

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 **Engineering Degree**

Field: **Computer Science**

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

Advanced Spatial-Temporal Deep Learning for Collective Swarm Behavior Classification and Embodied Inference

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 Examiner

Submission Date: 6 July 2026

Abstract

Collective motion in multi-agent systems encompassing drone swarms, robotic fleets, fish schools, and simulated boid populations represents one of the most compelling examples of emergent complexity in natural and engineered systems. These collective behaviours arise not from centralised coordination but from the accumulation of local, rule-governed interactions between individual agents, and their automatic classification from trajectory data constitutes a **challenging Multivariate Time Series Classification (MTSC) problem**. Classical approaches based on hand-crafted global order parameters velocity alignment, mean nearest-neighbour distance, polarisation, angular momentum combined with standard supervised classifiers (SVM, L-NN,DT,NB) suffer from three fundamental limitations: they discard the relational structure of agent interactions, they aggregate temporal dynamics into scalar summaries that lose sequence information, and they are not designed to generalise to swarms of varying size.

This thesis presents a comprehensive investigation of deep learning and symbolic artificial intelligence approaches for collective behaviour classification and interpretable swarm dynamics modelling. Four neural network architectures are designed, implemented, and systematically compared:

The second major contribution is the Embodied Inference Pipeline: a three-stage framework combining IR-Sim boid physics simulation, PySR evolutionary symbolic regression, and the frozen ST-GNN as classifier , which automatically discovers symbolic control laws of the form for all 19 positive collective behaviours in the dataset.

Keywords: collective behaviour classification, swarm intelligence, spatio-temporal graph neural network, multivariate time series classification, PySR, embodied inference, Reynolds boid model, emergent dynamics.

Résumé

Le mouvement collectif dans les systèmes multi-agents, notamment les essaims de drones, les flottes de robots, les bancs de poissons et les populations simulées de boids, constitue l'un des exemples les plus remarquables de complexité émergente dans les systèmes naturels et artificiels. Ces comportements collectifs ne résultent pas d'une coordination centralisée, mais de l'accumulation d'interactions locales régies par des règles entre les agents individuels. Leur classification automatique à partir de données de trajectoires représente un problème complexe de **classification de séries temporelles multivariées** (*Multivariate Time Series Classification – MTSC*).

Cette thèse présente une étude approfondie des approches fondées sur l'apprentissage profond et l'intelligence artificielle symbolique pour la classification des comportements collectifs et la modélisation interprétable des dynamiques d'essaims. Quatre architectures de réseaux de neurones sont conçues, implémentées et comparées de manière systématique.

La seconde contribution majeure est le **pipeline d'Embodied Inference**, un cadre en trois étapes combinant le simulateur physique de boids IR-Sim, la régression symbolique évolutive PySR et un classifieur ST-GNN préalablement entraîné et figé. Ce pipeline découvre automatiquement des lois de contrôle symboliques correspondant aux 19 comportements collectifs positifs présents dans le jeu de données.

Mots-clés : classification des comportements collectifs, intelligence en essaim, réseau de neurones graphiques spatio-temporel, classification de séries temporelles multivariées, PySR, Embodied Inference, modèle de boids de Reynolds, dynamique émergente.

الملخص

تُعَدُّ الحركة الجماعية في الأنظمة متعددة الوكلاء، بما في ذلك أسراب الطائرات المسيّرة، وأسطول الروبوتات، وأسراب الأسماك، المحاكاة، من أبرز الأمثلة على التعقيد الناشئ في الأنظمة الطبيعية والهندسية. ولا تنشأ هذه السلوكيات الجماعية **Boids** ومجموعات نتيجة تنسيق مركزي، بل تتولد من تراكم التفاعلات المحلية المحكومة بقواعد بين الوكلاء الأفراد. وتمثل عملية تصنيف هذه السلوكيات تلقائياً انطلاقاً من بيانات المسارات تحدياً مهماً في مجال **تصنيف السلاسل الزمنية متعددة المتغيرات**.

تعتمد الأساليب التقليدية على مؤشرات عالمية مصممة يدوياً، مثل محاذاة السرعات، ومتوسط المسافة إلى أقرب جار، والاستقطاب، إلا أن هذه الأساليب تعاني من NB وDT وL-NN وSVM والزخم الزاوي، مع استخدام مصنفات تعلم خاضع للإشراف مثل ثلاث مشكلات رئيسية: فهي تتجاهل البنية العلائقية للتفاعلات بين الوكلاء، وتختزل الديناميكيات الزمنية إلى ملخصات إحصائية تفقد المعلومات التسلسلية، كما أنها غير قادرة على التعميم على الأسراب ذات الأحجام المختلفة.

تقدم هذه الأطروحة دراسة شاملة لأساليب التعلم العميق والذكاء الاصطناعي الرمزي من أجل تصنيف السلوكيات الجماعية وبناء نماذج قابلة للتفسير لديناميكيات الأسراب. وقد تم تصميم أربع معماريات مختلفة للشبكات العصبية وتنفيذها ومقارنتها بصورة منهجية.

وهو إطار عمل **(Embodied Inference Pipeline)** وتتمثل المساهمة الثانية الرئيسة في **خط أنابيب الاستدلال المتجسد** ومصنف **PySR** وخوارزمية الانحدار الرمزي التطورية **IR-Sim** يتكون من ثلاث مراحل يجمع بين محاكي الفيزياء مدرب مسبقاً وثابت المعلومات. ويستطيع هذا الإطار اكتشاف قوانين تحكم رمزية تلقائياً لجميع السلوكيات الجماعية **ST-GNN**. الإيجابية التسعة عشر الموجودة في مجموعة البيانات.

الكلمات المفتاحية: تصنيف السلوكيات الجماعية، ذكاء الأسراب، الشبكات العصبية البيانية الزمانية-المكانية، تصنيف السلاسل الديناميكيات الناشئة **Reynolds Boid** الاستدلال المتجسد، نموذج **PySR**، الزمنية متعددة المتغيرات.