N° d'ordre : .....

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Yahia Farès de Médéa
Faculté de Technologie
Département de Génie Électrique

THÈSE

En vue de l'obtention du diplôme de

Doctorat LMD en Automatique

Spécialité : ***Automatique***

Présentée par :

BENYEZZA Hamza

THÈME :

Fusion de données multi-capteurs et prise de décision intelligente : Application à un système de surveillance et contrôle d'un environnement agricole

Soutenue publiquement le : 12/07/2021

Devant le jury composé de :

M. OULD ZMIRLI Mohamed	**Prof.**	**Université de Médéa**	**Président**
M. BOUHEDDA Mounir	**MCA**	**Université de Médéa**	**Directeur de Thèse**
M. HOUASSINE Hamza	**MCA**	**Université de Bouira**	**Examinateur**
M. BENGHERBIA Billel	**MCA**	**Université de Médéa**	**Examinateur**
M. KARA Réda	**MCB**	**Université de Médéa**	**Invité**

Thèse préparée au sein du Laboratoire des Systèmes Électroniques Avancés (LSEA)
de l'Université de Médéa, ALGÉRIE

Dédicaces

Cette thèse représente l'aboutissement du soutien et des encouragements que mes parents m'ont prodigués tout au long de ma scolarité.

Je dédie aussi ce travail :

A mes frères et sœurs et leurs enfants

A tous mes amis

Remerciements

Je commence mes mots, par remercier ALLAH le Tout-Puissant, pour l'aide, la force et la patience qu'il m'a fournies tout au long de mon étude.

Puis, j'adresse mes plus chaleureux remerciements à mon Directeur de thèse, **Dr. Mounir BOUHEDDA**, pour avoir assuré de manière agréable le suivi de mon travail et pour m'avoir fait profiter de son expérience. Ses compétences scientifiques, ses conseils, sa disponibilité et ses qualités humaines ont largement contribué à l'aboutissement de ce travail. Monsieur, je suis reconnaissant et très fièr d'avoir travaillé avec vous, en Master et en Doctorat.

Je remercie profondément, Monsieur **Mohamed OULD ZMIRLI**. Professeur à l'Université de Médéa qui m'a fait l'honneur de présider le jury de ce travail.

Je remercie également les membres de jury : Monsieur **Hamza HOUASSINE**, Maître de Conférence Classe A à l'Université de Bouira, et Monsieur **Billel BENGHERBIA**, Maître de Conférence Classe A à l'Université de Médéa d'avoir accepté d'examiner ma thèse.

Je tiens à exprimer mes reconnaissances au **Dr. Réda KARA**, pour son soutien scientifique et humain tout au long de ce travail de recherche.

Je ne pourrais également oublier de remercier **Dr. Samia REBOUH** pour sa participation à la rédaction des publications.

Les travaux présentés dans ce manuscrit ont été réalisés au sein du Laboratoire des Systèmes Électroniques Avancés (LSEA) de l'Université de Médéa. Je tiens pour cela à remercier encore fois le directeur **Pr. Mohamed OULD ZMIRLI** et tous les membres de Laboratoire.

Rien de ce travail n'aurait pu être réalisé sans le respect de mon travail, le soutien et l'aide de ma mère, mon père ainsi qu'à tous les membres de ma famille.

Enfin, je ne saurais terminer cette liste sans adresser un remerciement particulier à tous mes amis.

Liste des publications

Les travaux de recherche de cette thèse ont conduit aux publications suivantes :

Publications internationales (catégorie A^+) :

H. Benyezza, M. Bouhedda, and S. Rebouh, "Zoning Irrigation Smart System based on Fuzzy Control Technology and IoT for Water and Energy Saving," J. Clean. Prod., vol. 302, p. 127001, Apr. 2021.

URL : *https ://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652621012208*

Conférences internationales (IEEE) :

[1] H. Benyezza, M. Bouhedda, M. C. Zerhouni, M. Boudjemaa, et S. Abudura, « Fuzzy Greenhouse Temperature and Humidity Control based on Arduino », in 2018 International Conference on Applied Smart Systems (ICASS), 24-25 Novembre 2018, Médéa, Algérie.

URL : *https ://ieeexplore.ieee.org/document/8652017*

[2] H. Benyezza, M. Bouhedda, K. Djellout, et A. Saidi, « Smart Irrigation System Based Thingspeak and Arduino », in 2018 International Conference on Applied Smart Systems (ICASS), 24-25 Novembre 2018, Médéa, Algérie.

URL : *https ://ieeexplore.ieee.org/document/8651993*

[3] H. Benyezza, M. Bouhedda, N. Faci, M, Aissani et S. Rebouh, « Greenhouse Monitoring and Fuzzy Control System based on WSAN and IoT», in 2019 The 3rd International Conference on Applied Automation and Industrial Diagnostics (ICAAID) 25-27 September 2019, Elazig, Turkey.

URL : *https ://ieeexplore.ieee.org/document/8934984*

[4] M. Bouhedda, H. Benyezza, I. Metali et S.Tchocketch kebir « Trafic Intersection Fuzzy Control and Supervision System based on IoT», in 2019 The 3rd International Conference on Applied Automation and Industrial Diagnostics (ICAAID) 25-27 September 2019, Elazig, Turkey.

URL : *https ://ieeexplore.ieee.org/document/8934994*

[5] R. Benhamadi, M. Bouhedda, B. Bengharbia ,H. Benyezza et O. Benzineb «IoT-Based System for Supervision and Control of a Transmission Center», in 2019 The 3rd International Conference on Applied Automation and Industrial Diagnostics (ICAAID) 25-27 September 2019, Elazig, Turkey.

URL : *https ://ieeexplore.ieee.org/document/8934953*

Chapitres (Springer) :

M. Bouhedda, H. Benyezza, Y. Toumi, and S. Rebouh, «Fuzzy Traffic Lights Controller Based on PLC,» in Artificial Intelligence and Renewables Towards an Energy Transition , Springer, Cham, 2021, pp. 447–456.

URL : *https ://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-63846-7_42*

ملخص

يشهد قطاع الزراعة تطورا ملحوظا مدفوعا بتكنولوجيات جديدة، مما يبدو مبشرا بالخير، حيث أنه سيمكن هذا القطاع من الانتقال إلى المستوى التالي من إنتاجية المزارع وربحيتها

من أجل الاستفادة من هذه التكنولوجيات في إصلاح الزراعة التقليدية والاستجابة للزيادة الكبيرة في الطلب على الأغذية بسبب تزايد عدد سكان العالم وسوء التسيير في القطاع ، يتم اقتراح واختبار في هذه الاطروحة نظام ذكي قائم على إنترنت الأشياء لمراقبة والتحكم في بيئة زراعية، حيث تتمثل الأهداف الرئيسية في زيادة الإنتاج، اتخاذ القرار الصحيح، تقليل استهلاك المياه والطاقة وتقليص جهود المزارعين

تم تركيب النظام المقترح القائم على شبكة مستشعرات لاسلكية منخفضة التكلفة في البيئة الزراعية لجمع وإرسال بيانات في الوقت الحقيقي عن ظروف بيئة المنشأة مثل درجة الحرارة ، الرطوبة و رطوبة التربة إلى عقدة التجميع (المجمع) باستخدام موجات الراديو. البيانات المجمعة يتم تحويلها الى و حدة المعالجة (راسبيري) عبر الاتصال التسلسلي. تم استخدم نظام الاندماج القائم على المنطق الضبابي لدمج البيانات وإنتاج قرارات ذكية و مثلى للسيطرة على الري والمناخ الداخلي. يمكن للمستخدم مراقبة البيئة والتحكم فيها من أي مكان وفي أي وقت باستخدام واجهة إنسان آلة لتي تم تطويرها بإستخدام نود راد من شركة آي بي إم. بالإضافة إلى ذلك، يسمح النظام المقترح بتخزين البيانات الزراعية في قاعدة بيانات ماي سكول لاستغلالها لاحقًا.

وقد طبق النظام المقترح على ري نبات الطماطم في بيئة حقيقية وعلى التحكم في المناخ في نموذج دفيئة.تبين نتائج الاختبار فعالية النظام المقترح ونجاحه. وتبين المقارنة مع تقنيات أخرى للري أن كمية المياه واستهلاك الطاقة في الطريقة المقترحة قد انخفضت انخفاضا كبيرا.

كلمات مفتاحية : إنترنت الأشياء؛ شبكة مستشعرات لاسلكية؛ المنطق الضبابي؛ دفيئة زراعية؛ نظام الري؛ التحكم في المناخ؛ واجهة إنسان آلة؛ نود راد؛ ؛ قاعدة بيانات ماي سكول.

Résumé

Le secteur agricole est en pleine transformation sous l'impulsion des nouvelles technologies, ce qui semble très prometteur puisqu'elles permettront à ce secteur de passer au prochain niveau de productivité et de rentabilité. Afin de tirer profit de ces technologies pour réformer l'agriculture traditionnelle et répondre à l'augmentation de la demande alimentaire due à la croissance démographique mondiale et à la mauvaise gestion, un système intelligent basé sur l'Internet des Objets (IdO) est proposé et testé dans cette thèse pour surveiller et contrôler un environnement agricole, où les principaux objectifs sont d'augmenter la production, de prendre la décision optimale de contrôle,, d'optimiser la consommation d'eau et d'énergie et de réduire les efforts des agriculteurs.

Le système proposé, basé sur un réseau de capteurs sans fil (RCSF) à faible coût installé dans un environnement agricole pour recueillir et envoyer des données en temps réel sur les conditions de l'environnement végétal telles que la température, l'humidité et l'humidité du sol à un nœud collecteur (Sink) en utilisant la communication par radiofréquence (RF). Les données collectées ont été transformées en une unité de traitement (Raspberry) via une communication série. Un système de fusion basé sur la logique floue a été utilisé pour combiner les données collectées et produire des décisions intelligentes et optimales afin de contrôler l'irrigation et le climat interne. L'utilisateur peut surveiller et contrôler l'environnement de n'importe où et à tout moment en utilisant une Interface Homme-Machine (IHM) développée sous Node-RED d'IBM. En outre, le système proposé permet de stocker les données de l'environnement dans une base de données MySQL pour les exploiter ultérieurement.

Le système proposé a été appliqué pour l'irrigation les plantes de tomate dans un environnement réel et le contrôle le climat dans un prototype de serre agricole. Les résultats des tests montrent l'efficacité et le succès du système proposé. La comparaison entre les performances d'irrigation obtenues avec d'autres techniques d'irrigation montre que la quantité d'eau et la consommation d'énergie en utilisant la méthode proposée ont diminué de manière significative.

Mots clés : IdO ; RCSF ; logique floue ; serre agricole ; système d'irrigation ; contrôle du climat ; IHM ; Node-RED ; base de données MySQL.

Abstract

The agriculture sector is undergoing a transformation driven by new technologies, which seems very promising as it will enable this primary sector to move to the next level of farm productivity and profitability. In order to benefit from these technologies to reforming traditional agriculture and respond the surge in food demand due to the world-wide growing population and the mismanagement, smart system based on Internet of Things (IoT) is proposed and tested in this thesis for monitoring and control an agricultural environment where the main objectives are to increase the production, making the optimal control decision, optimize water and energy consumption and reduce farmer efforts.

The proposed system based on a low-cost Wireless Sensors Network (WSN) was installed in the agricultural environment to gather and sends real-time data about the plant environment conditions such as temperature, humidity and soil moisture to a collector node (Sink) using radiofrequency (RF) communication. The collected data were transformed to a processing unit (Raspberry) via serial communication. A fusion system based on fuzzy logic was used to combine the collected data and produce smart and optimal decisions to control the irrigation and the internal climate. The user can monitor and control the environment from anywhere and at any time by using a Human Machine Interface (HMI) developed under Node-RED of IBM. In addition, the proposed system allows to store the environment data in a MySQL database to exploit it later.

The proposed system was applied to irrigate tomato plants in real environment and to control the climate in a greenhouse prototype. The test results show the effectiveness and success of the proposed system. The comparison between the obtained irrigation performance with other irrigation technics, shows that the amount of water and the energy consumption in the proposed method has decreased significantly.

Keywords : IoT ; WSN ; fuzzy logic ; greenhouse ; Irrigation system ; climate control ; HMI ; Node-RED ; MySQL database.

Table des matières

Tables des figures x
Liste des tableaux xi
Liste des acronymes et symboles xii

I Introduction générale **1**
I.1 Problématique 1
I.2 Motivation 2
I.2.1 Développement de l'agriculture 2
I.2.2 Agriculture 4.0 2
I.2.3 Agriculture de précision (AP) 3
I.3 Contributions 7
I.4 Organisation du manuscrit 8

II Généralités sur les serres agricoles et les systèmes d'irrigation **9**
II.1 Introduction 9
II.2 Avantages des serres agricoles 9
II.3 Classification des serres agricoles 10
II.3.1 Selon la forme 10
II.3.2 Selon le matériau de revêtement 11
II.4 Paramètres climatiques sous serres 12
II.4.1 Température 12
II.4.2 Humidité 13
II.4.3 Teneur en CO_2 13
II.4.4 Lumière 13
II.5 Équipements d'une serre 14
II.5.1 Capteurs 14
II.5.2 Actionneurs 16
II.6 Systèmes d'irrigation 20
II.6.1 Arrosage manuel 20
II.6.2 Irrigation par canaux 20
II.6.3 Arrosage périmétrique 21
II.6.4 Irrigation par aspersion (par gicleurs) 21
II.6.5 Arrosage à flèche (Arrosage à rampes) 22
II.6.6 Irrigation goutte à goutte 23
II.6.7 Système de flux et reflux 23
II.7 Conclusion 24

III Fusion de données **26**
III.1 Introduction 26
III.2 Fusion de données multi-capteurs 26
III.3 Classification de la fusion des données 27
III.3.1 Classification basée sur la relation entre les sources 27
III.3.2 Classification fondée sur les entrées et les sorties (Classification de Dasarathy) 28
III.3.3 Classification basée sur les niveaux d'abstraction 29

III.4 Modèle de fusion de données . . . 30
III.4.1 Modèles fondés sur les données . . . 30
III.4.2 Modèles fondés sur l'activité . . . 32
III.4.3 Modèle axé sur les rôles . . . 35
III.5 Architectures de fusion de données . . . 38
III.5.1 Fusion centralisée . . . 38
III.5.2 Fusion décentralisée (distribuée) . . . 38
III.5.3 Fusion hiérarchique (hybride) . . . 38
III.6 Techniques et méthodes de fusion de données . . . 39
III.6.1 Techniques d'association de données . . . 39
III.6.2 Méthodes d'estimation de l'état . . . 40
III.6.3 Méthodes de décision . . . 40
III.7 Conclusion . . . 42

IV Outils hardware et software **43**
IV.1 Introduction . . . 43
IV.2 Hardwares utilisés . . . 43
IV.2.1 Unité de traitement . . . 43
IV.2.2 Communication . . . 45
IV.3 Softwares utilisés . . . 51
IV.3.1 Algorithme de fusion et contrôle . . . 51
IV.3.2 Internet des Objets (IdO) . . . 55
IV.3.3 Base de données . . . 58
IV.4 Conclusion . . . 65

V Développement et implémentation pratique **66**
V.1 Introduction . . . 66
V.2 Cahier des Charges . . . 66
V.2.1 Déploiement d'un réseau de capteurs . . . 66
V.2.2 Protocole de communication . . . 66
V.2.3 Système de décision . . . 66
V.2.4 Interface Homme Machine . . . 67
V.2.5 Base de données . . . 67
V.3 Système proposé . . . 67
V.3.1 Contrôle du climat . . . 68
V.3.2 Contrôle d'irrigation . . . 69
V.4 Implémentation du système proposé . . . 70
V.4.1 Couche de traitement et décision . . . 70
V.4.2 Serveur Node-RED . . . 75
V.4.3 Couche de communication . . . 85
V.4.4 Couche de stockage de données . . . 91
V.5 Résultats de tests et discussions . . . 91
V.5.1 Contrôle du climat . . . 92
V.5.2 Contrôle d'irrigation . . . 94
V.5.3 Analyse complexe . . . 99
V.5.4 IHM réalisée . . . 100
V.5.5 Étude socioéconomique . . . 104
V.6 Conclusion . . . 104

VI Conclusion générale et perspectives **105**
VI.1 Conclusion générale . . . 105
VI.1.1 Argumentation . . . 105
VI.1.2 Bilan . . . 105
VI.1.3 Signification . . . 106
VI.1.4 Contributions . . . 106
VI.2 Perspectives . . . 107

Bibliographies **109**

Table des figures

I.1 Développement de l'agriculture 3

II.1 Formes les plus fréquentes des serres [93] 10
II.2 Serre en verre [94] 11
II.3 Serre en plastique [95] 12
II.4 Variation de la concentration de CO_2 dans la serre pendant un jour [107] 14
II.5 Capteurs de température et d'humidité : (a) RK330-01 ; (b) RK330-02 ; (c) TH1758 ; (d) DHT11/DHT22 ; (e) THP/TH9 ; (f) QFA3160D 15
II.6 Capteurs d'humidité de sol : (a) VH400 ; (b) YL-98 ; (c) SoilWatch 10 ; (d) Capacitive Soil Moisture Sensor V1.2 16
II.7 Chauffage d'aire [118][119] 17
II.8 Chauffage central sous serre [120] 18
II.9 Ventilateurs sous serre [122] 18
II.10 Système de brumisation [123] 19
II.11 Irrigation par canaux [126] 21
II.12 Diagramme schématique d'un Système d'arrosage périmétrique [92] 21
II.13 Irrigation par aspersion [127] 22
II.14 Arrosage à flèche sous serre [128] 23
II.15 Irrigation par gout à gout [130] 24
II.16 Système de flux et reflux [132] 24

III.1 Décision humaine dépend de la fusion des différents sens 26
III.2 Types de fusion de données basées sur la relation entre les sources [148] 28
III.3 Classification de Dasarathy [150] 29
III.4 Modèle JDL [148] 32
III.5 Modèle de Dasarathy (DFD) [149] 33
III.6 Boucle OODA [157] 34
III.7 Cycle du renseignement [158] 34
III.8 Modèle Omnibus [159] 35
III.9 Modèle orienté objet [161] 36
III.10 Architecture de Frankel-Bedworth [160] 37
III.11 Architectures de fusion de données : (a) traitement centralisé dans le centre de fusion ; (b) traitement décentralisé à chaque unité de traitement de nœud ; (c) traitement hiérarchique [165] 39

