الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Sétif 1 Université Ferhat Abbas
سطيف 1 جامعة فرحات عباس

Faculté des Sciences
Département d'informatique
كلية العلوم
قسم الإعلام الآلي

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

En vue de l'obtention du diplôme de Master

DOMAINE : Mathématique et Informatique
FILIÈRE : Informatique
SPÉCIALITÉ : Réseaux et Systèmes Distribués

Thème

Système d'Irrigation intelligent basé sur une Approche Hybride Multi-Agents AutoGen–CrewAI.

Présenté par :

KESKAS Nacer Allah
BENOUADFEL Makhlouf

Soutenu le 23 juin 2026, devant le jury composé de :

Président	Dr.Ferradji Mohamed Abderraouf	Université Ferhat Abbas Sétif 1
Encadrant	Dr. LAOUADI Mohamed Amine	Université Ferhat Abbas Sétif 1
Examinateur	Dr.Touahria Imad Eddine	Université Ferhat Abbas Sétif 1

Année Académique : 2025/2026

Résumé

Ce mémoire présente SmartAgent IoT, un système d'irrigation autonome basé sur une architecture hybride combinant les frameworks multi-agents AutoGen et CrewAI, pilotés par des grands modèles de langage. Face aux insuffisances des systèmes classiques à seuils fixes, inadaptés aux contraintes des zones semi-arides algériennes, la solution proposée introduit un Routeur Hybride qui évalue en temps réel la criticité de la situation et orchestre dynamiquement cinq agents spécialisés selon trois modes : NORMAL (AutoGen seul, sans appel LLM), WARNING (diagnostic anticipé via CrewAI) et DANGER (action physique immédiate avec activation de la pompe et alerte WhatsApp). Le système repose sur un microcontrôleur NodeMCU ESP8266, un capteur capacitif d'humidité du sol et une sonde DS18B20, communicant via MQTT. Deux mécanismes originaux renforcent sa précision : le calcul de tendances temporelles par régression linéaire pour anticiper les dérives hydriques, et des seuils agronomiques dynamiques fondés sur les recommandations FAO. Un mécanisme fail-safe garantit la continuité opérationnelle en cas d'indisponibilité du service d'inférence.

Mots-clés : IoT agricole, Multi-agents, LLM, AutoGen, CrewAI, Irrigation autonome, Algérie.

Abstract

This work presents SmartAgent IoT, an autonomous irrigation system based on a hybrid approach combining the AutoGen and CrewAI multi-agent frameworks, driven by large language models. Addressing the limitations of classical fixed-threshold systems, ill-suited to the constraints of Algerian semi-arid zones, the proposed solution introduces a Hybrid Router that evaluates situational criticality in real time and dynamically orchestrates five specialized agents across three operating modes : NORMAL (AutoGen only, without LLM calls), WARNING (anticipatory diagnosis via CrewAI), and DANGER (immediate physical action with pump activation and WhatsApp alert). The system relies on a NodeMCU ESP8266 microcontroller, a capacitive soil moisture sensor, and a DS18B20 probe, communicating via MQTT. Two original mechanisms enhance its precision : linear regression-based temporal trend calculation for early detection of water stress, and dynamic agronomic thresholds grounded in FAO recommendations. A fail-safe mechanism ensures operational continuity in the event of inference service unavailability.

Keywords : Agricultural IoT, Multi-agent systems, LLM, AutoGen, CrewAI, Autonomous irrigation, Algeria.

