

الجمهورية الشعبية الديمقراطية الجزائرية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
المدرسة العليا للإعلام الآلي 08 ماي 5491. بسيدي بلعباس
École Supérieure en Informatique
-08 Mai 1945- Sidi Bel Abbès



Master's Thesis

To obtain the diploma of Master

Field: Computer Science

Specialties: Ingénierie des Systèmes Informatiques (ISI) & Artificial Intelligence and Data Science (IASD)

Theme

Intelligent Wireless Sensor Networks for Smart Agriculture: A Study of Zigbee-Based Infrastructure and AI-Driven Predictive Irrigation

Presented by:

MOULAY LAKHDAR Zakaria (ISI)

OMARI Abdessalaem (IASD)

Submission Date: **July, 2026**

In front of the jury composed of:

Dr. KHALDI Miloud

President

Dr. BENSENANE Hamdane

Supervisor

Dr. ELHANNANI Souad

Examiner

Dr. ABDELHAK Soumia

Incubator Representative

Academic Year : 2025/2026

Abstract

Freshwater scarcity and inefficient irrigation practices represent a critical threat to global food security. Agriculture accounts for approximately 70% of worldwide freshwater withdrawals, yet conventional surface irrigation methods achieve water use efficiencies of only 30–50%, with the remainder lost to evaporation, surface run-off, and deep percolation. This thesis addresses this challenge through two complementary engineering contributions: a literature-based comparative study of a Wireless Sensor Network (WSN) protocol design, and a machine learning (ML) predictive irrigation system.

In Part I, a criterion-by-criterion comparison of low-power wireless protocols for agricultural Internet of Things (IoT) environments is conducted. Zigbee is evaluated against competing standards including LoRaWAN and Bluetooth Low Energy (BLE), with respect to energy efficiency, transmission range, and network topology. The analysis justifies Zigbee’s self-healing mesh architecture as the most appropriate communication substrate for dense, field-level sensor deployments.

In Part II, an AI-driven predictive irrigation system is presented, designed to process multi-source IoT sensor data. The system classifies crop water requirements into three actionable levels: **Low**, **Medium**, and **High**. Trained on a dataset of 3,702 agricultural observations described by 5 agronomic and meteorological features, the system addresses a severe class imbalance (the **High** class constitutes only 15.48% of samples) through cost-sensitive learning and Nelder–Mead threshold optimisation. Eleven models were benchmarked under stratified 5-fold cross-validation. The Stacked Ensemble achieved the highest performance (accuracy 98.68%, Macro-F1 98.14%), while the LightGBM reached 98.68% accuracy and a Macro-F1 of 97.08%. Together, these contributions form the theoretical foundation for an integrated edge-computing irrigation system within the *Smart Agriculture with Zigbee* startup project.

Keywords— Smart Agriculture, Precision Irrigation, Wireless Sensor Networks, Zigbee, Machine Learning, IoT Sensor Data, Stacked Ensemble.

الملخص

تُعدّ إدارة المياه في الزراعة تحدياً كبيراً، لا سيما في المناطق الجافة حيث تشحّ المياه العذبة. تستهلك الزراعة نحو 70% من المياه العذبة في العالم، غير أن كميات كبيرة منها تُهدر بسبب أساليب الري غير الكفؤة. تقدم هذه المذكرة دراسة من جزأين لمواجهة هذا التحدي من خلال تصميم نظري لشبكة مستشعرات لاسلكية (WSN) ونظام تنبؤي يعتمد على تعلّم الآلة. في الجزء الأول، نجري دراسة مقارنة للبروتوكولات اللاسلكية منخفضة الطاقة لإنترنت الأشياء الزراعي. نقيم بروتوكول Zigbee مقارنة ببدايل مثل LoRaWAN و BLE، مع تحليل كفاءة استهلاك الطاقة، نطاق التغطية، وطوبولوجيا الشبكة، مما يبرر استخدام شبكة Zigbee المتداخلة لنشر المستشعرات على مستوى المزارع. في الجزء الثاني، نقدم نظام ري تنبؤي يعتمد على الذكاء الاصطناعي لمعالجة بيانات المستشعرات. يصنّف النظام احتياجات المحصول المائية إلى ثلاث فئات: منخفضة، متوسطة، أو عالية. تم تدريب النظام على 3,702 عينة زراعية توصف بـ 5 متغيراً، ويعالج تحدي اختلال توزيع الفئات (الفئة العالية تمثل 15.48% فقط). تم اختبار 11 نموذجاً باستخدام التحقق المتقاطع الطبقي ذي الخمسة أجزاء. حققت نموذج (LightGBM) أفضل النتائج بدقة بلغت 98.68% ودرجة F1-macro بلغت 98.16%. معاً، تشكل هاتان المساهمتان الأساس النظري لنظام ري متكامل ضمن مشروع الشركة الناشئة Smart Agriculture with Zigbee.

الكلمات المفتاحية--- الزراعة الذكية، الري الدقيق، شبكات المستشعرات اللاسلكية، Zigbee، تعلّم الآلة، إنترنت الأشياء، التعلم التجميعي المتراكم.

Résumé

La rareté des ressources en eau douce et l'inefficacité des pratiques d'irrigation constituent une menace critique pour la sécurité alimentaire mondiale. L'agriculture représente environ 70% des prélèvements mondiaux d'eau douce, tandis que les méthodes d'irrigation de surface conventionnelles n'atteignent qu'une efficacité de 30 à 50%, le reste étant perdu par évaporation, ruissellement et percolation. Ce mémoire aborde ce défi à travers deux contributions d'ingénierie complémentaires : une étude comparative basée sur la littérature portant sur la conception d'un Réseau de Capteurs Sans Fil (RCSF), et un système d'irrigation prédictif par apprentissage automatique (AA).

Dans la Partie I, une comparaison critère par critère des protocoles sans fil à faible consommation pour l'Internet des Objets (IoT) agricole est réalisée. Zigbee est évalué par rapport à des standards concurrents, notamment LoRaWAN et Bluetooth Low Energy (BLE), selon les critères d'efficacité énergétique, de portée de transmission et de topologie réseau. L'analyse justifie l'architecture maillée auto-cicatrisante de Zigbee comme le substrat de communication le plus adapté aux déploiements de capteurs denses en milieu agricole.

Dans la Partie II, un système d'irrigation prédictif basé sur l'IA est présenté. Le système classe les besoins en eau des cultures en trois niveaux opérationnels : **Low**, **Medium**, et **High**. Entraîné sur un jeu de données de 3 702 observations agricoles décrites par 5 variables agronomiques et météorologiques, le système traite un déséquilibre de classes sévère (la classe **High** ne représentant que 15,48% des échantillons) via un apprentissage sensible aux coûts et une optimisation de seuils par la méthode de Nelder–Mead. Onze modèles ont été évalués par validation croisée stratifiée à 5 plis. L'Ensemble Empilé a obtenu les meilleures performances (précision 98,68%, F1-macro 98,14%), tandis que LightGBM s'est classé deuxième avec 98,68% de précision. Ces contributions forment la base théorique d'un système d'irrigation intégré dans le cadre du projet de startup *Smart Agriculture with Zigbee*.

Mots-clés— Agriculture Intelligente, Irrigation de Précision, Réseaux de Capteurs Sans Fil, Zigbee, Apprentissage Automatique, Réseaux de Capteurs IoT, Ensemble Empilé.