IV.1 Différents modèles de Raspberry Pi 44
IV.2 Différents composants d'un Raspberry pi 3 B [235] 45
IV.3 Ports GPIO de Raspberry pi 3 B [235] 46
IV.4 Architecture d'un nœud de capteur sans fils [256] 46
IV.5 Topologies des RCSF : (a)étoile ;(b)arbre ;(c) toile [258] 47
IV.6 Module nRF24L01+ : (a) version1 ;(b) version2 (PA) [261] 48
IV.7 Broches de nRF24L01+PA [262] 49
IV.8 Câblage du module nRF24L01 + PA avec un Arduino UNO [262] 49
IV.9 Fonctionnement du module nRF24L01 + : (a) mode simple ; (b) mode multiceiver. . . 50

IV.10Format de paquet ShockBurst [259] 51
IV.11Quelques formes des fonctions d'appartenance 52
IV.12Variables linguistiques 53
IV.13Structure d'un contrôleur flou 54
IV.14Editeur Node RED 57
IV.15Certains des nœuds disponibles dans Node-RED 58
IV.16Types de base de données : (a) centralisée ; (b) distribuée [264] 59
IV.17Modèles de SGBD : (a) hiérarchique ; (b) réseau ; (c) relationnel ; (d) objet [265] . . . 60
IV.18Page bienvenu du XAMPP 61
IV.19Accueil de phpMyAdmin 62
IV.20Création d'une table 63
IV.21Description des nouveaux champs 63
IV.22Onglets de la page d'accueil 64
IV.23Onglet SQL 64
IV.24Onglet importer 65
IV.25Onglet export 65
IV.26Onglet opérations 65

V.1 Architecture générale proposé du système de surveillance et de contrôle basé sur l'IdO 67
V.2 Structure générale du système proposé 68
V.3 Communication multi-serres 68
V.4 Architecture interne du système de contrôle et supervision du climat proposé 69
V.5 Architecture interne du système d'irrigation proposé 70
V.6 Système de fusion basé sur logique floue 72
V.7 Formes géométriques possibles obtenues après l'inférence 72
V.8 Système flou 1 72
V.9 Fonctions d'appartenances de SF1 73
V.10 Système flou 2 73
V.11 Fonctions d'appartenances de SF2 74
V.12 Structure générale du système développé sous Node-RED 75
V.13 Architecture interne du bloc de réception de données 76
V.14 Concaténation des données 76
V.15 Nœud pythonshell in 77
V.16 Réception des arguments à travers 'pythonshell in' 77
V.17 Échange de données par format 'JSON' 77
V.18 Séparation de données par 'json' 78
V.19 Service OpenWeather [276] 78
V.20 Configuration interne de nœud openweathermap 79
V.21 Structure interne de bloc des conditions météorologiques 79
V.22 Flux d'historique de données : (a) historique d'un temps fixe ; (b) historique relatif à une période de temps 80
V.23 Flux d'envoyer l'historique de données par email 80
V.24 Nœuds utilisés pour l'affichage de données 81
V.25 Affichage de la dernière valeur de température stockée dans la base de données 81
V.26 Tableaux et groupes d'affichage 82
V.27 Nœud 'serial out' 82
V.28 Connexion au routeur Huawei HG532e 83
V.29 Mappage du port 83
V.30 Serveur no-IP [277] 84
V.31 Configuration du serveur no-IP : (a) créer un hostname ; (b) mis à jour l'adresse IP avec l'application DUC 84
V.32 Principe du service DDNS 85
V.33 Fichier settings.js 86
V.34 Sécurisé Node-RED : (a) mot de passe pour l'éditeur Node-RED ; (b) mot de passe pour Node-RED dashboard 86
V.35 Communication série entre le Sink et serveur Node-RED : (a) émission de données ; (b) réception des commandes 87
V.36 Protocole de communication basé sur la transaction avec accusé 88

V.37 Communication maitre/esclave : (a) scénario1 ; (b) scénario2 ; (c) scénario3 88
V.38 Initialisation du Sink 89
V.39 Fonctionnement du Sink 90
V.40 Communication multi-transceiver avec accusé : (a) Sink ; (b) Noeud1 ; (c) Noeud2 ; (d) Nœud3 91
V.41 Table de données de la serre1 92
V.42 Réalisation hardware de système de contrôle et supervision d'une serre 92
V.43 Évaluation de la température et de l'humidité à l'intérieur de la serre : (1) sans contrôle ; (2) avec action de chauffage ; (3) avec action de ventilation 93
V.44 Évaluation de la température avec le contrôleur flou SF1 94
V.45 Évaluation de l'humidité avec le contrôleur flou SF1 94
V.46 Implémentation hardware du système d'irrigation proposé 95
V.47 Composants du nœud sans fil utilisé : (a) Arduino nano ; (b) module nRF24L01+ ; (c) capteur YL-69 ; (d) batterie ; (e) électrovanne. 95
V.48 Variation de la température d'environnement pendant huit jours 96
V.49 Évaluation de l'humidité de sol pour chaque zone avec le contrôleur flou SF2 pendant huit jours 96
V.50 Estimation de la quantité d'eau et de l'énergie consommée pendant quatre mois 97
V.51 Estimation du coût d'installation 98
V.52 Vue d'accueil dans l'IHM en français 101
V.53 Vue d'accueil dans l'IHM en arabe 102
V.54 Vue de supervision dans l'IHM 102
V.55 Vue de sélection de type de la plante dans l'IHM 102
V.56 Vue d'obtenir l'historique de données dans l'IHM 103
V.57 Vue de contrôle manuel dans l'IHM 103
V.58 Vue des conditions météorologiques dans l'IHM 103
V.59 Vue d'image en direct dans l'IHM 104

Liste des tableaux

V.1 Certaines règles de SF1 73
V.2 Certaines règles de SF2 74
V.3 Comparaison de l'eau consommée et la durée de fonctionnent des actionneurs pendant huit jours 96
V.4 Différence relative du coût de l'eau et de l'énergie des trois méthodes par rapport à la solution proposée pendant quatre mois 97
V.5 Coût des composants du système d'irrigation proposé 98
V.6 Comparaison entre le système d'irrigation proposée et les stratégies d'irrigation traditionnelles 99
V.7 Comparaison entre le système d'irrigation proposée et certaines nouvelles stratégies proposées précédemment 100
V.8 Analyse complexe du système de surveillance et de contrôle proposé 100
V.9 Coût des composants du système de surveillance et contrôle proposé 104

Liste des acronymes et symboles

AP : l'agriculture de précision

ACK : Acknowledgment

BLE : Bluetooth Low Energy

CGIAR : Consultative Group on International Agricultural Research

CSI : Camera Serial Interface

CE : Chip Enable

CSN : Chip Select Not

CRC : Cyclic Redundancy Check

CF : contrôleur flou

DAI-DAO : Data in-Data out

DAI-FEO : Data in-Feature out

DEI-DEO : Decision In-Decision Out

DFD : Data-Feature-Decision

DNS : Domaine Name System

DDNS : Dynamic Domaine Name System

DSI : Display Serial Interface

FAI : Fournisseurs d'Accès à Internet

FDMC : fusion de données multi capteurs

FEI-FEO : Feature in-Feature out

FEI-DEO : Feature in-Decision out

FAO : Food and Agriculture Organisation

GPS : Global Positioning System

GPIO : General-Purpose Input/Output

HTTP : Hypertext Transfer Protocol

HDMI : High Definition MultiMedia Interface

$\mathbf{H}_{ab}$ **:** Humidité absolue

$\mathbf{H}_{R}$ **:** Humidité relative

H : Humidité

IdO : Internet des Objets

IoT : Internet of Things

IA : l'Intelligence Artificielle

IHM : Interaction Homme-Machine

IBM : International Business Machines Corporation

ISM : Industriel, Scientifique et Médical

IPX : Internetwork Packet Exchange

IRQ : Interrupt ReQuest

ISPA : International Society of Precision Agriculture

JDL : Joint Directors of Laboratories

K-NN : K-Nearest Neighbors (K- Plus proches voisins)

MIMO : Multi-Input Multi-Output

$\mathbf{M}_{v_eau}$ **:** La quantité totale de vapeur d'eau

MAP : Maximum a posteriori probability

MOSI : Master Out Slave In

MISO : Master In Slave Out

NDIR : Non-Dispersive Infrared

OODA : Observe, Orient, Decide, Act boucle

ONUAA : Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture

PRFU : Projets de recherche formation universitaire

$\mathbf{P}_v$ **:** La pression partielle de vapeur d'eau

$\mathbf{P}_s$ **:** La pression de vapeur saturante

PE : Polyéthylène

PVC : Polymerizing Vinyl Chloride.

PDA : Probabilistic data association (Association de données probabiliste)

PHP : Hypertext Preprocessor

PID : Paquet Identification

PAR : Parabolic Aluminized Reflector

RCSF : Réseau de Capteur Sans Fil

RF : Radiofréquence

RFID : Radio-Frequency IDentification

RX : Réception

RAM : Random Access Memory

SF : Système flou

SQL : Structured Query Language

SVM : Support Vector Machine (Machine à vecteurs de support)

SPI : Serial Peripheral Interface

SGBD : Système de gestion de base de données

T : Température

TX : Transmission

TIC : Technologies de l'information et des communications

US. DoD : United States Department of Defense

USB : Universal serial bus

$\mathbf{V}_{air}$ **:** Le volume d'air

VMI : Verified Market Intelligence

WSN : Wireless Sensor Network

Chapitre I

Introduction générale

I.1 Problématique

Selon le récent rapport de la FAO (Food and Agriculture Organisation), la population mondiale dépassera 9,1 milliards de personnes d'ici 2050 [1]. Des défis importants devront être relevés pour atteindre le niveau de productivité agricole nécessaire pour répondre à la demande mondiale prévue de denrées alimentaires.

L'agriculture est la principale source de nourriture et elle est considérée dans divers pays du monde, comme l'épine dorsale de l'économie. Dans la plupart des pays africains, plus de 70 % des terres sont adaptées à des utilisations agricoles [2]. L'avènement de la technologie a changé la façon traditionnelle dont l'agriculture est menée dans le monde entier. Toutefois, un grand nombre d'agriculteurs en Afrique sont toujours stagnants et fortement dépendants des méthodes traditionnelles d'agriculture qui ont commencé il y a des centaines d'années. Par conséquent, la plupart des cultures ne produisent pas de produits optimaux qui devraient être récoltés si les agriculteurs adoptent les nouvelles méthodes d'agriculture. En outre, le faible rendement est également dû au manque de gestion des sols, de surveillance d'environnement, de protection des cultures et de ressources adéquates par les agriculteurs. L'agriculture africaine doit subir des transformations majeures au cours des prochaines décennies pour relever les défis interdépendants de la sécurité alimentaire, de la pauvreté et de la lutte contre les changements climatiques.

L'agriculture est l'un des enjeux majeurs de notre pays l'Algérie en cette période, et son développement ainsi que sa bonne et juste maitrise sont les défis que les différents acteurs se doivent relever pour assurer le développement durable, assurer l'indépendance alimentaire et penser à l'exportation et participer ainsi au développement de l'économie du pays. Une grande partie de la région du Nord Algérien est à vocation agricole et plus particulièrement la région de Médéa, où elle est connue pour les cultures de plusieurs espèces de fruits et légumes.

Outre les changements climatiques et la rareté de la pluie ces dernières années, la demande globale en eau a considérablement et rapidement augmenté, multipliée par quatre au cours des quarante dernières années, en raison de la croissance démographique et l'augmentation de la demande en provenance de divers secteurs, notamment l'agriculture, où l'agriculture irriguée consomme plus de 70 % des ressources en eau [3]–[6]. Cette augmentation a créé un déséquilibre entre les ressources en eau disponibles et les utilisations, et puisque l'Algérie est fait partie de la catégorie des pays pauvres en eau, où elle est classée en $14^{\text{ème}}$ place dans le classement des pays pauvres en eau [7], la mobilisation et la gestion des ressources en eau sont l'un des défis les plus fondamentaux du ministère des ressources en eau. Dans ce contexte, les autorités ont mis en œuvre une stratégie de mobilisation et de garantie des ressources en eau (la construction de nouveaux barrages, les transferts d'eau des régions les plus humides vers les régions les plus sèches, le dessalement de l'eau de mer, exploitation des eaux souterraines, etc.)[7][8], dans le but de parvenir à une gestion intégrée durable de ces ressources, mais le problème de la disponibilité de l'eau reste toujours parmi l'une des préoccupation majeure. Plusieurs rapports montrent que le manque de ressources en eau ne constitue pas une cause majeure de l'insuffisance dans de nombreux cas. Le plus souvent, le problème est lié à la mauvaise gestion des

ressources, surtout dans le domaine d'agriculture, où la majorité des fermiers utilisent des méthodes d'irrigation traditionnelle qui consomment beaucoup d'eau. Ces stratégies d'irrigation ne sont pas satisfaisantes pour faire face à la pénurie d'eau d'irrigation [9][10][11]. Ce secteur doit bénéficier des technologies modernes et des solutions doivent être trouvées pour améliorer le contrôle de l'eau et réduire son utilisation au minimum. L'utilisation efficace de l'eau est un processus agricole réussi. Plusieurs millions de litres d'eau sont nécessaires adoptant la méthode d'irrigation conventionnelle, tandis que la méthode d'irrigation intelligente nécessite peu de millions de litres d'eau [12].

Pour un meilleur rendement et pour assurer un produit de bonne qualité, les plantes sont cultivées dans les serres. L'objectif des serres est de produire des cultures en dehors de la saison de croissance naturelle et de protéger la couverture végétale contre les maladies et les intempéries.

Une serre agricole est un système MIMO (Multi-Input Multi-Output) complexe dont le climat interne est influencé par de nombreux facteurs (température, humidité, rayonnement solaire, etc.). Une meilleure gestion des paramètres climatiques sous serre est un aspect important pour atteindre le confort du microclimat pour la croissance des cultures. Maintenant, un seul capteur est principalement utilisé pour surveiller l'environnement de serre, étant donné le manque de collaboration dans le traitement et l'utilisation exhaustive de l'information multi-source et multidimensionnelle, il existe divers défauts de précision, de fiabilité, de praticabilité, etc. Pour cette raison, les serres doivent être modernisées et s'orienter davantage vers l'utilisation de nouvelles techniques culturales et de nouvelles technologies pour répondre au besoin agricole et améliorer la rentabilité.

I.2 Motivation

I.2.1 Développement de l'agriculture

Depuis l'Antiquité, les êtres humains cultivent des terres et élèvent des animaux pour obtenir la nourriture nécessaire à leur survie. Cette pratique, appelée agriculture, a évolué selon un processus à long terme et progressif, passant de l'agriculture 1.0 à 4.0, comme le montre la figure I.1.

Dans la figure I.1, l'agriculture 1.0 se réfère à l'ère agricole traditionnelle, répondant principalement aux forces de la main-d'œuvre et des animaux. Dans cette étape, bien que des outils simples comme des faucilles et des pelles aient été utilisées dans les activités agricoles, l'homme ne peut toujours pas se débarrasser du lourd travail manuel, de sorte que la productivité reste à un faible niveau. Jusqu'au XIX^{ème} siècle, les machines à vapeur ont été améliorées et largement utilisées pour fournir de nouvelles puissances dans tous les domaines de la vie, y compris l'agriculture. Elle est arrivée à l'ère de l'agriculture 2.0, lorsque diverses machines agricoles étaient utilisées manuellement et que de nombreux produits chimiques étaient utilisés. Il n'est évident que l'agriculture 2.0 a considérablement augmenté l'efficacité et la productivité des travaux agricoles. Néanmoins, cette amélioration substantielle a eu des conséquences trop néfastes : contaminations chimiques sur le terrain, destruction de l'environnement écologique, consommation excessive d'énergie et gaspillage des ressources naturelles. Au XX^{ème} siècle, l'agriculture 3.0 est née du développement rapide de l'informatique et de l'électronique. Les programmes informatiques et les techniques des robots ont permis aux machines agricoles d'effectuer des opérations de manière efficace et intelligente. Avant que les problèmes laissés dans l'agriculture 2.0 n'aillent trop loin, les stratégies ont été ajustées dans l'agriculture 3.0. La distribution raisonnable du travail aux machines agricoles a permis de réduire l'utilisation de produits chimiques, d'améliorer la précision de l'irrigation, etc. Aujourd'hui, l'évolution de l'agriculture s'inscrit dans l'agriculture 4.0, grâce à l'utilisation de technologies actuelles comme l'Internet des Objets (IdO), big data, l'intelligence artificielle, les réseaux de capteurs sans fils (RCSF), etc. [13].