ملخص

تُعدّ إدارة الموارد المائية الزراعية في الجزائر تحدياً حرجاً، إذ يعاني جزء كبير من الأراضي الصالحةيقدّم هذا المذكرة نظام SmartAgent IoT، وهو نظام ري ذاتي يعتمد على مقاربة هجينة تجمع بين إطاري العمل متعددَي الوكلاء AutoGen وCrewAI، مدفوعَين بنماذج لغوية كبيرة. في مواجهة قصور الأنظمة الكلاسيكية ذات العتبات الثابتة، غير الملائمة لمتطلبات المناطق شبه الجافة في الجزائر، تقترح الحلول المطورة موجِّهاً هجيناً يُقيّم درجة الحرجية في الوقت الفعلي ويُنسّق ديناميكياً خمسة وكلاء متخصصين وفق ثلاثة أنماط تشغيل: NORMAL AutoGen وحده دون استدعاء نموذج لغوي، وWARNING تشخيص استباقي عبر CrewAI، وDANGER إجراء فوري مع تشغيل المضخة وإرسال تنبيه عبر WhatsApp. يرتكز النظام على متحكم دقيق NodeMCU ESP8266، وحساس سعوي لرطوبة التربة، ومسبار DS18B20، تتواصل فيما بينها عبر بروتوكول MQTT. يعزز دقته آليتان أصيلتان: حساب الاتجاهات الزمنية بالانحدار الخطي للكشف المبكر عن الإجهاد المائي، وعتبات زراعية ديناميكية مستندة إلى توصيات :FAO. كما تضمن آلية الأمان التشغيلية استمرارية النظام عند تعذّر الوصول إلى خدمة الاستدلال.

الكلمات المفتاحية : إنترنت الأشياء الزراعي · أنظمة متعددة الوكلاء · النماذج اللغوية ، الأنظمة متعددة الوكلاء، النماذج اللغوية الكبيرة،AutoGen ، CrewAI، الري الذاتي

‘

Table des matières

Table des figures I

Liste des tableaux II

Liste des abréviations III

Introduction Générale 1

1 IoT Agricole et Frameworks Multi-Agents 3
1.1 Introduction . . . 4
1.2 L'IoT Agricole — Concepts et Protocoles . . . 4
1.2.1 Définition . . . 4
1.2.2 Comparaison des protocoles IoT . . . 4
1.2.3 Structure des topics MQTT . . . 5
1.2.4 Télémétrie thermohygrométrique et dynamique de l'environnement 6
1.3 Framework AutoGen . . . 7
1.3.1 Origines . . . 7
1.3.2 Paramètres clés d'orchestration . . . 8
1.3.3 Avantages et limitations . . . 9
1.4 Framework CrewAI . . . 10
1.4.1 Origines . . . 10
1.4.2 Paramètres Clés d'orchestration . . . 11
1.4.3 Avantages et limitations . . . 11
1.5 Comparaison des Frameworks – AutoGen vs CrewAI . . . 12
1.5.1 Opposition des paradigmes et modèles d'orchestration . . . 12
1.5.2 Formalisation des agents et gestion des tâches : . . . 13
1.5.3 Mécanismes de validation . . . 13
1.5.4 Synthèse des paradigmes d'orchestration . . . 14
1.5.5 Complémentarité des cadres et rationale hybride . . . 14
1.6 Conclusion . . . 15

2 Approche et Conception 16
2.1 Introduction . . . 17
2.2 Approche globale en quatre couches . . . 17
2.2.1 Couche 1 : Perception (Acquisition et Actionnement) . . . 19
2.2.2 Couche 2 : Communication (Transmission) . . . 19
2.2.3 Couche 3 : Core (Traitement et Intelligence) . . . 19
2.2.4 Couche 4 : Application (Supervision et Notification) . . . 19
2.3 Architecture des agents . . . 20
2.3.1 Agent Coordinateur (AutoGen — UserProxyAgent) . . . 20

2.3.2 Agent Collecteur (AutoGen — AssistantAgent) 20
2.3.3 Agent Agronome (CrewAI) 21
2.3.4 Agent Analyste (CrewAI) 21
2.3.5 Agent Contrôleur (CrewAI) 21
2.3.6 Routeur Hybride 22
2.4 Modélisation du système 25
2.4.1 Analyse des besoins 25
2.4.2 Diagramme de cas d'utilisation 29
2.4.3 Diagramme de classe 29
2.4.4 Diagramme de séquence — Cycle de décision hybride 31
2.5 Conclusion 33

