

People's Democratic Republic of Algeria
Ministry of Higher Education and Scientific Research
École Supérieure en Informatique — 08 Mai 1945 — Sidi Bel Abbès



THESIS

To obtain the diploma of **Master Degree**

Field: **Computer Science**

Specialty: **Artificial Intelligence and Data Science (AIDS)**

Collective Behaviour in Multi-Agent Systems: From Biological Foundations to Graph-Based Learning

Presented by: Ould Larbi Rayane Nouredine

Supervised by: Dr. Belkacem KHALDI

In front of the jury composed of:

Dr. BABA AHMED Manel	Président
Dr. NAIB Rabiaa	Examinator

Submission Date: 6 July 2026

Abstract

The collective behaviour of multi-agent systems encompassing phenomena such as flocking, alignment, and spatial grouping has attracted sustained scientific interest across biology, physics, robotics, and artificial intelligence. The capacity to automatically classify the collective state of a swarm from observed trajectories constitutes a foundational prerequisite for autonomous swarm monitoring, adaptive formation control, and scientific discovery in biological systems. Despite decades of research, the problem remains substantially open: classical feature-based approaches discard relational structure; sequential deep learning models capture temporal dynamics but ignore inter-agent interactions; and graph-based methods are only beginning to be applied systematically to this domain.

This thesis presents a comprehensive survey of the theoretical foundations, computational models, machine learning methodologies, and open research challenges in collective behaviour classification. Beginning from the biological origins of swarm intelligence and the mathematical models of collective motion introduced by Reynolds, Vicsek, and Couzin, the thesis traces the evolution of the field through classical feature engineering, deep learning, and graph-based representation learning.

Keywords:

Collective Behaviour, Multi-Agent Systems, Swarm Intelligence, Graph Neural Networks, Graph Attention Networks, Temporal Sequence Modelling, Reynolds Boid Model, Vicsek Model, Trajectory Classification, Spatial-Temporal Learning, N-Invariance, Symbolic Regression.

Résumé

Le comportement collectif des systèmes multi-agents, englobant des phénomènes tels que le regroupement (*flocking*), l'alignement et le regroupement spatial, suscite un intérêt scientifique constant dans des domaines tels que la biologie, la physique, la robotique et l'intelligence artificielle. La capacité à classer automatiquement l'état collectif d'un essaim à partir des trajectoires observées constitue un prérequis fondamental pour la surveillance autonome des essaims, le contrôle adaptatif des formations et la découverte scientifique dans les systèmes biologiques.

Malgré plusieurs décennies de recherche, ce problème demeure largement ouvert. Les approches classiques fondées sur l'ingénierie de caractéristiques éliminent la structure relationnelle des interactions entre agents ; les modèles d'apprentissage profond séquentiel capturent les dynamiques temporelles mais négligent les interactions inter-agents.

Cette thèse présente une étude approfondie des fondements théoriques, des modèles computationnels, des méthodologies d'apprentissage automatique et des principaux défis de recherche liés à la classification des comportements collectifs. En s'appuyant sur les origines biologiques de l'intelligence en essaim et sur les modèles mathématiques du mouvement collectif proposés par Reynolds, Vicsek et Couzin, cette étude retrace l'évolution du domaine, depuis les approches classiques fondées sur l'ingénierie de caractéristiques jusqu'aux méthodes modernes d'apprentissage profond et d'apprentissage de représentations basées sur les graphes.

Mots-clés : comportement collectif, systèmes multi-agents, intelligence en essaim, réseaux de neurones graphiques, réseaux d'attention sur graphes, modélisation des séquences temporelles, modèle de boids de Reynolds, modèle de Vicsek, classification des trajectoires, apprentissage spatio-temporel, invariance à la taille de l'essaim (N-Invariance), régression symbolique.

الملخص

يُعدّ السلوك الجماعي في الأنظمة متعددة الوكلاء، والذي يشمل ظواهر مثل التجمّع ، والمحاذاة ، والتجمّع المكاني ، من المواضيع التي حظيت باهتمام علمي واسع في مجالات علم الأحياء، والفيزياء، والروبوتات، والذكاء الاصطناعي. وتُعد القدرة على التصنيف الآلي للحالة الجماعية للسرب اعتماداً على المسارات المرصودة شرطاً أساسياً للمراقبة الذاتية للأسراب، والتحكم التكيفي في تشكيلاتها، ودعم الاكتشافات العلمية في الأنظمة البيولوجية.

وعلى الرغم من عقودٍ من الأبحاث، لا تزال هذه المشكلة تمثل تحدياً مفتوحاً إلى حد كبير. فالأساليب التقليدية القائمة على هندسة الخصائص تتجاهل البنية العلائقية للتفاعلات بين الوكلاء، بينما تنجح نماذج التعلم العميق التسلسلية في تمثيل الديناميكيات الزمنية لكنها تهمل التفاعلات بين الوكلاء، في حين أن الأساليب المعتمدة على الشبكات البيانية لم تبدأ إلا مؤخراً في التطبيق المنهجي على هذا المجال.

تقدم هذه الرسالة دراسة شاملة للأسس النظرية، والنماذج الحاسوبية، ومنهجيات التعلم الآلي، والتحديات البحثية المفتوحة في مجال تصنيف السلوكيات الجماعية. وتنطلق الدراسة من الأصول البيولوجية لذكاء الأسراب والنماذج الرياضية للحركة الجماعية التي اقترحها كل من رينولدز، وفيسيك، وكوزين، ثم تستعرض تطور هذا المجال بدءاً من أساليب هندسة الخصائص التقليدية وصولاً إلى تقنيات التعلم العميق الحديثة وأساليب تعلم التمثيلات القائمة على الشبكات البيانية.

الكلمات المفتاحية: السلوك الجماعي، الأنظمة متعددة الوكلاء، ذكاء الأسراب، الشبكات العصبية البيانية، شبكات الانتباه البيانية، نمذجة التسلسلات الزمنية، نموذج بويدز لرينولدز، نموذج فيسيك، تصنيف المسارات، التعلم الانحدار الرمزي، (N-Invariance) الزماني-المكاني، التلاغير بالنسبة لحجم السرب.