I.2.2 Agriculture 4.0

Cette nouvelle philosophie centrée sur les données agricoles a été exprimée sous plusieurs noms : «Agriculture 4.0 », «Digital Farming », ou «Smart Farming », et est née lorsque la télématique et la gestion des données ont été combinées au concept déjà connu de l'agriculture de précision [14]. Par conséquent, l'agriculture 4.0 est basée sur les principes de l'agriculture de précision, les producteurs

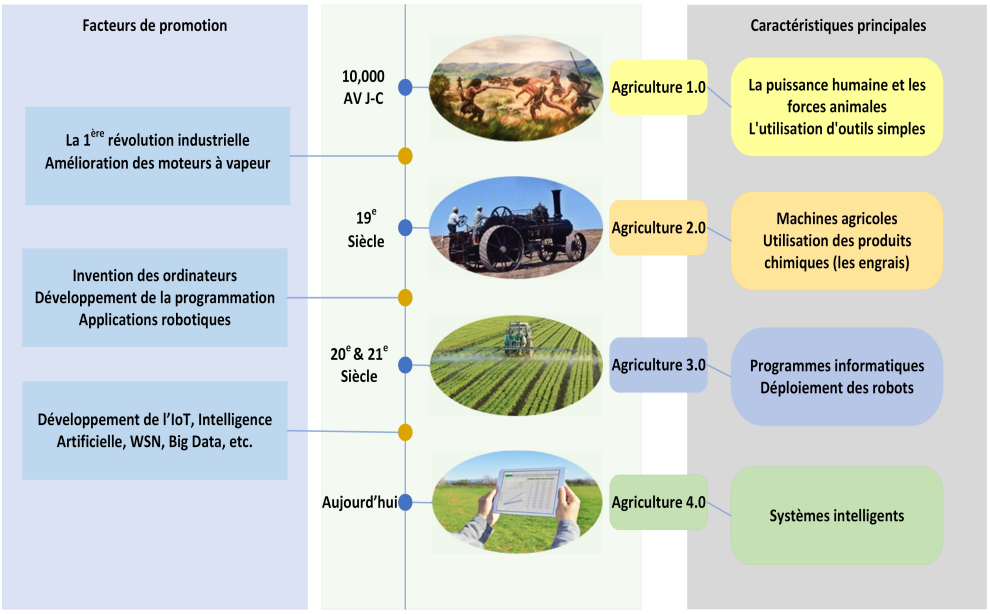


FIGURE I.1 – Développement de l'agriculture

utilisant des systèmes qui génèrent des données dans leurs exploitations, qui seront traitées de manière à prendre les bonnes décisions stratégiques et opérationnelles. Traditionnellement, les agriculteurs se rendent dans les champs pour vérifier l'état de leurs cultures et prendre des décisions en fonction de l'expérience qu'ils ont accumulée. Cette approche n'est plus durable, car, entre autres, certains domaines sont trop vastes pour être gérés de manière discernement selon les trois critères qui guideront les années à venir : l'efficacité, la durabilité et la disponibilité (pour les personnes). Les systèmes de gestion avancés dans le cadre de l'agriculture intelligente apportent des solutions pratiques. En outre, bien que certains agriculteurs aient une longue expérience acquise après de nombreuses années de travail sur le terrain, la technologie peut fournir un outil systématique pour détecter des problèmes imprévus difficiles à remarquer par une inspection visuelle lors de contrôles occasionnels. En ce qui concerne la volonté d'adopter des outils modernes dans l'agriculture, les jeunes agriculteurs font preuve d'une attitude plus positive que les plus âgés, car les premiers peuvent étayer leur expérience pas si grande sur le terrain avec de nouveaux outils intelligents fournissant des informations clés. Cependant, l'âge moyen des agriculteurs a augmenté de façon alarmante au cours des dernières décennies : Environ 58 ans aux États-Unis et en Europe, 60 ans en Afrique, et 63 ans au Japon [15]. Heureusement, cette tendance devrait changer. Plusieurs politiques européennes, par exemple, sont mises en place pour soutenir un renouvellement générationnel, en facilitant l'accès à l'investissement initial, aux prêts, aux conseils, aux entreprises, et à la formation [15]. Le renouvellement des générations dans un contexte de développement rural va au-delà de la réduction de l'âge moyen des agriculteurs ; il s'agit également de donner à une nouvelle génération de jeunes agriculteurs hautement qualifiés les moyens de tirer pleinement parti des technologies afin de soutenir des pratiques agricoles durables. Cela implique que les jeunes agriculteurs devront transformer les terres existantes en exploitations plus modernes et plus compétitives dans le but de maintenir une production alimentaire viable tout en améliorant la compétitivité de la chaîne agroalimentaire, car avec des technologies avancées et une nouvelle façon de penser, les jeunes peuvent transformer le secteur agricole.

I.2.3 Agriculture de précision (AP)

L'agriculture de précision (AP) se présente comme une solution efficace aux grands défis auxquels l'agriculture et notre monde sont actuellement confrontés. L'agriculture de précision est un concept moderne de gestion des cultures qui utilise de nouvelles technologies (IdO, RCSF, Big data, drones, robotique, et technologie satellitaire, etc.) qui permettent aux agriculteurs de gérer la variabilité spatiale et temporelle dans le domaine agricole comme la réduction des ressources naturelles, gestion de l'irrigation, gestion de la production, gestion des engrais, les attaques par intrusion et la surveillance des données en temps réel, afin d'améliorer la production, de minimiser les dommages

environnementaux et d'améliorer la qualité des produits agricoles [16]. Le concept d'agriculture de précision est apparu aux États-Unis au début des années 90. Au fil des ans, l'AP a grandi dans le monde entier et adopte lentement de nouvelles technologies qui sont autonomes, perturbatrices et à forte intensité de données. En 2019 l'ISPA (International Society of Precision Agriculture) [17] a adopté la définition suivante de l'agriculture de précision :

"Precision Agriculture is a management strategy that gathers, processes and analyzes temporal, spatial and individual data and combines it with other information to support management decisions according to estimated variability for improved resource use efficiency, productivity, quality, profitability and sustainability of agricultural production."

L'AP d'aujourd'hui est un parfait exemple d'intersection entre l'agriculture et les technologies de l'information. Elle dépend de plus en plus de la collecte, du transfert et de la gestion de l'information par les technologies de l'information et des communications (TIC) pour accroître la productivité. Le cœur de l'agriculture de précision est l'application de technologies et de méthodes pour gérer la variabilité spatiale et temporelle associée à tous les aspects de la production agricole ; dans le but d'améliorer la performance des cultures et la qualité de l'environnement.

Les nouvelles technologies de communication, les satellites, les systèmes GPS, les capteurs intelligents et les techniques de l'intelligence artificielle sont des éléments clés et fondamentaux pour la mise en œuvre de l'agriculture de précision. Grâce à ces technologies, les agriculteurs peuvent augmenter la production, optimiser toutes les ressources utilisées ainsi que la main-d'œuvre, les coûts et les possibilités de production quantitatives et qualitatives, en fonction des caractéristiques spécifiques du sol et/ou de la culture.

I.2.3.1 Internet des Objets (IdO)

L'internet des objets (IdO) est l'une des technologies les plus révolutionnaires dans la communication sans fil moderne. La technologie IdO peut être appliquée sur divers marchés verticaux, notamment l'industrie [18]–[20], le transport [21]–[23], les soins de santé [24]–[27] et les maisons intelligentes [28]–[30].

L'application de l'IdO en agriculture consiste à fournir des informations utiles sur un large éventail de paramètres physiques pour améliorer les pratiques culturales pour aborder la question de la surveillance et du contrôle, pour une meilleure productivité, qualité et profit. Les capteurs et les objets connectés fréquemment utilisés comme une infrastructure d'un système IdO qui peuvent être utilisés pour surveiller les cultures et aider à prendre des décisions éclairées.

L'IdO dans un contexte agricole fait référence à l'utilisation de capteurs et d'autres dispositifs pour transformer en données chaque élément et action impliqués dans l'agriculture. On estime que 10 à 15 % des agriculteurs américains utilisent des solutions IdO dans leurs exploitations sur 1200 millions d'hectares et dans 250000 exploitations [14]. L'IdO est considéré comme un stimulant de l'agriculture 4.0 ; en fait, la technologie IdO est l'une des raisons pour lesquelles l'agriculture peut bénéficier d'une si grande quantité d'informations précieuses, et le secteur agricole devrait être fortement influencé par les progrès de ces technologies [31]. On estime qu'avec les nouvelles techniques, l'IdO a le potentiel d'augmenter la productivité agricole de 70 % d'ici 2050, ce qui est positif, car selon Myklevy et al. le monde doit augmenter la production alimentaire mondiale de 60 % d'ici 2050 en raison d'une croissance démographique de plus de neuf milliards [32]. Les principaux avantages de l'utilisation de l'IdO sont d'obtenir un meilleur rendement des cultures et de réduire les coûts. Par exemple, des études d'ONFARM (Plate-forme d'agriculture de précision) ont montré que pour une exploitation moyenne utilisant l'IdO, le rendement augmente de 1,75 % et les coûts énergétiques diminuent de 17 à 32 dollars par hectare, tandis que la consommation d'eau pour l'irrigation diminue de 8 % [14].

I.2.3.2 Réseaux de capteurs sans fil dans l'agriculture

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs) (en anglais WSN : Wirelss Sensor Network) jouent un rôle important dans l'ingénierie, les sciences, l'agriculture et dans de nombreux autres domaines comme

la surveillance, les applications militaires, les véhicules intelligents, etc. L'agriculture de précision (AP) est l'un des domaines dans lesquels les RCSFs sont largement adoptés.

L'objectif de l'adoption des RCSFs en l'AP est de mesurer les différents paramètres environnementaux tels que l'humidité, la température, l'humidité du sol, etc. pour améliorer la quantité et la qualité des cultures, où cette technologie a fourni un soutien important pour une gestion précise des ressources, l'optimisation de l'irrigation, utilisation d'engrais, surveillance ou prévention des maladies et prévision du moment approprié de la récolte [33]. En outre, les RCSFs peuvent être un outil qui aide à réduire la consommation des ressources naturelles utilisées dans l'agriculture [34].

Un enjeu fondamental dans les RCSFs dans plusieurs domaines et surtout dans l'agriculture est la façon de traiter les données recueillies où l'une des principales limites de toute gestion fondée sur les capteurs est que pratiquement chaque couche d'information peut répondre à plus d'un paramètre ou propriété agricole utilisée pour décrire les conditions et le processus de croissance. Cela rend une stratégie de prise de décision correspondante incertaine et/ou complexe lorsqu'on tente de la déployer dans différents contextes de production. L'utilisation d'une combinaison de techniques de détection conceptuellement différente et l'intégration des données subséquentes sont prometteuses pour fournir des estimations de propriétés plus précises, ce qui mène à une gestion plus robuste et à une plus grande capacité d'adoption de la gestion des cultures. La fusion des données peut aider à résoudre ces problèmes, car il s'agit de l'une des méthodes les plus utilisées pour améliorer la précision des capteurs, représenter une image complète sur l'environnement et fournir des décisions plus précises [35]. Il est donc possible d'obtenir une réflexion plus précise sur l'état de l'environnement et d'effectuer un suivi plus précis et plus fiable. La fusion des données est généralement définie comme l'utilisation de techniques qui combinent les données provenant de plusieurs sources afin d'obtenir une information globale et plus complète pour la prise de la bonne décision.

De multiples applications des réseaux de capteurs sans fil sont aujourd'hui utilisées dans le secteur agricole. Certaines applications très courantes sont l'irrigation intelligente, la fertilisation intelligente, la lutte antiparasitaire intelligente et la surveillance des serres.

I.2.3.2.1 Systèmes d'irrigation intelligents

L'irrigation intelligente est une application d'irrigation qui contrôle la quantité d'eau en prenant une décision sur l'endroit où l'eau est nécessaire. C'est le constituant le plus important de l'agriculture, qui a un grand impact sur la santé, le coût et la productivité des cultures. Un aspect majeur de l'irrigation intelligente est d'éviter le gaspillage d'eau puisque la plupart des pays du monde sont confrontés à des problèmes de pénurie d'eau. Dans ce contexte plusieurs systèmes d'irrigation basés sur les RCSFs et l'IdO ont été proposés, où l'objectif principal est de minimiser l'utilisation d'eau et aider l'utilisateur [33],[36]–[52].

I.2.3.2.2 Systèmes de fertilisation intelligents

L'engrais est une substance artificielle ou naturelle dont certains éléments chimiques sont utilisés pour améliorer la croissance et la productivité des plantes. La pulvérisation manuelle est une technique courante utilisée pour la fertilisation. Cependant, la méthode optimale de fertilisation nécessite des capacités de détection pour trouver l'endroit exact où il faut savoir quels sont les composants chimiques manquants et la quantité d'engrais nécessaire. Il est important de fournir des engrais en quantité très précise afin d'améliorer la productivité [53]. De multiples techniques de fertilisation ont été présentées par les chercheurs depuis la dernière décennie en utilisant les RCSFs et l'IdO [54]–[56].

I.2.3.2.3 Systèmes intelligents de lutte antiparasitaire et de détection précoce des maladies

Les attaques de parasites sont la cause première de la faible productivité du secteur agricole. Ces parasites provoquent plusieurs maladies graves chez les plantes qui affectent leur croissance. Toutefois,

la prévision de la maladie fournit une alerte précoce aux agriculteurs, ce qui leur permet de prendre les décisions appropriées pour contrôler la maladie à temps. Les systèmes de lutte contre les parasites sont constitués de dispositifs électroniques qui permettent aux humains d'identifier les pièges dans une gamme spécifique de ces dispositifs électroniques [47]. Ces derniers sont des capteurs capables de calculer les paramètres environnementaux pour une analyse plus approfondie. De nombreuses recherches ont été menées dans le secteur de l'agriculture pour mettre au point des systèmes de détection précoce des maladies et de lutte contre les parasites en utilisant des technologies plus avancées et plus sophistiquées (IdO, apprentissage profond, capteurs RGB, capteurs d'imagerie de fluorescence, capteurs spectraux, capteurs thermiques, etc.) [57]–[63].

I.2.3.3 Big Data

À l'ère technologique actuelle, le concept de grandes données est présent dans de nombreux secteurs économiques, mais est-il déjà disponible pour l'agriculture ? La quantité toujours croissante de données disponibles pour la gestion sur le terrain rend nécessaire la mise en œuvre d'un certain type de processus automatique pour extraire des informations opérationnelles à partir de données en vrac. Toutefois, le volume de données actuellement extraites de la plupart des domaines commerciaux n'atteint sans doute pas encore le niveau considéré comme des données importantes. Selon Manyica et al [64], le big data a trois dimensions : le volume, la vitesse et la variété. Kunisch [65] a ajouté une quatrième dimension qui est la véracité. Enfin, un cinquième a été ajouté par Chi et al. pour la valorisation de la dimension supplémentaire [66]. Dans l'ensemble, les cinq dimensions de big data représente :

- Le volume qui fait référence aux ensembles de données dont la taille dépasse la capacité des outils logiciels de base de données typiques à capturer, stocker, gérer et analyser les informations. Cette définition comprend une estimation de la taille d'un ensemble de données pour qu'il soit considéré comme grand, et elle peut varier selon le secteur d'étude, en fonction des outils logiciels qui sont généralement disponibles et des tailles courantes des ensembles de données, en général à partir de l'ordre du téraoctet [64].

- La vitesse qui fait référence à la capacité d'acquérir, de comprendre et d'interpréter les événements au fur et à mesure qu'ils se produisent. En agriculture, il s'agit d'applications qui se produisent en temps réel, comme le traitement des données sur le terrain pour appliquer des doses variables de produits chimiques dans des équipements dotés de technologies d'application à doses variables.

- La variété qui fait référence aux différents formats de données (vidéo, texte, voix, etc.) et aux divers degrés de complexité. Cette situation n'est pas étrange en agriculture lorsque des sources de données différentes sont utilisées pour travailler dans des scénarios complexes tels que des images et des sondes pédologiques ou météorologiques.

- La véracité qui fait référence à la qualité, la fiabilité et la confiance générale des données.

- La valorisation est la capacité à propager la connaissance, l'appréciation et l'innovation [66].

Dans le contexte de la gestion des cultures, Kunisch [65] a conclu que le big data n'est applicable que dans certains cas en agriculture, en fonction de chaque exploitation et de son niveau d'adoption des technologies. Néanmoins, Proagrica [67] a confirmé que le big data était de plus en plus appliqué dans le secteur agricole. Kamilaris et al [66] ont cité 34 travaux dans lesquels le big data était utilisé dans des applications agricoles, et Wolfert et al [68] ont publié une étude sur les applications de big data dans l'agriculture intelligente. Dans cette optique, le consortium des centres internationaux de recherche agricole (CGIAR, Montpellier, France) a créé une plateforme pour le big data en agriculture dans le but d'utiliser des approches de big data pour résoudre les problèmes de développement agricole plus rapidement à une plus grande échelle qu'auparavant [69].

I.2.3.4 Robotique et Intelligence Artificielle (IA)

Les grands défis d'ingénierie suscitent généralement de grandes solutions par le biais de technologies de rupture, et l'agriculture 4.0 est probablement celle de la première moitié du XXIe siècle. Le concept d'agriculture 4.0 implique que les exploitations agricoles suivent les principes de l'agriculture de précision et utilisent des équipements qui impliquent des opérations non habitées et des systèmes autonomes d'aide à la décision. Ainsi, l'agriculture 4.0 implique l'utilisation de robots et de certaines techniques d'IA [70]. Par tradition, les exploitations agricoles ont eu besoin de nombreux travailleurs, surtout saisonniers, pour récolter les cultures et maintenir la productivité des exploitations. Cependant, la société est passée d'une société agraire avec de grandes quantités de personnes vivant dans des fermes à des personnes vivant maintenant dans les villes ; en conséquence, les fermes sont confrontées au défi d'une pénurie (manque) de main-d'œuvre. Une solution pour pallier cette pénurie de main-d'œuvre est l'utilisation des robots agricoles intégrant des fonctionnalités d'IA. Selon une étude de Forbes [71], les robots agricoles permettent de faire face à la pénurie de main-d'œuvre, et peuvent faire, avec les humains, des récoltes à un volume plus élevé et à un rythme plus rapide que les travailleurs humains. Bien qu'il existe encore de nombreux cas où les robots ne sont pas aussi rapides que les humains, l'agriculture développe actuellement des systèmes robotiques pour travailler sur le terrain et aider les producteurs dans les tâches fastidieuses [72]–[79], en poussant les systèmes agricoles vers le nouveau concept de l'agriculture 4.0. Selon Reddy et al [80], l'arrivée des robots dans l'agriculture a considérablement augmenté la productivité dans plusieurs pays et a réduit les coûts d'exploitation des fermes. Comme nous l'avons déjà dit, les applications robotiques pour l'agriculture connaissent une croissance exponentielle [81], ce qui offre des solutions prometteuses à l'agriculture intelligente pour faire face à la pénurie de main-d'œuvre et à la baisse de rentabilité à long terme ; cependant, comme la plupart des innovations, il existe des limites importantes auxquelles il faut faire face dans les premières phases actuelles. Ces technologies sont encore trop coûteuses pour la plupart des agriculteurs, en particulier ceux qui ont de petites exploitations [82], car les économies d'échelle rendent les petites exploitations individuelles moins rentables [83], Néanmoins, le coût de la technologie diminue avec le temps, et les robots agricoles seront certainement utilisés dans l'avenir comme alternative pour augmenter la production [84]. La production agricole mondiale et le rendement des cultures ont ralenti en 2015 [85]. Le concept de robotique agricole a été introduit pour surmonter les problèmes de l'agriculture et satisfaire la demande croissante de rendements élevés. Les innovations robotiques donnent un coup de fouet au marché mondial de l'agriculture et de la production végétale, car selon le rapport VMI (Verified Market Intelligence), les robots agricoles seront capables d'accomplir des tâches sur le terrain avec plus d'efficacité que les agriculteurs [86].

