

Contrat doctoral Etablissement 2026/2029

Contrat à 100 %

Formulaire de candidature

Titre de la thèse	Dynamique et auto-organisation d'agents auto-propulsés
Ecole Doctorale	ED548
Laboratoire	Centre de Physique Théorique, CPT, UMR 7332
Discipline	Mathématiques
Directeur(s) de Thèse & Encadrant(s)	Jérôme Daquin , Xavier Leoncini

Description du sujet de recherche

Contexte, originalité et pertinence par rapport à l'état de l'art :

Ce travail de thèse propose d'explorer des mécanismes fondamentaux qui gouvernent la dynamique collective de systèmes composés de plusieurs agents auto-propulsés. Il s'inscrit dans une stratégie de l'université de Toulon (UTLN), centrée sur la mer et la dynamique des drones sous-marins. Le ou la doctorant.e intégrera le laboratoire du Centre de Physique Théorique (CPT) et sera membre de l'équipe « dynamique non-linéaire », forte de plusieurs collaborations nationales et internationales (Danemark, Mexique, Chine, fédération de fusion par confinement magnétique pour ne citer que quelques exemples) en synergie avec les thèmes de la thèse.

De nombreux systèmes naturels, tels que les bancs de poissons, les nuées d'oiseaux ou les colonies bactériennes, présentent des comportements émergents résultant à la fois d'interactions entre agents et d'interactions hydrodynamiques avec le milieu [1-3]. Comprendre ces phénomènes à la croisée des systèmes dynamiques, de la mécanique des fluides, de l'auto-organisation et de la modélisation multi-agents constitue un enjeu majeur pour de nombreuses applications.

L'exploitation des écoulements du fluide ambiant a le potentiel d'améliorer significativement la portée et la vitesse d'un agent permettant, par exemple, un déplacement plus économe [4].

Lorsque plusieurs agents évoluent simultanément dans un même environnement, l'exploitation des propriétés des écoulements générés ouvre la voie à des configurations remarquables naturelles et des modes collectifs de navigation, potentiellement encore plus efficaces en termes de portée, vitesse ou consommation énergétique.

Dans cette optique, nous nous intéresserons ici à des agents auto-propulsés évoluant à haut nombre de Reynolds ainsi qu'aux flots non-autonomes pouvant entraîner une advection chaotique [5]. Afin d'explorer ces mécanismes, les propriétés de la dynamique seront analysées à l'aide des structures cohérentes lagrangiennes qui fournissent un cadre pertinent pour caractériser l'organisation et le transport au sein du fluide [6], en utilisant des outils lagrangiens [7] et autres fonctions de complexité [8].

Les travaux viseront des applications à la conception de systèmes robotiques de type essaims de drones sous-marins, en s'appuyant sur des dynamiques de navigation fondées sur ces propriétés hydrodynamiques. La thèse combinera des approches théoriques et des simulations numériques. La maîtrise de l'outil informatique (langage de programmation de type fortran95, C, C++) et d'analyse des données (octave, matlab, python) est nécessaire.

Objectifs :

Cette thèse vise à étudier des propriétés dynamiques et hydrodynamiques d'agents auto-propulsés. Les objectifs incluent la compréhension de mécanismes fondamentaux liés à l'auto-organisation, le développement d'outils numériques performants et l'analyse de données issues de simulations.

Il est attendu que les travaux donnent lieu à plusieurs publications dans des revues internationales à comité de lecture (comme Physical Review Letters, Physical Review E, Nonlinearity par exemple) et à des présentations lors de conférences nationales et internationales.

Méthodes :

Les méthodes reposent sur des approches combinant modélisation théorique et simulations numériques. Les dynamiques des agents auto-propulsés seront étudiées à l'aide de modèles lagrangiens, couplés à des écoulements prescrits ou calculés, afin de caractériser les mécanismes d'advection et d'interaction. L'analyse s'appuiera notamment sur l'identification de structures cohérentes lagrangiennes et sur des outils issus des systèmes dynamiques (exposants de Lyapunov, fonctions de complexité) pour quantifier l'organisation du transport et/ou les propriétés chaotiques du flot. Ces approches seront mises en œuvre via des simulations intensives et des techniques d'analyse de données, permettant d'explorer différents régimes dynamiques et de valider des hypothèses théoriques.

Retombées attendues :

Les retombées de cette thèse concernent à la fois la recherche fondamentale et des applications potentielles pour des systèmes robotiques d'essaims de drones sous-marins où les stratégies de navigation incluent et se basent sur des propriétés hydrodynamiques.

Mots clés :

Hydrodynamique ; agents auto-propulsés ; mouvement collectif ; drone sous-marin

Références :

- [1] Ko, H., Lauder, G. and Nagpal, R., 2023. The role of hydrodynamics in collective motions of fish schools and bioinspired underwater robots. *Journal of the Royal Society Interface*, 20(207).
- [2] Timm, M.L., Pandhare, R.S. and Masoud, H., 2024. Multi-body hydrodynamic interactions in fish-like swimming. *Applied Mechanics Reviews*, 76(3), p.030801.
- [3] Filella, A., Nadal, F., Sire, C., Kanso, E. and Eloy, C., 2018. Model of collective fish behavior with hydrodynamic interactions. *Physical review letters*, 120(19), p.198101.
- [4] Gunnarson, P. and Dabiri, J.O., 2025. Surfing vortex rings for energy-efficient propulsion. *PNAS nexus*, 4(2), p.pgaf031.
- [5] Leoncini, X., Agullo, O., Muraglia, M. and Chandre, C., 2006. From chaos of lines to Lagrangian structures in flux conservative fields. *The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems*, 53(3), pp.351-360.
- [6] Haller, G., 2015. Lagrangian coherent structures. *Annual review of fluid mechanics*, 47(1), pp.137-162.
- [7] Daquin, J., Pédenon-Orlanducci, R., Agaoglou, M., Garcia-Sanchez, G. and Mancho, A.M., 2022. Global dynamics visualisation from Lagrangian Descriptors. Applications to discrete and continuous systems. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 442, p.133520.
- [8] Faranda, D., Leoncini, X. and Vaienti, S., 2014. Mixing properties in the advection of passive tracers via recurrences and extreme value theory. *Physical Review E*, 89(5), p.052901.

Encadrement et conditions matérielles pour le doctorant

Le lieu de travail est le campus La Garde de l'université de Toulon où un bureau sera mis à disposition. Le ou la doctorant.e aura accès aux environnements numériques de l'université de Toulon et autres facilités du laboratoire du Centre de Physique Théorique. Un bureau sur le campus de Luminy est aussi mis à disposition. Le ou la doctorant.e aura accès à une machine partagée d'équipe (machine SMP 24 coeurs physiques), des serveurs plus puissants au laboratoire selon le besoin, voir au-delà un meso-centre de calcul à Aix Marseille Université.

Compétences attendues et personnes à contacter

Compétences attendues :

La thèse combine des approches théoriques et numériques. Sur le plan théorique, des connaissances en théorie des systèmes dynamiques, chaos hamiltonien, mécanique des fluides et physique statistique sont souhaitées.

Sur le plan numérique, une connaissance des langages de programmation (de type Fortran 95, C, C++) est nécessaire, ainsi que des outils d'analyse de données (tels que Octave, Matlab ou Python).

Personne(s) à contacter :

Jérôme Daquin, jerome.daquin@cpt.univ-mrs.fr