

People's Democratic Republic of Algeria
Ministry of Higher Education and Scientific Research
Higher School of Computer Science
8 May 1945 - Sidi Bel Abbès



MASTER'S THESIS

In partial fulfillment of the requirements for the Master's degree

Field: **Computer Science**

Specialty: **Ingénierie des Systèmes Informatiques &
Intelligence Artificielle et Science de Données**

Theme

**Digital Twins for Intelligent Irrigation in Precision
Agriculture: Foundations and, State of the Art**

Presented by:

- Mr. Lebaili Mohamed Ouail
- Mr. Senhadji Mohamed Said

Defended on: 07/07/2026

Before the jury composed of:

- Dr. BENCHERIF Khayra
- Dr. BEZZAOUCHA Fatima Souad
- Pr. MALKI Mimoun
- Dr. MALKI Abdelhamid
- Dr. MALKI Abdelhamid

Présidente
Examinatrice
Encadreur
Co-Encadreur
Représentant de l'incubateur

Academic Year: 2025 / 2026

Abstract

Agriculture is increasingly affected by water scarcity, climate variability, soil degradation, and the growing demand for food production. Irrigation management is one of the most critical factors in this context, because traditional irrigation practices are often based on fixed schedules, manual observation, or empirical experience. Such approaches can lead to water waste, plant stress, and reduced productivity. In response, this thesis presents the design and deployment of Agrio, a Digital Twin-based intelligent irrigation platform for precision agriculture.

The proposed system integrates a physical smart farming prototype, Libelium Smart Agriculture sensing equipment, XBee radio-frequency communication, a Raspberry Pi gateway, HiveMQ/MQTT messaging, a FastAPI backend, a PostgreSQL database, a Random Forest-based machine learning service, a Digital Twin state and simulation layer, a Next.js web dashboard, a Flutter mobile application, a WeMos actuator, and a water pump. The platform receives real sensor data from a controlled prototype environment, normalizes and stores the measurements, updates the virtual state of the irrigation zone, predicts irrigation need, simulates future moisture evolution, generates recommendations, supports human validation, schedules irrigation actions, and controls the physical pump through MQTT commands.

The Master 2 contribution of this work is the scientific study of Digital Twins in agriculture, with a focus on their maturity levels, enabling technologies, irrigation applications, and limitations. The engineering contribution is the implementation of an end-to-end cyber-physical prototype that connects sensing, communication, back-end processing, artificial intelligence, simulation, user interfaces, deployment, and actuation. The results show that the system goes beyond a classical IoT monitoring dashboard by providing synchronization, prediction, what-if simulation, recommendation, scheduling, and physical control. The current implementation remains a prototype tested in a controlled environment, and future work should extend it to long-term field validation, stronger agronomic calibration, cybersecurity, and advanced optimization techniques.

Keywords: Digital Twin, precision agriculture, smart irrigation, IoT, MQTT, XBee, Raspberry Pi, FastAPI, PostgreSQL, machine learning, Random Forest, water management, WeMos, smart farming.

Résumé

L'agriculture moderne fait face à des défis importants liés à la rareté de l'eau, aux variations climatiques et à la nécessité d'optimiser la production agricole. Dans ce contexte, l'irrigation intelligente constitue une application centrale de l'agriculture de précision. Ce mémoire présente la conception et le déploiement d'Agrio, une plateforme d'irrigation intelligente basée sur le concept de jumeau numérique. Le système proposé combine un prototype physique, un kit Libelium Smart Agriculture, une communication radiofréquence XBee, une passerelle Raspberry Pi, la messagerie MQTT/HiveMQ, un backend FastAPI, une base de données PostgreSQL, un service d'apprentissage automatique basé sur Random Forest, une couche de simulation du jumeau numérique, un tableau de bord web, une application mobile Flutter, un actionneur WeMos et une pompe d'eau.

La contribution scientifique porte sur l'étude de l'état de l'art des jumeaux numériques en agriculture et leur positionnement par rapport aux systèmes d'irrigation intelligents existants. La contribution d'ingénierie réside dans la mise en œuvre d'une chaîne complète reliant les capteurs, la communication IoT, le traitement backend, la prédiction, la simulation, la recommandation, la validation humaine et le contrôle physique de l'irrigation. Les résultats montrent que le système dépasse la simple visualisation IoT en intégrant la synchronisation, la prédiction, la simulation et l'action.

Mots-clés : jumeau numérique, agriculture de précision, irrigation intelligente, IoT, MQTT, apprentissage automatique, FastAPI, PostgreSQL.

ملخص

تواجه الزراعة الحديثة تحديات كبيرة مرتبطة بندرة المياه والتغيرات المناخية والحاجة إلى تحسين الإنتاجية. في هذا السياق، تمثل أنظمة الري الذكي أحد أهم تطبيقات الزراعة الدقيقة. يقدم هذا العمل منصة، Agrio، وهي منصة ري ذكية تعتمد على مفهوم التوأم الرقمي، حيث تجمع بين نموذج فيزيائي حقيقي، حساسات زراعية، اتصال لاسلكي، بوابة Raspberry Pi، بروتوكول MQTT، خادم خلفي، FastAPI قاعدة بيانات، PostgreSQL خدمة تعلم آلي، محاكاة رقمية، واجهة ويب، تطبيق هاتف، ومتحكم WeMos للتحكم في مضخة الماء.

تتمثل المساهمة العلمية في دراسة حالة الفن للتوائم الرقمية في الزراعة ومقارنة الأعمال الحالية، بينما تتمثل المساهمة الهندسية في بناء سلسلة كاملة من جمع البيانات إلى التنبؤ والمحاكاة والتوصية والتحكم الفعلي في المضخة. يبين العمل أن النظام لا يقتصر على مراقبة البيانات، بل يوفر تمثيلاً رقمياً متزامناً ودعماً ذكياً لاتخاذ القرار.

الكلمات المفتاحية: التوأم الرقمي، الزراعة الدقيقة، الري الذكي، إنترنت الأشياء، MQTT، XBee، Raspberry Pi، FastAPI، PostgreSQL، التعلم الآلي، Random، Forest، إدارة المياه، WeMos، الزراعة الذكية.