Les start-ups de technologie agricole (Agricultural tech startups) ont récolté plus de 800 millions de Dollars Américains au cours des cinq dernières années [87]. Les start-ups utilisant la robotique, l'IdO et l'IA pour résoudre des problèmes dans l'agriculture. En fait, le financement du capital-risque en l'IA a augmenté de 450 % au cours des 5 dernières années [88]. Ce type de nouvelle agriculture prétend augmenter le rendement, car nourrir les gens tout en augmentant la production de manière durable et en prenant soin de l'environnement sera crucial dans les années à venir. Les techniques avancées en agriculture peuvent aider à relever ce défi ; elles fournissent des informations détaillées sur le sol, l'état des cultures et les conditions environnementales pour permettre des applications précises de produits phytosanitaires, ce qui se traduit par une réduction de l'utilisation d'herbicides et de pesticides, une meilleure utilisation de l'eau et de l'énergie, et une augmentation du rendement et de la qualité des cultures [89].

I.3 Contributions

L'objectif de ces travaux de thèse est la gestion rationnelle d'un environnement agricole (serre). Le projet visé concerne le développement et la réalisation d'un système de contrôle et supervision d'une serre agricole. Il s'agit d'utiliser de nouvelles techniques intelligentes dans la supervision et le contrôle, dans l'objectif d'obtenir un très bon rendement, tout en consommant le moins possible d'énergie et d'intrants (eau, engrais, phytosanitaires, etc.).

Cette thèse s'inscrit, en partie, dans le cadre du projet PRFU (A10N01UN260120190001) «Robotique, supervision et contrôle intelligents au service de l'agriculture »de l'Université de Médéa.

Les principales contributions de cette thèse sont les suivantes :

- Conception et implémentation d'un système de recueil de données en utilisant les réseaux de capteurs sans fils.

- Conception et implémentation d'un système de fusion multi-capteurs en utilisant les techniques d'intelligence artificielle (logique floue) pour obtenir une vue globale (image complète) sur l'environnement et pour prise la bonne décision.

- Conception et implémentation d'un système intelligent de supervision à base de l'IdO qui permet à l'utilisateur de contrôler et de surveiller l'environnement agricole depuis n'importe quel endroit et à tout moment.

- Conception et implémentation d'un système de communication en utilisant : la radiofréquence pour les capteurs, la communication série filaire au niveau de l'unité de traitement et envoi d'information au cloud et enfin une communication WIFI pour l'utilisation de l'IdO.

- Conception et mise en œuvre d'une base de données afin de stocker et bien gérer les différents paramètres agricoles.

I.4 Organisation du manuscrit

Le présent manuscrit est décomposé en six chapitres. Après cette introduction générale, le chapitre II porte dans sa première partie sur une étude générale sur les serres agricoles, où les différents facteurs climatiques essentiels pour le développement de la plante et les composants importants pour la gestion de ces paramètres climatiques sont présentés. La deuxième partie de ce chapitre réunit l'ensemble des systèmes d'irrigation existants.
Le chapitre III présente un état de l'art sur la fusion de données et les différentes méthodes de fusion.
Dans le quatrième chapitre, nous présentons les différents outils utilisés dans le projet :

- Hardwares utilisés : les modules de communication (modules nRF) ainsi que l'unité de traitement (Raspberry Pi 3).

- Softwares utilisés : l'algorithme de fusion de données (la logique floue), la plateforme IdO (Node-RED) et le système de gestion de base de données (MySQL).

Le cahier de charge détaillé, les solutions hardwares et softwares adoptées ainsi que les principaux résultats de ce travail de recherche font l'objet du cinquième chapitre.
La dernière partie englobe une conclusion générale et les perspectives du travail de thèse.

Chapitre II

Généralités sur les serres agricoles et les systèmes d'irrigation

II.1 Introduction

Après l'avènement de la révolution verte, l'accent est mis davantage sur la qualité du produit ainsi que sur la quantité de production pour répondre aux besoins alimentaires [90]. Ces deux exigences peuvent être satisfaites lorsque l'environnement pour la croissance de la plante est adéquatement contrôlé.

La nécessité de protéger les cultures contre des conditions environnementales défavorables a conduit au développement d'une agriculture protégée. La serre est la méthode la plus pratique pour atteindre les objectifs de l'agriculture protégée, où l'environnement naturel est modifié et contrôlé en utilisant des principes d'ingénierie sains pour obtenir une croissance et un rendement optimaux des plantes [91].

Une serre est une structure encadrée ou gonflée recouverte d'une matière transparente ou translucide dans laquelle les cultures pourraient être cultivées dans les conditions d'un environnement contrôlé même partiellement [92].

Ce chapitre se focalise dans sa première partie sur l'étude de différents paramètres climatiques sous serres, ainsi que les équipements nécessaires aux contrôle et gestion de ces paramètres. La deuxième partie présente une étude générale sur les différentes techniques utilisées dans l'irrigation.

II.2 Avantages des serres agricoles

Le choix des produits dans une serre a donné lieu à un certain nombre d'avantages dont quelques avantages de la production sous serres dans un milieu contrôlé sont énumérés comme suit [92] :

- Au cours de l'année, de quatre à cinq cultures peuvent être cultivées en serre en raison de la disponibilité des conditions environnementales requises.
- La productivité de la culture est considérablement augmentée.
- Des produits de qualité supérieure peuvent être obtenus à mesure qu'ils sont cultivés dans un environnement adéquatement contrôlé.
- Il est possible de lutter efficacement contre les ravageurs et les maladies en fermant la zone de culture.

- Le pourcentage de germination des graines est élevé dans les serres.
- Les calendriers de production agricole et horticole peuvent être planifiés efficacement pour tirer parti des besoins du marché.

II.3 Classification des serres agricoles

Divers types des serres sont utilisés avec succès pour la production végétale. En général, il n'y a pas un seul type de serre qui peut être considérée comme le meilleur, où il existe des avantages spécifiques dans chaque type pour un usage donné. Il y a différentes classifications des types de serres [92] :

II.3.1 Selon la forme

Il existe différentes classes de serres. Selon leur forme architecturale, nous pouvons distinguer deux types de bases :

- Une serre à module unique, constituée d'une serre isolée à partir d'autres structures. Le type de serre individuelle le plus courant pour la production commerciale est le Quonset (tunnel).
- Une serre multi-module, formée par une série de serres reliées par des gouttières.

Les types multi-pan (multichapelle) permettant une meilleure utilisation du sol, sont moins chers à construire et à chauffer, et ayant un rapport plus faible entre la surface de revêtement et la surface du sol.

Les formes les plus fréquentes pour les serres (Figure II.1) sont le toit de selle (a), la scie toit en dent ou en appentis (b), tunnel en arc rond (c), arc rond avec paroi latérale verticale (d), arc pointu avec paroi latérale en pente (e) et arc pointu avec paroi latérale verticale (f).
Préférable pour les serres de film plastique sont les dessins (c) et (d).

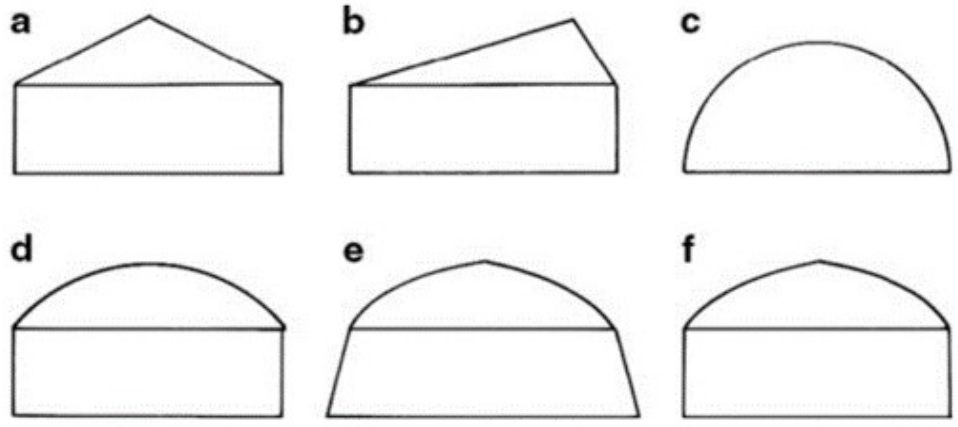


Figure II.1 – Formes les plus fréquentes des serres [93]

II.3.1.1 Serre tunnel en arc rond

Ce sont les serres les plus utilisées dans de nombreux pays surtout sur le pourtour méditerranéen. L'avantage des tunnels à travée unique est le système de construction relativement simple et la

résistance au vent s'ils ont des fondations et si les tubes d'acier ne sont pas trop faibles, mais les inconvénients ne sont pas négligeables en ce qui concerne le rendement et la qualité.

II.3.1.2 Serre mono chapelle

C'est une serre dans laquelle les démangeaisons du toit sont les mêmes des deux côtés. Cette serre permet de faire pousser quelques plantes à un coût relativement faible pour le chauffage et le refroidissement et elle a une plus grande flexibilité dans la conception et prévoit plus de rendement.

II.3.1.3 Type de dent de scie

Ceux-ci sont également similaires à des serres de type crête et sillon sauf qu'il y a des dispositions pour la ventilation naturelle dans ce type. Un circuit de ventilation naturelle spécifique se développe dans une serre à dents de scie.

II.3.1.4 Serre à porter inégale

Ce type de serre est construite sur un terrain vallonné. Les toits sont de largeur inégale ; faire la structure adaptable aux pentes latérales de la colline. Ce type de serres est rarement utilisé aujourd'hui, car il n'est pas adaptable à l'automatisation.

II.3.2 Selon le matériau de revêtement

Les matériaux de revêtement sont la composante principale et importante de la structure de la serre. Ils ont une influence directe sur l'effet de serre à l'intérieur de la structure et ils modifient la température de l'air. Les types de cadres et la méthode de fixation varient également avec le matériau de couverture. En fonction du type de matériau de couverture, les serres sont classées comme serres en verre, film plastique et panneaux rigides.

II.3.2.1 Serre en verre

Le verre comme matériau de revêtement a l'avantage d'une plus grande intensité lumineuse intérieure. Ces serres (Figure II.2) ont un taux d'infiltration d'air plus élevé, ce qui réduit l'humidité intérieure et améliore la prévention des maladies.



Figure II.2 – Serre en verre [94]

II.3.2.2 Serre à film plastique

Dans ce type de serres, on utilise des pellicules plastiques souples, notamment du polyéthylène, du polyester et du chlorure de polyvinyle. Les plastiques comme matériau de revêtement pour les serres sont devenus populaires, car ils sont bon marché et le coût du chauffage est moins par rapport aux serres en verre. Le principal inconvénient avec les films en plastique est sa courte durée de vie par exemple, le film stabilisé aux ultraviolets de meilleure qualité ne peut durer que quatre ans. La conception tunnel ainsi que la conception de gouttière sont adaptées à l'utilisation de ce matériau de revêtement. La figure II.3. Illustre une serre en plastique.



Figure II.3 – Serre en plastique [95]

II.3.2.3 Serre à panneaux rigides

Les panneaux rigides en chlorure de polyvinyle, les panneaux rigides en plastique renforcé de fibre de verre, en acrylique et en polycarbonate sont utilisés comme matériau de recouvrement dans les cadres de type tunnel ou les cadres de type crête et sillon. Ce matériau est plus résistant à la casse et l'intensité lumineuse est uniforme dans toute la serre par rapport au verre ou au plastique. Les panneaux de qualité supérieure ont une longue durée de vie, même jusqu'à 20 ans. Le principal inconvénient est que ces panneaux ont tendance à recueillir de la poussière ainsi que des algues, ce qui entraîne l'assombrissement des panneaux et la réduction subséquente de la transmission de la lumière. Il y a un risque d'incendie important. La conception de la serre doit être choisie en fonction des conditions climatiques et des exigences générales de conception, et non en fonction des traditions nationales.

II.4 Paramètres climatiques sous serres

La productivité d'une culture est influencée non seulement par son hérédité, mais aussi par le microclimat qui l'entoure. Parmi les paramètres les plus influents dans la production végétale sont la température, l'humidité, la teneur en CO_2 et la lumière [96].

II.4.1 Température

C'est le paramètre le plus important pour la production des cultures sous serre [97]. La température est un facteur principal qui influe sur le rythme de développement de la plante. La vitesse de croissance et de développement de la plante dépend de la température ambiante et chaque espèce a une plage de température spécifique représentée par un minimum, maximum et optimum [98]. La

température a un impact direct sur les phases de développement physiologique (floraison, germination, et développement) de la plante, régule le taux de transpiration et l'état de l'eau de la plante grâce au contrôle stomatal pendant la photosynthèse. La vitesse de réaction augmente facilement avec la température ambiante. Citons par exemple la photosynthèse qui se multiplie presque en deux lorsque la température augmente de 10°C [99].

II.4.2 Humidité

L'humidité est l'un des paramètres les plus importants dans le domaine agricole. C'est la quantité de vapeur d'eau dans l'air. Elle peut être exprimée sous forme d'humidité absolue ou d'humidité relative.

II.4.2.1 Humidité absolue

C'est la quantité totale de vapeur d'eau (M_{v_eau}) présente dans un volume d'air donné (V_{air}).

$$H_{ab} = \frac{M_{v_eau}}{V_{air}} \tag{II.1}$$

II.4.2.2 Humidité relative

C'est la quantité de vapeur d'eau contenue dans un volume d'air donné. Elle est aussi définie comme étant le rapport de pression partielle de vapeur d'eau (P_v) à la pression de vapeur saturante (P_s) à une température donnée [100]. L'humidité relative(H_R) affecte indirectement la croissance des feuilles, la photosynthèse (lorsque l'H_R est faible, la transpiration augmente, ce qui provoque des déficits d'eau dans la plante), la pollinisation et génère de ravageurs et divers types de maladies végétales [101].

$$H_R = \frac{P_v}{P_s(T)} \tag{II.2}$$

À l'intérieur d'un même espace, H_R varie en fonction des changements de température : elle augmente si la température baisse et diminue si elle s'élève. La gamme d'H_R saine pour les plantes est de 50 à 70 %. Si l'humidité est inférieure à 50 % pour une plus longue durée, la croissance de la plante sera affectée en raison de la perte d'eau des feuilles [102].

II.4.3 Teneur en CO_2

Comme la température et l'humidité, la concentration de dioxyde de carbone (CO_2) est un autre paramètre important dans la serre. Pendant le processus de photosynthèse, le CO_2 et la lumière du soleil sont utilisés pour produire les hydrates de carbone requis par la croissance des cultures [103]. Les principaux effets d'une forte concentration de CO_2 sont une augmentation du taux de photosynthèse et une diminution du taux de transpiration [104]. Une courbe de changement typique de la concentration de CO_2 recueillie dans la serre est montrée à la figure II.4, d'où l'on peut observer que le changement de la concentration de CO_2 est relativement important en un jour. Pendant la période de 10 :30 à 16 :00, la consommation de CO_2 est assez importante et ceci est évidemment dû à la photosynthèse de la culture. Une régulation raisonnable de la concentration de CO_2 pourrait fournir suffisamment de CO_2 pour la photosynthèse des cultures, améliorer l'efficacité de la croissance des cultures [105] et améliorer encore la qualité des cultures dans la serre [106].

II.4.4 Lumière

La lumière visible du rayonnement solaire est une source d'énergie pour les plantes. La lumière est un facteur essentiel dans l'entretien des plantes. Le taux de croissance et la durée d'activité d'une plante dépendent de la quantité de lumière qu'elle reçoit. En effet, l'énergie lumineuse fixe dans la

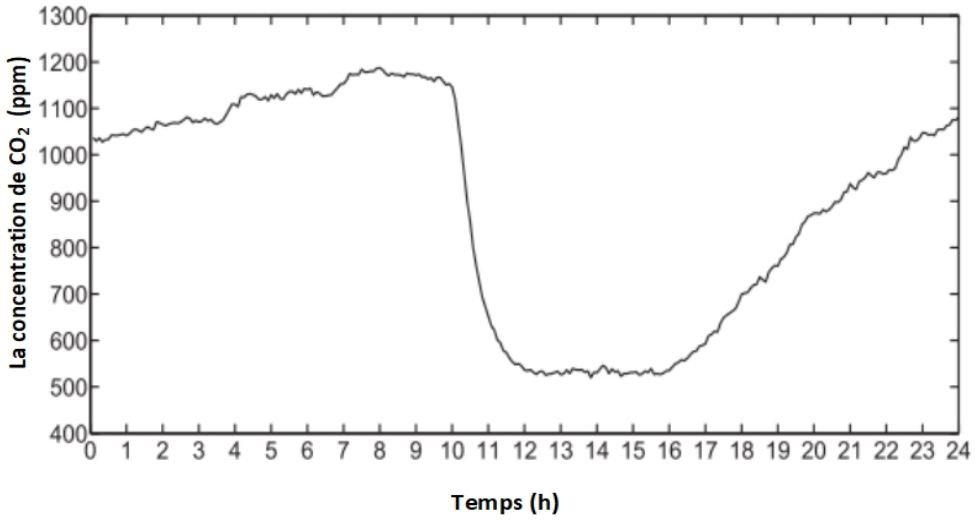


Figure II.4 – Variation de la concentration de CO_2 dans la serre pendant un jour [107]

plante le gaz carbonique et l'eau de l'air pour produire le sucre et l'amidon [108].

II.5 Équipements d'une serre

Les composantes du microclimat des cultures sont la lumière, la température, les compositions atmosphériques et la nature du milieu racinaire. Dans les champs ouverts, seule la manipulation de la nature du milieu racinaire par le travail du sol, l'irrigation et l'épandage d'engrais sont possibles. Même dans ce cas, la nature du milieu racinaire est modifiée, mais non contrôlée. La croissance des cultures est essentiellement déterminée par les variables climatiques dans l'environnement et par les quantités d'eau et d'engrais qui peuvent être fournies. Par conséquent, la croissance des cultures peut être gérée en contrôlant ces variables [109]. Cela rend une serre idéale pour la culture parce qu'elle est fermée et ces variables peuvent être manipulées pour la croissance et le développement optimaux des plantes [110]. Toutefois, en raison de ses limites fermées, la serre permet de contrôler au moins une des composantes du microclimat [92]. L'ajustement optimal du climat de serre permet d'améliorer la productivité et de réaliser des économies d'énergie remarquables [102].