3 Implémentation **34**
3.1 Introduction 35
3.2 Environnement de développement 35
3.2.1 Configuration logicielle 35
3.2.2 Principales bibliothèques utilisées 36
3.3 Composants matériels 37
3.3.1 Microcontrôleur NodeMCU ESP8266 v3 CH340G 37
3.3.2 Capteur capacitif d'humidité du sol V1.2 37
3.3.3 Sonde de température DS18B20 38
3.3.4 Module relais 5 V 38
3.3.5 Mini-pompe à eau 5 V DC 38
3.3.6 Modèle de simulation 39
3.4 Backend FastAPI + MQTT + SQLite 41
3.4.1 Architecture du backend 41
3.4.2 Fail-Safe intégré à FastAPI 42
3.5 Agents AutoGen 43
3.5.1 UserProxyAgent (Coordinateur) 43
3.5.2 AssistantAgent (Collecteur) 43
3.6 agents CrewAI 45
3.6.1 Agent Agronome 45
3.6.2 Agent Analyste 45
3.6.3 Agent Contrôleur 46
3.6.4 Routeur Hybride 47
3.7 Configuration LLM 48
3.8 Dashboard React et alertes WhatsApp Twilio 49
3.8.1 Interface de supervision React 49
3.8.2 Alertes WhatsApp via Twilio 49
3.9 Conclusion 51

Conclusion générale et perspectives **52**

Références **55**

Table des figures

1.1 approche générale d'un système IoT agricole en quatre couches 4
1.2 Structure des topics MQTT et flux de communication. 6
1.3 Topologies conceptuelles des agents conversationnels AutoGen (Hub-and-Spoke)[2] 8
1.4 Architecture conceptuelle d'une équipe CrewAI[3] 10

2.1 Architecture globale et flux décisionnel du système SmartAgent IoT 18
2.2 Répartition des cinq agents entre les frameworks AutoGen et CrewAI 20
2.3 Diagramme détaillé du Routeur Hybride 24
2.4 Le diagramme de cas d'utilisation de les interactions entre les acteurs du système 29
2.5 Diagramme de class UML de SmartAgent IoT 30
2.6 Diagramme de séquence UML du cycle de décision en mode DANGER. 32

3.1 Environnement de développement : Visual Studio Code 36
3.2 Schéma de montage du prototype matériel 39
3.3 Implémentation du simulateur d'humidité du sol 40
3.4 Implémentation du simulateur de température du sol. 40
3.5 Extrait des logs d'exécution du simulateur Python 41
3.6 Endpoints principaux de fastAPI 41
3.7 Implémentation du fail-safe qui s'intègre à FastAPI 42
3.8 Implémentation de l'agent AutoGen UserProxyAgent (Coordinateur) 43
3.9 l'implémentation de l'agent AssistantAgent (Collecteur). 44
3.10 la fonction de calcul des tendances 44
3.11 Implémentation d'un agent CrewAI et de sa tâche (Agronome) 45
3.12 Implémentation d'un agent CrewAI et de sa tâche (Analyste) 46
3.13 Implémentation d'un agent CrewAI et de sa tâche (Contrôleur) 46
3.14 La logique de routage conditionnel de Routeur Hybride 47
3.15 Résultat final de l'exécution du cycle en mode DANGER 48
3.16 Configuration de LLM local (Ollama) 48
3.17 Interface de supervision React du système SmartAgent IoT 49
3.18 Configuration del'API Twilio WhatsApp 50
3.19 Message WhatsApp reçu via l'API Twilio en mode DANGER 50

Liste des tableaux

1.1 Comparaison des principaux protocoles de communication IoT 5
1.2 Spécifications nominales des capteurs environnementaux utilisés 7
1.3 Caractéristiques principales du framework théorique AutoGen 9
1.4 Caractéristiques principales du framework CrewAI..... 12
1.5 Matrice comparative qualitative et structurelle entre AutoGen et CrewAI 14

2.1 Les responsabilités et les technologies de chaque couche 19
2.2 Description synthétique des cinq agents de SmartAgent IoT..... 22
2.3 Caractéristiques des modes de fonctionnement du **Routeur Hybride**..... 24
2.4 Seuils agronomiques de référence pour le blé dur..... 27

3.1 Bibliothèques principales du projet SmartAgent IoT 36
3.2 Caractéristiques techniques du NodeMCU ESP8266 v3 37
3.3 Principes métrologiques du capteur capacitif d'humidité du sol V1.2 38
3.4 Spécifications Endpoints de l'API REST de la couche Core ……..42