relatifs représentent les structures de base de la cinétique synchronisés avec des vidéos externes caractérisant les mouvements de l'enveloppe externe qui interagissent avec le milieu (l'eau) devront être enregistrées. Cette phase fait appel à la biomécanique pour l'acquisition et l'analyse des séquences de nage et à la dynamique des fluides pour l'acquisition et l'analyse des écoulements (vélocimétrie par image des particules).
- 3) De développer un modèle pertinent de la nage ondulatoire à partir des vidéos et des mesures effectuées. Si la mécanique des fluides permet actuellement de modéliser correctement l'ensemble des forces hydrodynamiques mises en jeu avec des corps rigides qui se déplacent dans l'eau, les corps qui se modifient de façon continue posent des problèmes majeurs (cf. article de revue par Godoy-Diana & Thiria, 2018¹⁶). Un élément clé pour obtenir une modélisation correcte repose sur la caractérisation de la dynamique des tourbillons qui se détachent du nageur¹⁶⁻¹⁸.

Les objectifs du PRD sont donc précisément identifiés. Il s'agit premièrement d'obtenir simultanément des cinétiques de nage pertinentes et des mesures du champ de vitesse permettant de caractériser l'écoulement produit par les ondulations de l'animal. Puis à partir de cette base, de décrire les relations entre ces deux familles de paramètres, afin d'en dériver un modèle prédictif capable de déterminer comment les performances de nage varient en fonction de la cinématique des ondulations. Le projet se place donc clairement à l'interface entre la zoologie et la mécanique des fluides.

Méthodologie

Les espèces de serpents utilisées seront la couleuvre vipérine (*Natrix maura*) et/ou la couleuvre à collier (*Natrix natrix*). Elles sont communes en France, amphibies, aussi bien à l'aise que dans l'eau (nage de surface et plongée), totalement inoffensives (aucun risque de morsure lors des manipulations), et remarquablement dociles. Quelques individus (maximum cinq) seront capturés sur le terrain (l'équipe encadrant a les autorisations de captures, les certificats de capacité, et les agréments d'établissement pour héberger des animaux). Gardés en captivité durant quelques jours, ils seront relâchés à l'endroit exact de leur capture après les mesures. Les expérimentations de nage

sont non-invasives et très bien tolérées par les animaux, aucune précaution particulière n'est à prévoir. Chez les deux espèces envisagées, la captivité durant quelques jours ou quelques semaines ne pose aucun souci particulier. Nos équipes maîtrisent l'élevage des reptiles et les problèmes de bien être afin de minimiser le stress de capture et de captivité.

Afin de visualiser simultanément la cinétique ondulatoire de la nage et l'écoulement engendré, nous utiliserons le plateau technique de l'équipe FUNEVOL dédié à l'analyse des mouvements des animaux :

- 1) Les mouvements de nage ondulatoire des serpents seront enregistrés grâce à la vidéo-radiographie 3D couplée à l'enregistrement des vidéos de haute résolution avec des caméras externes.
- 2) Les écoulements mis en mouvement par les serpents seront enregistrés grâce à un système de mesures de vélocimétrie par images de particules (PIV) volumétrique. Cet équipement permet de visualiser et d'analyser le champ de vitesse dans le fluide de façon non-intrusive.

Références

1. Biewener A & Patek S. (2018). *Animal locomotion*. Oxford University Press.
2. Riskin DK, Willis DJ, Iriarte-Díaz et al. (2008). Quantifying the complexity of bat wing kinematics. *Journal of Theoretical Biology* 254, 604-615.
3. Koehler C, Liang Z, Gaston Z, et al. (2012). 3D reconstruction and analysis of wing deformation in free-flying dragonflies. *Journal of Experimental Biology* jeb-069005.
4. Bishop PJ, Hocknull SA, Clemente CJ, Hutchinso JR, Farke AA, Barrett RS & Lloyd DG. (2018). Cancellous bone and theropod dinosaur locomotion. Part III—Inferring posture and locomotor biomechanics in extinct theropods, and its evolution on the line to birds. *PeerJ* 6, e5777.
5. Palyanov A, Khayrulin S & Larson SD. (2018). Three-dimensional simulation of the *Caenorhabditis elegans* body and muscle cells in liquid and gel environments for behavioural analysis. *Philosophical Transactions of the Royal Society B, Biological Sciences* 373, 20170376.
6. Fish FE & Lauder GV. (2006). Passive and active flow control by swimming fishes and mammals. *Annual Review of Fluid Mechanics* 38, 193-224.
7. Maladen RD, Ding YLC & Goldman DI. (2009). Undulatory swimming in sand: subsurface locomotion of the sandfish lizard. *Science* 325, 314-318.
8. Piñeirua et al. (2015), Resistive thrust production can be as crucial as added mass mechanisms for inertial undulatory swimmers. *Physical Review E* 92, 021001
9. Müller UK, Smit J, Stamhuis EJ & Videler JJ. (2001). How the body contributes to the wake in undulatory fish swimming: flow fields of a swimming eel (*Anguilla anguilla*). *Journal of Experimental Biology* 204, 2751-2762.
10. Xiao J & Chen X. (2013). Buckling morphology of an elastic beam between two parallel lateral constraints: implication for a snake crawling between walls. *Journal of The Royal Society Interface* 10, 20130399.
11. Hopkins et al. (2009), A survey of snake-inspired robot designs. *Bioinspiration & Biomimetics* 4, 021001
12. Ijspeert AJ. (2014). Biorobotics: Using robots to emulate and investigate agile locomotion. *Science* 346, 196-203.
13. Bergmann & Iollo (2016), Bioinspired swimming simulations. *Journal of Computational Physics* 323, 310-321
14. Yang GZ, Bellingham J, Dupont PE, et al. (2018). The grand challenges of Science Robotics. *Science Robotics* 3, eaar7650.
15. Majmudar T, Keaveny EE, Zhang J & Shelley MJ. (2012). Experiments and theory of undulatory locomotion in a simple structured medium. *Journal of The Royal Society Interface*, rsif20110856.
16. Godoy-Diana R & Thiria B. (2018). On the diverse roles of fluid dynamic drag in animal swimming and flying. *Journal of The Royal Society Interface*, 15, 20170715.
17. Bhalla APS, Griffith BE & Patankar NA. (2013). A forced damped oscillation framework for undulatory swimming provides new insights into how propulsion arises in active and passive swimming. *PLoS computational Biology* 9, e1003097.
18. Gazzola M, Argentina M & Mahadevan L. (2014). Scaling macroscopic aquatic locomotion. *Nature Physics* 10, 758-761. DOI: 10.1038/NPHYS3078