II.5.1 Capteurs

Les capteurs sont des dispositifs qui convertissent la variable physique en signal électrique généralement pour le traitement, le contrôle ou l'affichage. Une bonne gestion des cultures dépend de la bonne information pour prendre les décisions nécessaires. Les facteurs les plus importants pour la qualité et la productivité de la croissance des plantes sont la température, l'humidité, la lumière et le niveau du dioxyde de carbone. La surveillance continue de ces variables environnementales permet au producteur de mieux comprendre l'influence de chaque facteur sur la croissance et la manière de gérer la productivité maximale des cultures [111].

II.5.1.1 Capteurs de température

Les capteurs de température sont utilisés dans de nombreuses applications. Chaque application peut avoir un besoin de détection de température différent. Les différences comprennent ce qui est mesuré (air, masse ou liquide), où il est mesuré (à l'intérieur ou à l'extérieur) et la plage de température mesurée. Plusieurs types de capteurs servent à mesurer la température sous serres (thermistances, thermocouples, composants semi-conducteurs, diode à jonction, détecteurs résistifs, etc.) [108].

II.5.1.2 Capteurs d'humidité

Un capteur d'humidité est un dispositif qui détecte, mesure et signale l'humidité relative (H_R) de l'air ou détermine la quantité de vapeur d'eau présente dans le mélange gazeux (air) ou le gaz pur [112]. Différents types de capteurs d'humidité sont disponibles et fonctionnent selon différents principes tels que les sondes capacitives, résistives, semi-conductrices, optiques et acoustiques de surface. Certains avantages des capteurs capacitifs incluent une faible consommation d'énergie, une bonne linéarité, et une large gamme de détection, mais un processus de fabrication compliqué est le principal inconvénient. Les capteurs résistifs surmontent ces problèmes par leur facilité de fabrication, leur grande sensibilité, leur faible coût et leur faible consommation d'énergie. L'oxyde métallique, les polymères et les matériaux à base de carbone sont les matériaux les plus fréquemment utilisés pour la fabrication de capteurs d'humidité. Ces matériaux ont un faible coût et une grande sensibilité ainsi qu'une bonne compatibilité. Mais les capteurs d'oxyde de métal se dégradent en humidité et les polymères ont une faible stabilité dans des environnements très humides.
La figure II.5 illustre quelques capteurs qui peuvent être utilisés pour mesurer la température et l'humidité à l'intérieur d'une serre agricole.

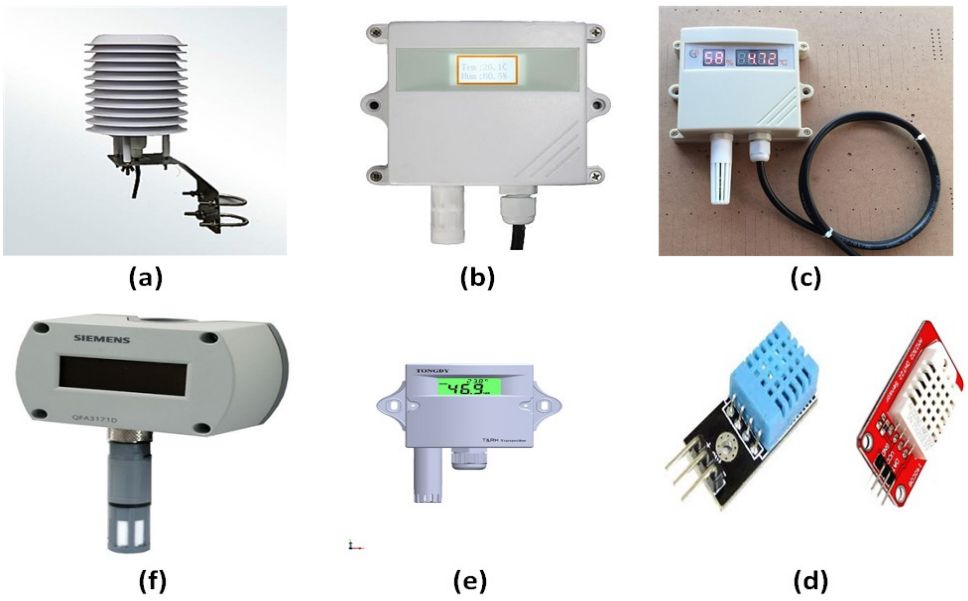


FIGURE II.5 – Capteurs de température et d'humidité : (a) RK330-01 ; (b) RK330-02 ; (c) TH1758 ; (d) DHT11/DHT22 ; (e) THP/TH9 ; (f) QFA3160D

II.5.1.3 Capteurs d'humidité de sol

Un capteur d'humidité du sol mesure la quantité d'eau contenue dans un matériau, comme le sol sur une base volumétrique (m3/m3) ou gravimétrique (g/kg) [113]. De nombreux types de capteurs d'humidité du sol sont disponibles pour une variété d'applications (Figure II.6).

II.5.1.4 Capteurs de dioxyde de carbone

Un capteur de dioxyde de carbone ou un capteur de CO_2 est un instrument de mesure du dioxyde de carbone gazeux. Les capteurs de CO_2 les plus courants sont les capteurs de gaz infrarouges (NDIR) et les capteurs de gaz chimiques [114].

II.5.1.5 Capteurs de lumière

Le capteur de lumière est un dispositif passif qui convertit l'énergie lumineuse en signal électrique. Les capteurs de lumière sont plus communément appelés dispositifs photoélectriques ou

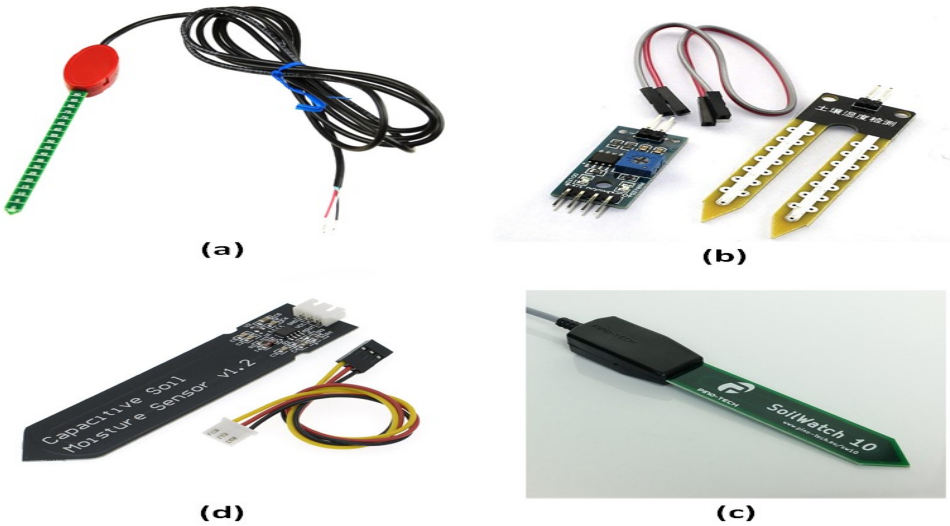


FIGURE II.6 – Capteurs d'humidité de sol : (a) VH400 ; (b) YL-98 ; (c) SoilWatch 10 ; (d) Capacitive Soil Moisture Sensor V1.2

photodétecteurs, car ils convertissent l'énergie lumineuse (photons) en signal électronique (électrons). Les phototransistors, les photorésistances et les photodiodes sont les capteurs d'intensité lumineuse les plus communs [115].

II.5.1.6 Critères de choix d'un capteur

Les critères suivants sont à considérer pour le choix d'un capteur :

- La taille de la serre.
- Le coût.
- La résolution du capteur.
- La sensibilité.
- La rapidité (temps de réaction du capteur).

II.5.2 Actionneurs

Les serres construisent des structures qui permettent la création d'un microclimat intérieur pour le développement des cultures et protègent les plantes des conditions extérieures défavorables. Le climat de serre peut être modifié par des actionnements artificiels, tels que le chauffage, la ventilation, l'humidification, extraction, enrichissement au CO_2 et éclairage, afin de fournir les meilleures conditions environnementales [97].

II.5.2.1 Chauffage

Le chauffage des serres est nécessaire dans les régions froides. Le système de chauffage devrait fournir de la chaleur à la serre au même rythme que celui auquel elle est perdue. Il existe plusieurs systèmes de chauffage populaires pour les serres. Le plus commun est les unités de chauffage(l'aérotherme) et le système de chauffage central [116].

II.5.2.1.1 Aérotherme (chauffage d'air)

C'est le système le plus commun et le moins cher (Figure II.7). Dans ce système, l'air chaud est soufflé à partir des unités de chauffage qui ont des foyers autonomes. Les aérothermes sont la forme de chauffage la plus couramment utilisée pour les raisons suivantes [117] :

- Ils permettent de réagir rapidement aux changements de température.
- Ils sont faciles à installer.
- Ils peuvent être combinés avec des systèmes de ventilation et des applications de chaleur résiduelle.
- Ils sont comparativement les moins coûteux.



Figure II.7 – Chauffage d'aire [118][119]

II.5.2.1.2 Chauffage central

Un deuxième type de système est le système de chauffage central, qui se compose d'une chaudière centrale qui produit de la vapeur ou de l'eau chaude, plus un mécanisme de rayonnement dans la serre pour dissiper la chaleur. Un système de chauffage central peut être plus efficace que les unités de chauffage, en particulier dans les grandes serres. Dans ce système, deux ou plusieurs grandes chaudières sont dans un seul endroit. La chaleur est transportée sous forme d'eau chaude ou de vapeur par les conduites principales vers la zone de croissance, et plusieurs aménagements de tuyaux de chauffage en serre sont possibles comme le montre la figure II.8.

II.5.2.2 Système de refroidissement (ventilation)

La réduction de la température intérieure est l'un des principaux problèmes auxquels est confrontée la gestion des serres dans les climats chauds. L'un des moyens les plus efficaces de réduire la différence entre la température de l'air intérieur et extérieur est le système de ventilation. La ventilation dans une serre peut être naturelle ou forcée.

II.5.2.3 Ventilation naturelle

La ventilation naturelle est le système le plus économique pour réguler le microclimat interne de la serre. La ventilation naturelle utilise une série d'évents de toit et de trottoir. À mesure que la



Figure II.8 – Chauffage central sous serre [120]

température augmente dans la serre, l'air chaud monte et s'échappe par les évents du toit. Cela crée un vide qui attire l'air plus frais dans la serre par les évents latéraux situés plus près du sol.

II.5.2.4 Ventilation forcée

Dans la ventilation forcée, des ventilateurs sont installés dans une serre pour évacuer l'air chaud qui monte. Cela crée un vide qui attire l'air plus frais à travers les persiennes sur les côtés de la serre. Lorsqu'elle est bien conçue, ce type de ventilation peut maintenir une température idéale à l'intérieur des serres, même si elle fonctionne dans divers endroits et dans diverses conditions météorologiques. Il devrait y avoir plusieurs ventilateurs pour assurer la ventilation à divers débits (Figure II.9). Un ventilateur permet de rafraîchir l'air et d'apporter aussi le CO_2 nécessaire à la photosynthèse [121]. Le mouvement horizontal de l'air offre plusieurs avantages. Plus particulièrement, il réduit sensiblement les gradients de la température dans la serre et enlève l'humidité dans le reste de la serre, ce qui favorise une grande homogénéité du climat sous la serre [108].



Figure II.9 – Ventilateurs sous serre [122]

II.5.2.5 Système de brumisation (humidificateur)

Le système fonctionne en alimentant l'air d'entrée avec de fines gouttelettes d'eau. Les gouttes peuvent être de tailles différentes selon la durée de l'évaporation dans les conditions ambiantes

prévues. Ces systèmes, généralement entre 20 et 40 microns, passent par des buses d'atomisation d'eau déminéralisée à haute pression. Puis l'eau est jetée des seins. En multipliant les goupilles d'impact, des milliards de gouttes d'eau se forment. Dans l'humidification dans l'horticulture d'aujourd'hui, il est important de maintenir des niveaux humides pour une culture en serre [123].Figure II.10 illustre un système de brumisation installé dans une serre agricole.



Figure II.10 – Système de brumisation [123]

II.5.2.6 Système de déshumidification

La déshumidification de l'air est un processus qui consiste à diminuer le contenu de vapeur dans l'air. L'air peut être déshumidifié de plusieurs façons : chauffage et ventilation, déshumidification par condensation et déshumidification par adsorption. La ventilation et chauffage est la méthode de déshumidification la plus utilisée. Cette méthode consiste à élever la température de l'air dans la serre et à appliquer une ventilation intense. Son efficacité dépend de conditions climatiques extérieures, les meilleurs effets peuvent être obtenus en hiver, ils sont moins bons au printemps et en automne, et mauvais en été. Les coûts énergétiques de cette méthode sont importants.

II.5.2.7 Distribution du CO_2

Il est important de parvenir à une distribution homogène du CO_2 dans l'ensemble de la serre, sans différences entre le début et la fin des lignes d'alimentation (gradient horizontal), et en évitant également les gradients verticaux (faible concentration à l'intérieur du couvert végétal).
Les conduits de distribution peuvent être situés à l'intérieur de la culture, reposant sur le sol, de sorte que l'air enrichi traverse la canopée avant qu'elle n'atteigne le toit.
Il existe deux méthodes principales pour distribution de CO_2 pur. Dans le premier cas, le CO_2 liquide est évaporé au moyen d'équipements spécialisés, puis forcés par sa propre pression à travers un réseau de distribution de tuyaux et livré par des tubes PE (polyéthylène) perforés le long ou sous les rangées de plantes ; cette méthode est populaire dans les pays du Nord. La deuxième méthode consiste à injecter du CO_2 dans le flux d'air d'un ventilateur, qui est relié à un pipeline de circulation d'air perforé de grands diamètres des tubes en PE ; cette méthode est populaire dans les pays chauds du sud, notamment le long de la Méditerranée [124].

II.5.2.8 Critères de choix d'un actionneur

Les principaux critères de choix d'un actionneur sont :

- La puissance à transmettre.

- La source d'énergie disponible.
- Le coût.
- La taille de la serre.

II.6 Systèmes d'irrigation

Un système d'irrigation bien conçu fournira la quantité précise d'eau nécessaire chaque jour tout au long de l'année. La quantité d'eau nécessaire dépend de la superficie de culture, de la culture, des conditions météorologiques, de la période de l'année et du fonctionnement du système de chauffage ou de ventilation. Les besoins en eau dépendent également du type de sol.
Plusieurs systèmes d'irrigation, tels que l'arrosage manuel, l'irrigation par canaux, l'arrosage périmétrique, l'irrigation par gicleurs, l'arrosage par perche et l'irrigation par ruissellement/goutte-à-goutte qui sont actuellement utilisés. Ces systèmes feront l'objet d'explications détaillées dans les prochaines sections.

II.6.1 Arrosage manuel

L'arrosage à la main est toujours utilisé lorsque le nombre d'unités est faible, le travail bon marché ou il existe une grande diversité de tailles et d'espèces. L'eau est distribuée manuellement au besoin. Une extrémité du tuyau flexible est raccordée à une alimentation en eau et l'autre est utilisé pour irriguer les plantes. Ce système d'irrigation présente certains inconvénients [125] :

- Elle est à forte intensité de main-d'œuvre, donc économiquement non viable dans les pays développés où la main-d'œuvre est chère.
- Grand risque d'appliquer trop peu d'eau ou d'attendre trop longtemps entre les arrosages.
- L'arrosage manuel demande beaucoup de temps et est très ennuyeux.
- Elle est habituellement effectuée par des employés inexpérimentés, qui peuvent être tentés d'accélérer le travail ou de le remettre à un autre moment. Un bon arrosage nécessite beaucoup formation et un travail fiable.
- Les crues aériennes, exemptes d'eau en mouvement, dégradent la structure des sols, ce qui entraîne la formation de croûtes et réduit l'infiltration et l'approvisionnement en oxygène.

L'arrosage automatique est rapide et facile. Il est effectué par le producteur lui-même. Lorsque l'arrosage manuel est pratiqué, un brise-eau doit être utilisé à l'extrémité du tuyau. Un tel dispositif brise la force de l'eau, permettant un débit plus élevé sans laver le substrat racinaire du banc ou du pot [92].

II.6.2 Irrigation par canaux

C'est le système qui est utilisé depuis l'Antiquité et qui est toujours en vigueur dans de nombreux pays (Figure II.11). L'eau est obtenue à partir du canal principal et distribuée aux différentes parties de la culture. Le débit d'eau du canal principal dans les ravines peuvent être contrôlé en utilisant des tubes de siphon en polyéthylène. Un siphon simple en forme de S est accroché à l'extrémité du conduit à n'importe quel endroit le long de sa longueur, ce qui le rend facile la dispersion de l'eau, juste là où elle est nécessaire.



Figure II.11 – Irrigation par canaux [126]

II.6.3 Arrosage périmétrique

Le système d'arrosage périmétrique peut être utilisé pour la production agricole dans des bancs ou des lits. Dans ce système, les tuyaux parcourent les périmètres d'un banc avec une buse qui pulvérise la surface moyenne de l'eau sous le feuillage (Figure II.12). Ce système est donc le plus pertinent pour la production de fleurs fraîches. Les tuyaux peuvent être en fer galvanisé ou en PVC (Polymerizing Vinyl Chloride). Dans ces tuyaux, les buses sont montées à un angle de 45, 90 ou 180 degrés. Normalement, des tuyaux de 19 mm de diamètre sont utilisés. Selon la longueur des lits, la soupape peut être fournie en conséquence [92].

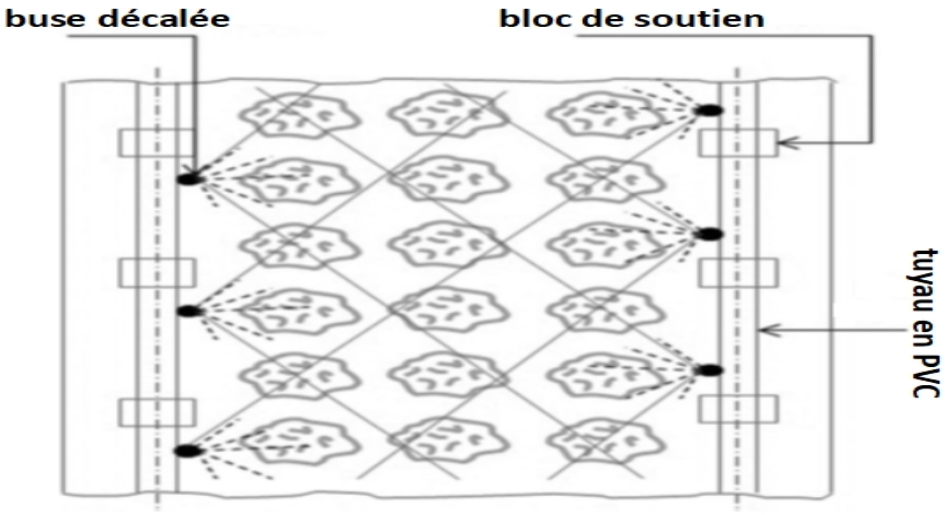


Figure II.12 – Diagramme schématique d'un Système d'arrosage périmétrique [92]

II.6.4 Irrigation par aspersion (par gicleurs)

Le système d'irrigation par gicleurs consiste à pomper l'eau dans un tuyau et à têtes de manière à appliquer l'eau sur le sol d'une manière similaire à celle reçue par les pluies (Figure II.13). C'est le système le plus populaire dans la région humide. La puissance requise pour soulever une quantité donnée d'eau dépend de la durée pendant laquelle la pompe est nécessaire. Ce système présente également certains avantages et inconvénients mentionnés ci-dessous [125].

* **Avantages :**

- Le nivellement des terres n'est pas nécessaire.
- Les problèmes de drainage sont réduits.
- L'érosion est réduite au minimum.
- Moins de compétences spéciales sont requises.

* **Inconvénients :**

- L'investissement initial est élevé.
- La consommation d'énergie est élevée.
- Il faut plus de travail pour déplacer le tuyau.
- Le vent empêche une distribution uniforme, ce qui fait qu'il est souvent nécessaire d'irriguer la nuit.
- Les pertes d'eau par évaporation sont plus élevées qu'avec d'autres méthodes d'irrigation.



Figure II.13 – Irrigation par aspersion [127]

II.6.5 Arrosage à flèche (Arrosage à rampes)

L'arrosage à flèche (Figure II.14) peut fonctionner comme un système ouvert ou fermé, et est souvent utilisé pour la production de semis cultivés dans des plateaux à bouchons. Les plateaux à bouchons sont des plateaux en plastique qui ont une largeur de 0.3 m, une longueur d'environ 0,61m et une profondeur de 13 à 38 mm, et contiennent environ 100 à 800 cellules. Chaque semis pousse est dans sa propre cellule. Un système d'arrosage à flèche se compose généralement d'un tuyau d'eau qui s'étend d'un côté à l'autre d'une baie de serre. Le tuyau est équipé de buses qui peuvent pulvériser soit de l'eau ou de la solution d'engrais. La flèche est fixée à son point central à une voiture qui longe les rails, souvent suspendue au-dessus de la promenade centrale de la baie de serre. De cette façon, la flèche peut passer d'un bout à l'autre de la baie. La flèche est propulsée par un moteur électrique. La quantité d'eau livrée par unité de surface des installations est ajustée par la vitesse à laquelle la flèche se déplace [92].



Figure II.14 – Arrosage à flèche sous serre [128]

II.6.6 Irrigation goutte à goutte

L'irrigation goutte à goutte (Figure II.15) est une technique reconnue pour atteindre des efficacités élevées dans l'utilisation de l'eau des cultures en mouillant seulement une partie limitée de la zone racinaire [129]. Comme chaque système a ses mérites et ses démérites, la méthode d'irrigation goutte à goutte est également attribuée à [116] :

* **Avantages :**

- Les racines ne sont jamais inondées et ont toujours accès à l'air et à l'eau.
- Augmentation des rendements des cultures, parfois jusqu'à 100 %, 20 à 40 % de plus qu'avec irrigation par canaux et 10 à 20% de plus que la méthode d'irrigation par gicleurs.
- Augmentation de la qualité et de la taille des cultures.
- La consommation d'eau a diminué de 25 à 50 %.
- Réduction du coût de la main-d'œuvre de 25 %.
- L'absence d'eau sur les feuilles signifie moins de maladies.
- Possibilité d'utiliser de l'eau à haute constante solide puisque les sels ne sont pas déposés au niveau de la racine.

* **Inconvénients :**

- Investissement initial plus élevé.
- Durée de vie relativement courte.
- Il peut y avoir des perforations, des trous et des pores obstrués.
- Attaques de rongeurs et d'animaux à la recherche d'eau dans les régions sèches.

II.6.7 Système de flux et reflux

Il s'agit d'un système de sous-irrigation pour les plantes en pot ou litière. les plantes sont cultivés dans un banc plat en plastique ou en fibre de verre disponible en différentes largeurs (1,2 à 2,0 m) et la longueur est de 1 m. Ces bancs sont collés pour former un banc de longueur et de largeur désirées. Ces bancs peuvent se déplacer sur un support. Ceux-ci ont des canaux pour drainer l'eau d'irrigation.



Figure II.15 – Irrigation par gout à gout [130]

Il y a un réservoir d'eau sous le banc. Ce réservoir est couvert pour éviter la poussière ou la croissance d'algues. La zone d'arrosage et la taille de la pompe doivent être appariées. Pour assurer l'arrosage du pot, l'eau reste sur le banc pendant 10 minutes et est recueillie dans le réservoir et réutiliser. L'engrais peut également être appliqué à travers ce système d'arrosage. Pot avec trou de fond est mieux que les trous latéraux [131]. Figure II.16 illustre le principe de cette méthode.

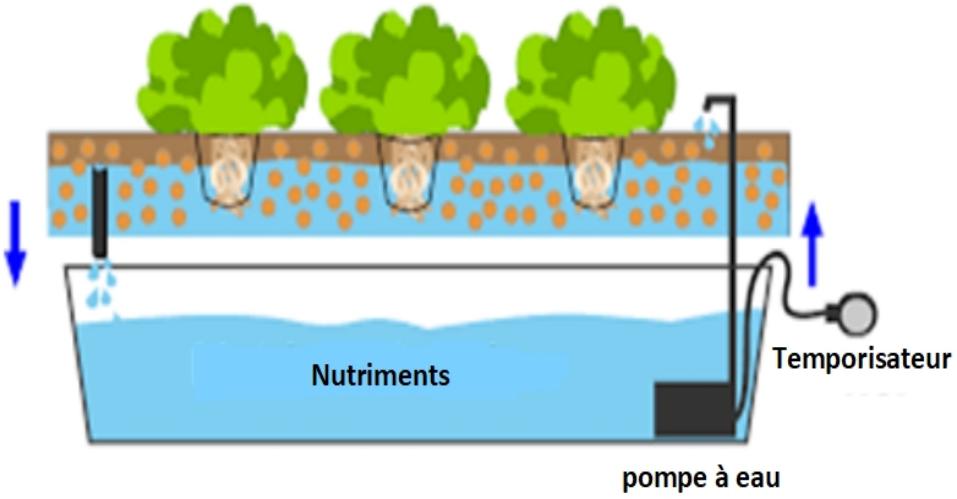


Figure II.16 – Système de flux et reflux [132]

II.7 Conclusion

Le type de la serre, la méthode d'irrigation et le contrôle environnemental adéquat de la condition interne dans une serre sont nécessaires pour influer sur la croissance, la productivité et la qualité des cultures. Dans ce chapitre, nous avons donné une vue globale sur les différents types des serres agricoles. Ensuite, nous avons déterminé les paramètres climatiques les plus influents sur la croissance de la culture sous serre. Ainsi, nous avons montré les différents composants nécessaires à la gestion efficace des serres. À la fin, nous avons étudié quelques méthodes d'irrigation et surtout dans les serres.

Les serres agricoles sont généralement affectées par l'emplacement, la température, la saison, etc. Donc, il est difficile de prendre une décision selon une seul information.
En utilisant mieux les ressources d'information pour une gestion idéale des serres agricoles, la technique de fusion de données est présente pour intégrer et utiliser l'information multidimensionnelle

des divers capteurs. Le chapitre suivant sera dédié aux fondements théoriques et techniques de fusion de données.

Chapitre III

Fusion de données

III.1 Introduction

Tous les organismes vivants ont la capacité d'obtenir des renseignements sur leur environnement et d'interpréter ces renseignements pour prendre des décisions appropriées.
Dresser un portrait complet de l'environnement ne pourrait pas être obtenue à l'aide d'un seul élément de détection, mais par la fusion de données recueillies de multiples éléments.

La fusion de données multi-capteurs est une technnique permettant de combiner des informations provenant de plusieurs sources afin de former une image unifiée. Le fonctionnement du cerveau humain est probablement la meilleure analogie avec un système de fusion de données multi-capteurs [133], où le cerveau agit comme le nœud de fusion et donne un sens à l'entrée fournie par nos cinq organes sensoriels, comme l'illustre la figure III.1.

Ce chapitre donne un aperçu général sur la fusion de données ainsi une étude des différentes techniques, méthodes et algorithmes de fusion existants.

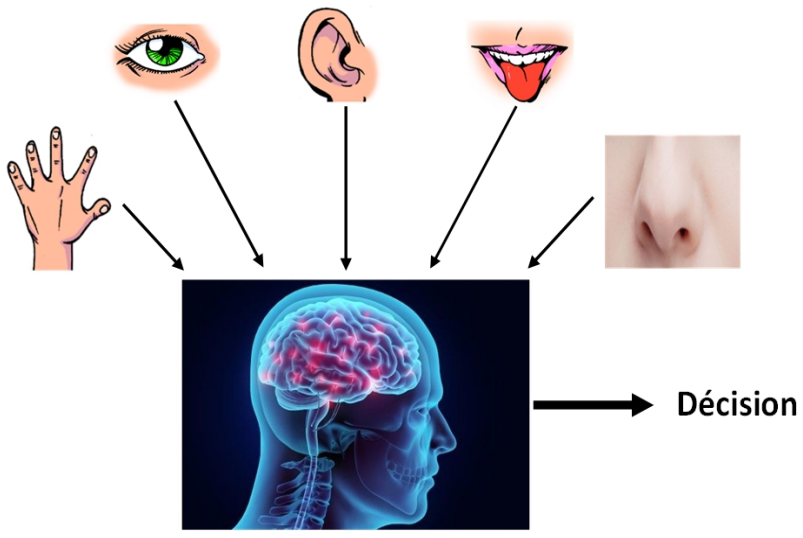


Figure III.1 – Décision humaine dépend de la fusion des différents sens

III.2 Fusion de données multi-capteurs

La fusion de données est apparue dans les années 1960 afin de servir des applications militaires (la surveillance des océans, la défense aérienne, le renseignement sur les champs de bataille et

l'identification de cibles). De même, depuis la fin du siècle dernier, la fusion de données a été élargie à des applications non militaires telles que l'acquisition de données, le contrôle automatisé, la surveillance d'équipements complexes et la robotique [134].

Il existe de nombreuses définitions de la fusion des données dans la littérature. L'une des premières définitions de la fusion de données a été proposée par JDL (Joint Directors of Laboratories [135], qui est un groupe de travail de défense américain :

"Data fusion is a process dealing with the association, correlation, and combination of data and information from single and multiple sources to achieve refined position and identity estimates, and complete and timely assessments of situations and threats, and their significance. The process is characterized by continuous refinements of its estimates and assessments, and the evaluation of the need for additional sources, or modification of the process itself, to achieve improved results"

Hall et Llinas [136] ont fourni une autre définition de la fusion des données : les techniques de fusion de données combinent les données de plusieurs capteurs et informations connexes provenants des bases de données correspondants afin d'obtenir une plus grande précision et des inférences plus précises que celle obteue en utilisant qu'un seul capteur. H. Boström et al [137] ont présenté une revue et une discussion de nombreuses définitions de la fusion de données.

La fusion de données multi-capteurs vise à surmonter les limites des capteurs individuels et à produire des estimations précises, robustes et fiables [138]. La fusion de données multi-capteur a attiré de nombreux chercheurs du milieu universitaire et de l'industrie en raison de ses avantages prévus dans de nombreuses applications [139]. Ces avantages comprennent, sans s'y limiter, l'amélioration de la confiance et de la fiabilité des mesures, l'extension de la couverture spatiale et/ou temporelle et la réduction des aspects relatifs à l'imperfection des données. H.B. Mitchell [140] a énuméré quatre principaux avantages de la fusion de données multi-capteurs :

- Une plus grande granularité dans la représentation de l'information.
- Une plus grande certitude dans les données et les résultats.
- L'élimination du bruit et des erreurs, produisant une plus grande précision.
- Permettant une vue plus complète sur l'environnement.

III.3 Classification de la fusion des données

La fusion de données est un domaine multidisciplinaire qui touche plusieurs secteurs et il est difficile d'établir une classification claire et stricte. Les méthodes et techniques utilisées peuvent être réparties selon la relation entre les sources, les entrées et les sorties et les niveaux d'abstraction [141] :

III.3.1 Classification basée sur la relation entre les sources

Cette classification est basée sur la relation entre les sources, la fusion de données peut être classée comme complémentaire, redondante ou coopérative [142].

III.3.1.1 Fusion complémentaire

Lorsque l'information fournie par les sources représente différentes parties d'une scène plus large, la fusion de l'information peut être appliquée pour obtenir une information plus complète (plus large). Dans la figure III.2, les sources S1 et S2 fournissent différents éléments d'informations, a et b, respectivement, qui sont fusionnés pour obtenir une information plus large, indiquée par (a+b), composée de pièces non redondantes a et b qui se rapportent à différentes parties de l'environnement. Fusion recherche l'exhaustivité en composant de nouvelles informations à partir de différentes pièces. Un exemple de fusion complémentaire consiste à fusionner des données provenant de nœuds de

capteurs dans une carte de caractéristiques qui décrit l'ensemble du champ du capteur, ou une information plus large [143]–[146].

III.3.1.2 Fusion redondante

Si deux ou plusieurs sources indépendantes fournissent la même information, ces éléments peuvent être fusionnés pour accroître la confiance associée. Les sources S2 et S3 de figure III.2, fournissent les mêmes renseignements 'b' qui sont fusionnés pour obtenir des renseignements plus précis (b). La fusion redondante pourrait être utilisée pour accroître la fiabilité, l'exactitude et la confiance de l'information. Dans les RCSFs, la fusion redondante peut fournir des informations de haute qualité et empêcher les nœuds de capteurs de transmettre des données redondantes.

III.3.1.3 Fusion coopérative

Deux sources indépendantes coopèrent lorsque les informations qu'elles fournissent sont fusionnées en de nouvelles informations (généralement plus complexes que les données originales) qui, du point de vue de l'application, représentent mieux la réalité. Les sources S4 et S5, à la figure III.2, fournissent des renseignements différents, c et c*, qui sont fusionnés en (c), ce qui décrit mieux la scène par rapport à c et c* individuellement. Un exemple classique de fusion coopérative est le calcul d'un emplacement cible basé sur les données d'angle et de distance. La fusion coopérative doit être soigneusement appliquée puisque les données qui en résultent sont sujettes aux inexactitudes et imperfections de toutes les sources impliquées [143][147].

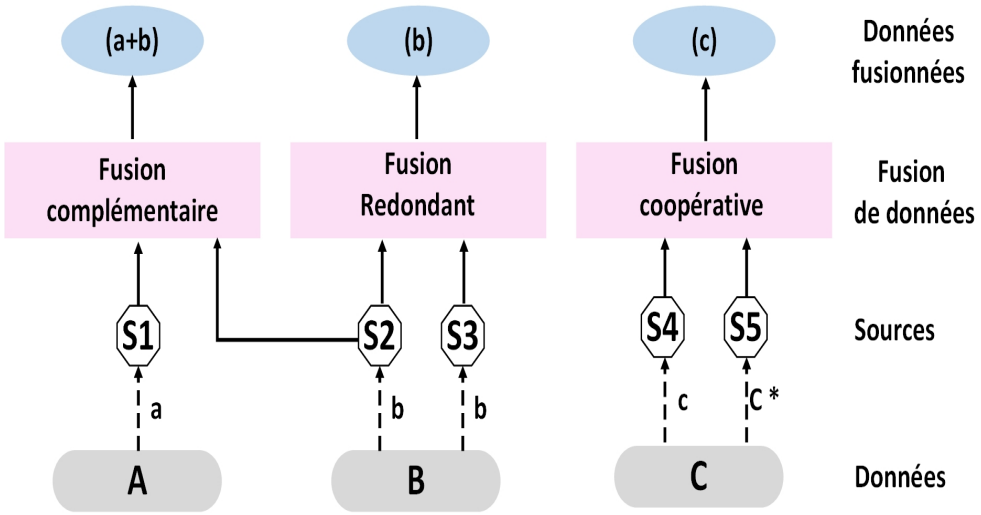


Figure III.2 – Types de fusion de données basées sur la relation entre les sources [148]

III.3.2 Classification fondée sur les entrées et les sorties (Classification de Dasarathy)

L'un des systèmes de classification de fusion de données les plus connues a été fourni par Dasarathy [149] et se compose des cinq catégories (Figure III.3).

III.3.2.1 Data in-Data out (DAI-DAO)

Ce type est la méthode de fusion de données la plus élémentaire qui est considérée dans la classification. Ce type de processus de fusion entre des entrées et sorties de données brutes délivre des résultats qui sont généralement plus fiables et exactes. La fusion des données à ce niveau est effectuée immédiatement après la collecte des données des capteurs. Les algorithmes utilisés dans cette méthode sont basés sur des algorithmes de traitement de signaux et d'images.

III.3.2.2 Data in-Feature out (DAI-FEO)

Dans cette méthode, le processus de fusion de données utilise des données brutes provenant de plusieurs sources pour extraire des caractéristiques ou des traits qui décrivent une entité dans l'environnement. Entité ici signifie tout objet, situation ou abstraction du monde.

III.3.2.3 Feature in-Feature out (FEI-FEO)

À ce niveau, l'entrée et la sortie du processus de fusion de données sont des caractéristiques. Ainsi, le processus de fusion de données aborde un ensemble de fonctionnalités pour améliorer, affiner ou obtenir de nouvelles fonctionnalités. Ce processus est également connu comme la fusion de caractéristiques, la fusion symbolique, la fusion de l'information ou la fusion de niveau intermédiaire.

III.3.2.4 Feature in-Decision out (FEI-DEO)

Ce niveau permet d'obtenir un ensemble de fonctionnalités en tant qu'entrée et fournit un ensemble de décisions en tant que sortie. La plupart des systèmes de classification qui nécessitent une décision fondée sur les entrées d'un capteur entrent dans cette catégorie de classification.

III.3.2.5 Decision In-Decision Out (DEI-DEO)

Ce type de classification est également connu sous le nom de fusion de décisions. Il fusionne les décisions d'entrée pour obtenir de nouvelles décisions ou mettre l'accent sur les décisions antérieures. Par rapport à la classification présentée précédemment, cette classification peut être considérée comme une extension de la précédente avec une granularité plus fine où DAI-DAO correspond à fusion bas niveau, FEI-FEO à niveau intermédiaire, DEI-DEO à haut niveau, DAI-FEO et FEI-DEO sont inclus dans la fusion multiniveau.

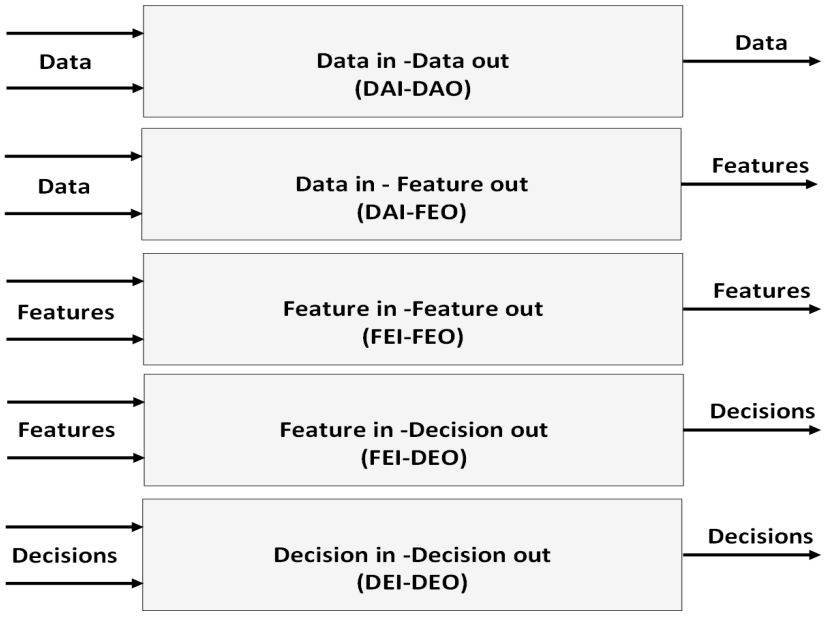


Figure III.3 – Classification de Dasarathy [150]

III.3.3 Classification basée sur les niveaux d'abstraction

Luo et al. [151] utilisent essentiellement quatre niveaux d'abstraction pour classer la fusion de l'information : signal, pixel, caractéristique et symbole.

- Niveau de signal : s'adresse directement aux signaux acquis par les capteurs. La fusion au niveau du signal traite des signaux uniques ou multidimensionnels des capteurs. Elle peut être utilisée en temps réel ou comme étape intermédiaire pour d'autres fusions.

- Niveau de pixel : fonctionne au niveau de l'image et peut être utilisé pour améliorer les tâches de traitement d'image.

- Caractéristique : traite des caractéristiques ou des attributs extraits de signaux ou d'images, comme la vitesse et la forme.

- Symbole : à ce niveau, l'information est représentée comme des symboles ; ce niveau est aussi connu sous le nom de niveau de décision.

En général, les fusions de caractéristiques et de symboles sont utilisées dans les applications de reconnaissance d'objets. Cette classification présente certains inconvénients et ne convient pas à toutes les applications de fusion de données. Premièrement, les images et les signaux sont considérés comme des données brutes et sont habituellement fournis par des capteurs, de sorte qu'ils devraient être inclus dans la même classe. Deuxièmement, les données brutes peuvent ne pas provenir uniquement des capteurs, car les systèmes de fusion de données peuvent également fusionner les données fournies par les bases de données ou l'interaction humaine. Troisièmement, il propose qu'un processus de fusion ne puisse pas s'appliquer à tous les niveaux en même temps [152].

Autres classifications possibles fondées sur la fusion de données sur les niveaux d'abstraction sont les suivants [150] :

- Fusion à bas niveau : les données brutes sont directement fournies comme entrée dans le processus de fusion de données, qui fournissent des données plus précises (un rapport signal-bruit plus faible) que les sources individuelles. Dans [153], un exemple de fusion de faible niveau est donné en appliquant un filtre de moyenne mobile pour estimer bruit ambiant et déterminer si le canal de communication est clair.

- Fusion de niveau moyen : Les caractéristiques et les attributs d'une entité sont fusionnés pour obtenir une carte de caractéristiques qui peut être utilisée pour d'autres tâches. Il est également connu sous le nom de fusion de niveau caractéristique/attribut.

- Fusion de haut niveau : Il est connu comme symbole ou niveau de décision. Il prend des décisions ou des représentations symboliques comme entrée et les combine pour obtenir une décision plus confiante et/ou globale. Un exemple de fusion de haut niveau est l'approche bayésienne pour la détection d'événements binaires proposée par Krishnamachari en [154] qui détecte et corrige les défauts de mesure.

- Fusion à plusieurs niveaux : Le processus de fusion comprend des données de différents niveaux d'abstraction et les entrées et les sorties de fusion peuvent être de n'importe quel niveau. Par exemple, une mesure est fusionnée avec une fonction permettant de prendre une décision.

III.4 Modèle de fusion de données

De nombreux modèles ont été introduits pour servir de lignes directrices à la conception de systèmes de fusion de données. Ces modèles sont utiles pour guider la spécification, la proposition et l'utilisation de la fusion de données dans plusieurs domaines. Certains de ces modèles, comme le JDL et Frankel-Bedworth, fournissent une vue systémique de la fusion des données, tandis que d'autres, comme le cycle intelligent et la boucle de contrôle de Boyd, fournissent une vue de la tâche de la fusion des données [152].

III.4.1 Modèles fondés sur les données

Les modèles proposés pour concevoir des systèmes de fusion de données peuvent être centrés sur l'abstraction des données générées pendant la fusion. Cette section présente les modèles qui spécifient leurs étapes en fonction des niveaux d'abstraction des données manipulées par le système de fusion [155].

III.4.1.1 Modèle JDL

Il est le modèle conceptuel le plus populaire dans la communauté de la fusion des données. Il a été proposé à l'origine par JDL et le Département américain de la Défense (US.DoD) [135]. Ces organisations ont classé le processus de fusion de données en cinq niveaux de traitement, une base de données connexe et un bus d'information qui relie les cinq composantes (Figure III.4). Les cinq niveaux pourraient être regroupés en deux groupes, celui de la fusion à faible niveau et celui de la fusion à haut niveau, qui comprennent les éléments suivants [150] :

- Sources : les sources sont chargées de fournir les données d'entrée. Différents types de sources peuvent être utilisés, comme les capteurs, l'information a priori (références ou données géographiques), les bases de données et les intrants humains.

- Système de gestion des bases de données : Il stocke les informations fournies et les résultats fusionnés. Ce système est un élément essentiel en raison de la grande quantité d'information très diversifiée qui est stockée.

- Interaction Homme-Machine (IHM) : IHM est une interface qui permet aux opérateurs d'entrer dans le système et produit des extrants aux opérateurs. IHM comprend les requêtes, les commandes et l'information sur les résultats obtenus et les alarmes.

Les cinq niveaux de traitement des données sont définis comme suit :

- Niveau 0 (prétraitement de la source) : le prétraitement à la source est le niveau le plus bas du processus de fusion des données ; il inclut la fusion au niveau du signal et des pixels. Ce niveau vise à réduire la charge de traitement en attribuant les données aux processus et sélection des sources appropriées.

- Niveau 1 (amélioration de l'objet) : le raffinement d'objet utilise les données traitées du niveau précédent. Les procédures courantes de ce niveau comprennent l'alignement spatio-temporel, l'association, la corrélation, les techniques de regroupement, l'estimation de l'état, l'élimination des faux positifs, la fusion de l'identité et la combinaison des caractéristiques extraites des images. Les résultats de sortie de cette étape sont la discrimination objet (classification et identification) et le suivi objet (état de l'objet et orientation). Cette étape transforme l'information d'entrée en structures de données cohérentes.

- Niveau 2 (amélioration de la situation) : ce niveau se concentre sur un niveau d'inférence plus élevé que le niveau 1. Il tente de fournir une description contextuelle de la relation entre les objets et les événements observés. Il utilise des connaissances antérieures et des données environnementales pour identifier une situation. Le but de ce niveau est d'effectuer des inférences de haut niveau et de déterminer les activités et les événements importants (tendances en général). Le résultat est un ensemble d'inférences de haut niveau.

- Niveau 3 (amélioration de la menace) : ce niveau évalue l'impact des activités détectées au niveau 2 pour obtenir une perspective appropriée. La situation actuelle est évaluée et une projection est réalisée pour identifier les risques possibles, les vulnérabilités et les opportunités opérationnelles. Ce niveau comprend :(1) une évaluation du risque ou de la menace, et (2) une prévision du résultat logique.

- Niveau 4 (perfectionnement du processus) : ce niveau améliore le processus du niveau 0 au niveau 3 et assure la gestion des ressources et des capteurs. L'objectif est d'assurer une gestion efficace des ressources tout en tenant compte des tâches les priorités, le calendrier et le contrôle des ressources disponible.

III.4.1.2 Modèle de Dasarathy (DFD)

Le modèle Dasarathy [149] est un modèle à grain fin centré sur les données dans lequel les éléments de fusion de données sont spécifiés en fonction de leurs entrées et de leurs sorties. Il est également

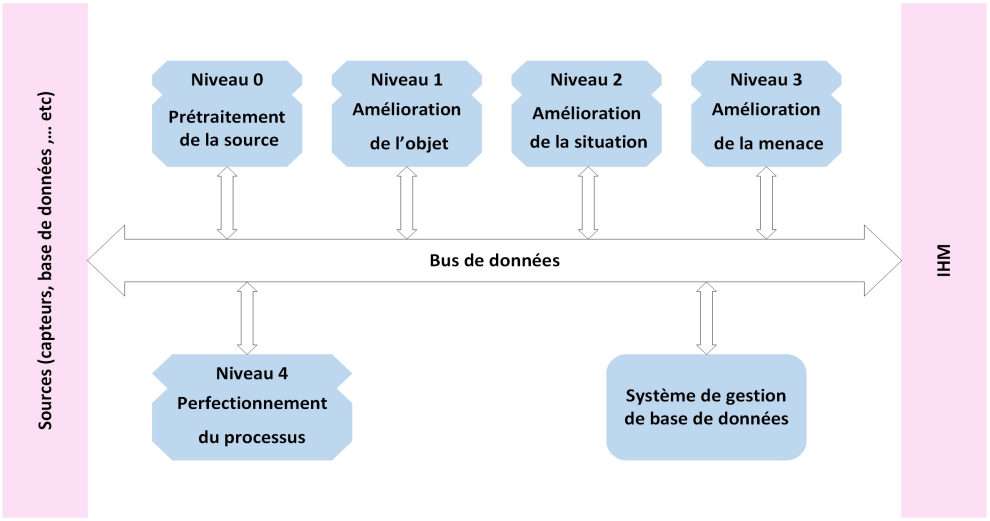


FIGURE III.4 – Modèle JDL [148]

connu sous le nom de modèle de DFD (Data-Feature-Decision). La figure III.5 illustre le modèle DFD.
L'entrée principale correspond au données brutes et la sortie correspond à la décision. Les composants responsables des différentes étapes de fusion sont les éléments DAI-DAO, DAI-FEO, FEIFEO, FEI-DEO et DEI-DEO, décrits ci-dessus. Le modèle DFD réussit à spécifier les principaux types de fusion concernant leurs données d'entrée et de sortie. Pour cette raison, il est également utilisé pour classer la fusion de données. Contrairement au modèle JDL, le DFD ne fournit pas une vue systémique ; au lieu de cela, il fournit une façon fine de spécifier les tâches de fusion au moyen des données d'entrée et de sortie attendues.
Sur la figure III.5 un mécanisme donné est représenté par une flèche et un acronyme. Par exemple DAI-FEO désignant un mécanisme de fusion acceptant des données du niveau données en entrée et fournissant des prémisses ou fonctionnalité (FEATURE) en sortie. Cette façon de voir est largement utilisée dans le domaine du traitement d'images et de la reconnaissance des formes. Un point important est que le type des flots est clairement identifié à partir de leur sémantique, ce qui rajoute une dimension essentielle par rapport au modèle JDL. Il est alors possible de faire apparaître un mécanisme de régulation qui contrôle les niveaux inférieurs à partir de décisions partielles des niveaux supérieurs tels qu'il est représenté par les flèches descendantes [156].

Les modèles basés sur l'information représentent la première génération de modèles pour la fusion de l'information, qui se concentre sur le niveau d'abstraction des informations traitées par les tâches de fusion. En général, une limitation de ces modèles est qu'ils ne spécifient pas la séquence d'exécution des tâches de fusion. Historiquement, le modèle JDL représente le premier effort sérieux pour fournir un modèle détaillé et une terminologie commune pour le domaine de la fusion.

Le modèle DFD est peut-être le plus représentatif de ces modèles. C'est un modèle à grain fin qui rend explicite le niveau d'abstraction des informations d'entrée et de sortie de chaque tâche de fusion. Le modèle DFD diffère du JDL par la terminologie adoptée et par l'approche utilisée dans le modèle. Le JDL est orientée vers les applications militaires et les tâches de fusion identifiées dans le modèle reflètent les particularités d'un tel domaine d'application. D'autre part, le modèle DFD est orienté vers l'entrée et la sortie d'une tâche de fusion, quel que soit le domaine d'application. Par conséquent, les blocs fonctionnels spécifiés sont purement axés sur le domaine de fusion, quelle que soit l'application.

III.4.2 Modèles fondés sur l'activité

Certains modèles sont spécifiés en fonction des activités qui doivent être effectuées par le système de fusion des données. Les activités et leur séquence d'exécution correcte, dans de tels modèles, sont explicitement spécifiées.

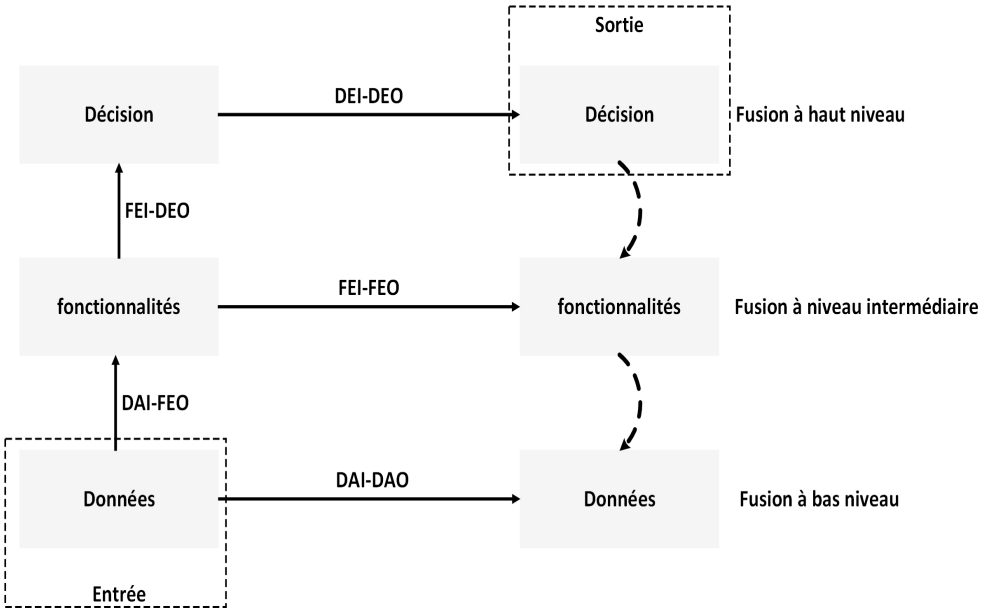


Figure III.5 – Modèle de Dasarathy (DFD) [149]

III.4.2.1 Boucle de contrôle Boyd (Modèle Boyd)

Le modèle Boyd est un modèle cyclique composé de quatre étapes. Il est également connu sous le nom de : OODA (Observe, Orient, Decide, Act) boucle [157].
Ce modèle est une représentation du mécanisme classique d'aide à la décision des systèmes de données militaires, et parce que ces systèmes sont fortement couplés avec des systèmes de fusion, la boucle OODA a été utilisée pour concevoir des systèmes de fusion de données. Les étapes de la boucle OODA définissent les principales activités liées au processus de fusion, comme le montre la figure III.6, qui sont les suivantes :

- Observer : Collecte de données à partir des sources disponibles. Elle correspond au niveau 0 du modèle JDL.
- Orienter : Les données recueillies sont fusionnées pour obtenir une interprétation du courant situation. Elle englobe les niveaux 1, 2 et 3 du modèle JDL.
- Décider : précisez un plan d'action en réponse à la compréhension de la situation. Il correspond au niveau 4 du modèle JDL.
- Action : Le plan est exécuté. Il n'est pas traité par le modèle JDL.

La boucle OODA est un modèle large qui permet la spécification et la visualisation des tâches du système d'une manière ample. Il permet la modélisation des principales tâches d'un système.
L'OODA ne fournit pas une représentation adéquate des tâches spécifiques d'un système de fusion de données.

III.4.2.2 Cycle du renseignement

Le processus du renseignement est un cycle en quatre étapes, appelé cycle du renseignement [158]. La figure III.7 montre le processus d'élaboration de données brutes en renseignements finis utilisés dans la prise de décisions et l'action. Les activités du cycle du renseignement sont les suivantes :

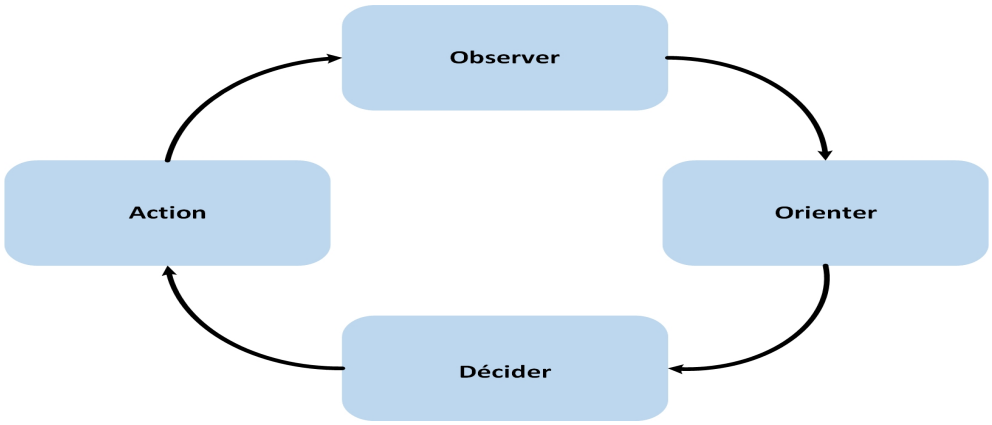


FIGURE III.6 – Boucle OODA [157]

- Collection : Les données brutes sont recueillies dans l'environnement. Elles correspondent au niveau 0 du modèle JDL.
- Collation : Les données recueillies sont comparées, analysées et corrélées. Les données non pertinentes et non fiables sont éliminées. Comprends le niveau 1 du modèle JDL.
- Évaluation : Les données recueillies sont fusionnées et analysées. Elles comprennent les niveaux 2 et 3 du modèle JDL.
- Diffusion : Les résultats de la fusion sont transmis aux utilisateurs qui utilisent les données fusionnées pour produire des décisions et des actions en réponse à la situation détectée. Il correspond au niveau 4 du modèle JDL.

Le cycle du renseignement ne rend pas explicites les phases de planification (décision) et d'exécution (loi), qui sont probablement incluses dans les phases d'évaluation et de diffusion. L'OODA et le cycle du renseignement sont généraux et peuvent être utilisés dans n'importe quel domaine d'application. Ils ne remplissent pas les aspects spécifiques du domaine de la fusion exigeant, donc, l'expérience et l'expertise pour modéliser des tâches de fusion fine.

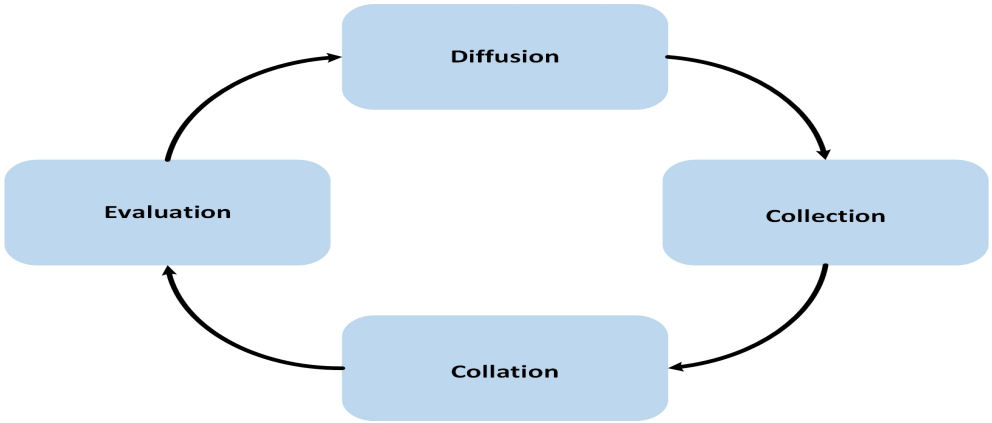


FIGURE III.7 – Cycle du renseignement [158]

III.4.2.3 Modèle Omnibus

Le modèle Omnibus organise les étapes d'un système de fusion de données dans une séquence cyclique, tout comme le cycle de renseignement et la boucle OODA [159]. Le modèle Omnibus devrait être appliqué pendant la phase de conception d'un système de fusion de données. Dans un premier

temps, il devrait servir à modéliser le cadre en fournissant une perception générale du système. Ensuite, le modèle peut être utilisé pour concevoir les sous-tâches, fournissant une compréhension fine du système. La figure III.8 montre le modèle Omnibus. Le modèle Omnibus a été proposé à l'origine pour traiter les données recueillies par les capteurs. Certaines modifications peuvent être suggérées pour la rendre plus large et adaptées à d'autres systèmes de fusion de données telles que :

- La détection et le traitement des signaux peuvent être remplacés par la collection et le prétraitement des données.
- La fusion des données du capteur doit être indiquée comme fusion des données brutes.
- Au lieu de la gestion des capteurs, nous devrions adopter la gestion des sources.

De cette façon, le modèle Omnibus sera adapté aux systèmes de fusion de données qui traitent toutes sortes de sources, y compris les capteurs.

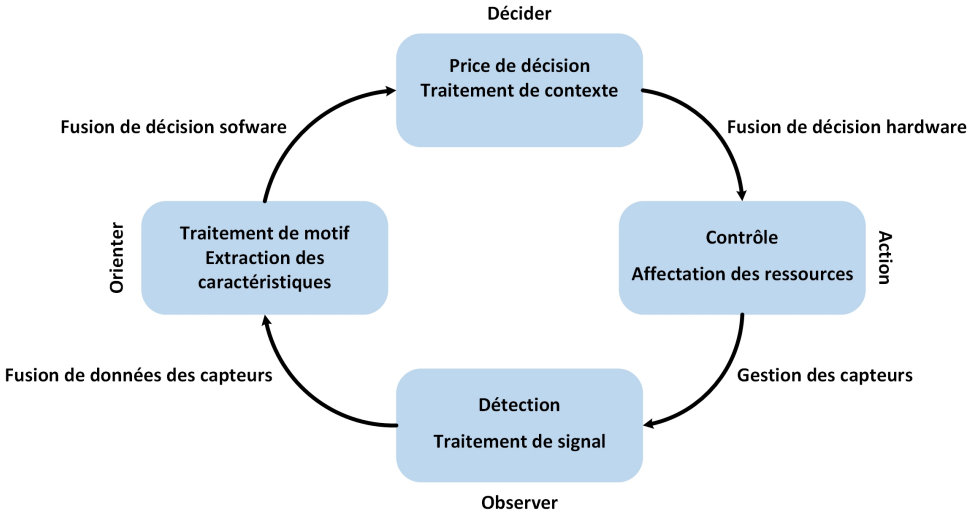


FIGURE III.8 – Modèle Omnibus [159]

Les deux premiers modèles fondés sur l'activité (OODA et cycle de renseignement) sont généraux et peuvent être utilisés dans n'importe quel domaine d'application. En conséquence, ils ne remplissent pas les aspects spécifiques du domaine de la fusion exigeant, ainsi, l'expérience et l'expertise pour modéliser les tâches de fusion à grain fin. Le dernier représentant le plus évolué, le modèle Omnibus, n'est pas vraiment un nouveau modèle. En fait, c'est le modèle OODA avec une structure à grain fin en ce qui concerne le domaine de la fusion. Il détaille les activités de l'OODA en précisant les tâches de fusion qui doivent être exécutées à chaque étape. Les activités identifiées sont similaires à celles fournies par le modèle de Waterfall de telle sorte que le modèle Omnibus semble être une intégration des deux modèles, Waterfall et OODA.

III.4.3 Modèle axé sur les rôles

Le modèle fondé sur les rôles représente un changement d'orientation sur la façon dont les systèmes de fusion de données peuvent être modélisés et conçus. Les systèmes de fusion de données sont spécifiés sur la base des rôles de fusion et des relations entre eux, fournissant un modèle plus fin pour le système de fusion. Les deux membres de cette génération sont le modèle orienté objet et l'architecture de Frankel-Bedworth [160]. Le modèle axé sur les rôles fournit une vue systémique de la fusion des données comme le modèle JDL. Toutefois, il ne précise pas les tâches ou les activités de fusion. Il fournit plutôt un ensemble de rôles et précise les relations entre eux.

III.4.3.1 Modèle orienté objet

Kokar [161] a proposé un modèle orienté objet pour les systèmes de fusion de données. La figure III.9 est une simplification du modèle orienté objet dans lequel quatre rôles sont identifiés :

- Acteur : Il est responsable de l'interaction avec le monde, la collection de données et de l'action sur l'environnement.
- Percepteur (Observateur) : Après la collection des données, le percepteur (l'observateur) évalue ces données en fournissant une analyse contextuelle au directeur.
- Directeur : Le directeur élabore un plan d'action précisant les objectifs du système, sur la base de l'analyse fournie par le percepteur.
- Manager : Il contrôle les acteurs pour exécuter les plans formulés par le directeur.

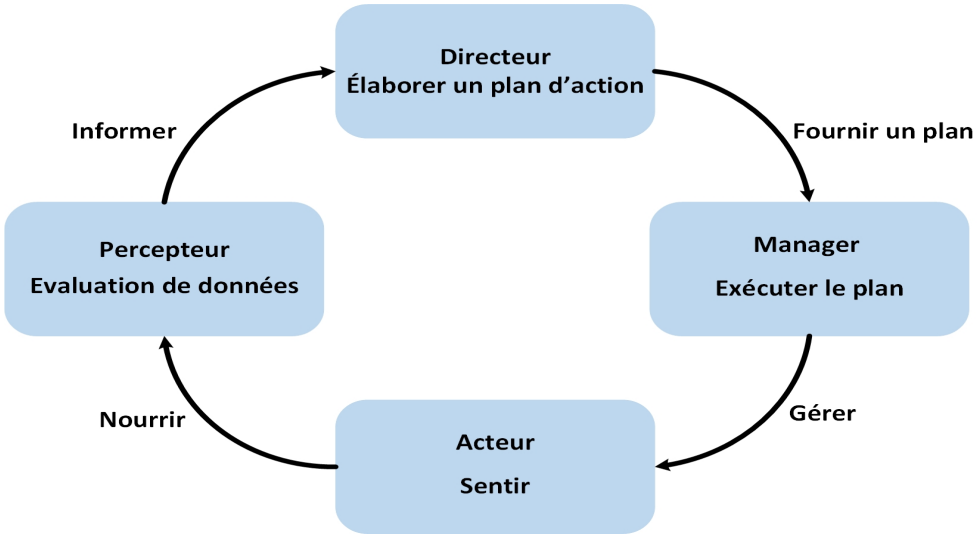


FIGURE III.9 – Modèle orienté objet [161]

III.4.3.2 Architecture de Frankel-Bedworth

Frankel [160] décrit une architecture de fusion humaine composée de deux processus d'autorégulation :

- Local : Le processus d'estimation local gère l'exécution des activités en cours en fonction des objectifs et des calendriers fournis par le processus global.
- Global : Le processus global met à jour les objectifs et les calendriers en fonction des retours fournis par le processus local.

La figure III.10 montre l'architecture Frankel-Bedworth. Les processus locaux et globaux ont des objectifs différents et, par conséquent, des rôles différents. Le processus local tente d'atteindre les objectifs spécifiés et de maintenir les normes spécifiées. Ainsi, le processus local a le rôle d'estimateur, qui est similaire aux modèles de fusion précédents et comprend les tâches suivantes :

- Sentir : l'information brute est recueillie par les sources d'information.
- Percevoir : Les stimulus récupérés par la détection sont traités en fonction de leur pertinence (mise au point), et le contrôleur est informé des stimulus utilisés (conscience).

- Diriger : Selon la compréhension de la perception (sémantique), l'estimateur peut fournir une rétroaction (alerte) au contrôleur. La disparité entre la situation actuelle et la situation souhaitée est évaluée. Ensuite, l'estimateur est alimenté par des désirs qui précisent de nouveaux objectifs et calendriers.

- Gérer : En fonction des objectifs, le contrôleur est activé pour définir ce qui est pratique afin que l'estimateur puisse fournir une réponse appropriée. Ensuite, l'estimateur fournit une rétroaction au contrôleur en signalant les attentes au sujet de la décision (sensibilité).

- Effet : Les décisions sélectionnées (réactions) sont appliquées, et la boucle de contrôle est fermée en détectant les changements dans l'environnement.

Le processus de contrôle global gère les objectifs et les performances du système pendant l'exécution du processus local. Ainsi, le processus global a le rôle de contrôleur, qui est responsable du contrôle et de la gestion du rôle d'estimateur. Il comprend les tâches suivantes :

- Orienter : L'importance ou la pertinence des stimulis détectés est configurée.

- Préférer : La priorité est accordée aux aspects qui sont les plus pertinents pour le comportement d'atteinte des buts, détaillant les objectifs locaux (désirs).

- Prévoir : Des prédictions sont faites et les objectifs intentionnels sont filtrés, déterminant ce qui est pratique pour l'estimateur pragmatique.

L'architecture Frankel-Bedworth introduit la notion de processus global séparé du processus local. Le processus de contrôle global régit le processus local en surveillant ses performances et en contrôlant ses objectifs. De plus, le processus local est censé exécuter et mettre en œuvre des méthodes de fusion et des algorithmes pour atteindre les objectifs du système. Cette architecture élargit les modèles précédents qui ne concernaient que les aspects de processus locaux.

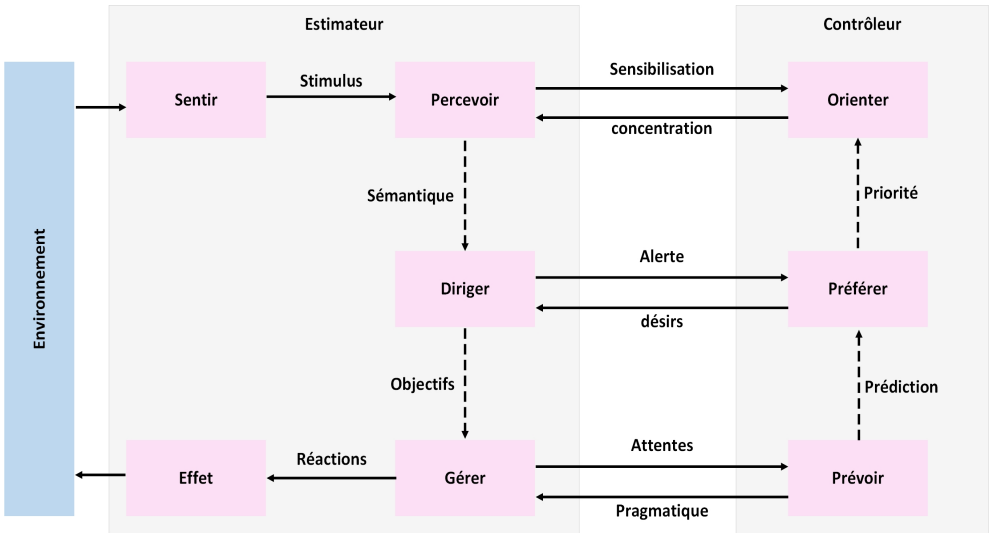


Figure III.10 – Architecture de Frankel-Bedworth [160]

Les modèles basés sur les rôles sont des modèles à grain fin qui précisent les acteurs et leurs rôles dans la tâche de fusion. Ces modèles représentent le niveau de maturité évolué dans le domaine de la fusion. Bien que ces modèles fournissent une meilleure compréhension de la tâche de fusion, ils ne tiennent pas explicitement compte des particularités des RCSF (de même que les modèles fondés sur l'information et les activités).

III.5 Architectures de fusion de données

Le processus fusion de données multi capteurs (FDMC), tel que décrit ci-dessus, implique l'intégration de capteurs, le prétraitement des données, l'estimation et un niveau plus élevé de traitement et de prise de décision. Il exige un agencement précis des capteurs et des systèmes d'acquisition de données de capteurs ainsi que des aspects de traitement des signaux qui sont à leur tour dictés par les architectures de fusion. Principalement, il existe trois types de l'architecture [162]–[164] :

III.5.1 Fusion centralisée

Dans une architecture centralisée, le nœud de fusion réside dans le processeur central qui reçoit l'information de toutes les sources d'entrée. Par conséquent, tous les processus de fusion sont exécutés dans un processeur central qui utilise les mesures brutes fournies à partir des sources. Dans ce schéma (Figure III.11.a), les sources n'obtiennent que les mesures d'observation et les transmettent à un processeur central, où le processus de fusion des données est exécuté. Si nous supposons que l'alignement et l'association des données sont effectués correctement et que le temps nécessaire pour transférer les données n'est pas significatif, alors le schéma centralisé est théoriquement optimal. Toutefois, les hypothèses précédentes généralement ne tiennent pas pour les systèmes réels. De plus, la large bande passante requise pour envoyer des données brutes par le réseau est un autre inconvénient de l'approche centralisée. Ce problème devient un goulot d'étranglement lorsque ce type d'architecture est utilisé pour la fusion de données dans les réseaux de capteurs visuels [150].

III.5.2 Fusion décentralisée (distribuée)

La fusion distribuée (Figure III.11.b) est principalement utilisée pour des capteurs différents (capteurs avec différents cadres d'observation) c.-à-d. infrarouge et radar ; cependant, elle peut encore être utilisé pour des types similaires de capteurs. Dans cette architecture, les données d'observation de chaque capteur sont traitées par un filtre de Kalman individuel, filtre de Kalman étendu, ou filtre d'information racine carrée à chaque nœud. La piste locale, constituée du vecteur d'état estimé et de la matrice de covariance de chaque filtre, est utilisée comme entrée dans le processus de fusion état-vecteur, et la sortie est le vecteur d'état fusionné et sa matrice de covariance (fusionnée). L'information est traitée localement à chaque nœud ; il n'y a pas de fusion centrale à ce niveau. Cette architecture est utile pour les grandes structures flexibles et intelligentes, la surveillance de la santé, des avions ou des engins spatiaux, les énormes usines automatisées, et les industries chimiques. C'est ce qu'on appelle aussi la fusion des estimations dans les applications de suivi des cibles.

III.5.3 Fusion hiérarchique (hybride)

La fusion hybride, comme le montre la figure III.11.c, implique à la fois des schémas de fusion centralisée et répartie, basés sur la disposition des configurations de capteurs. Pendant les opérations ordinaires, la fusion distribuée est utilisée pour réduire la charge de travail informatique et les exigences de communication ; cependant, dans des circonstances particulières, comme lorsque plus de précision est souhaitable ou l'environnement de suivi est dense, la fusion centralisée peut être utilisée. Alternativement, sur la base des capteurs disponibles, une combinaison des deux régimes peut être utilisée pour obtenir l'état fusionné d'une cible d'intérêt particulier.

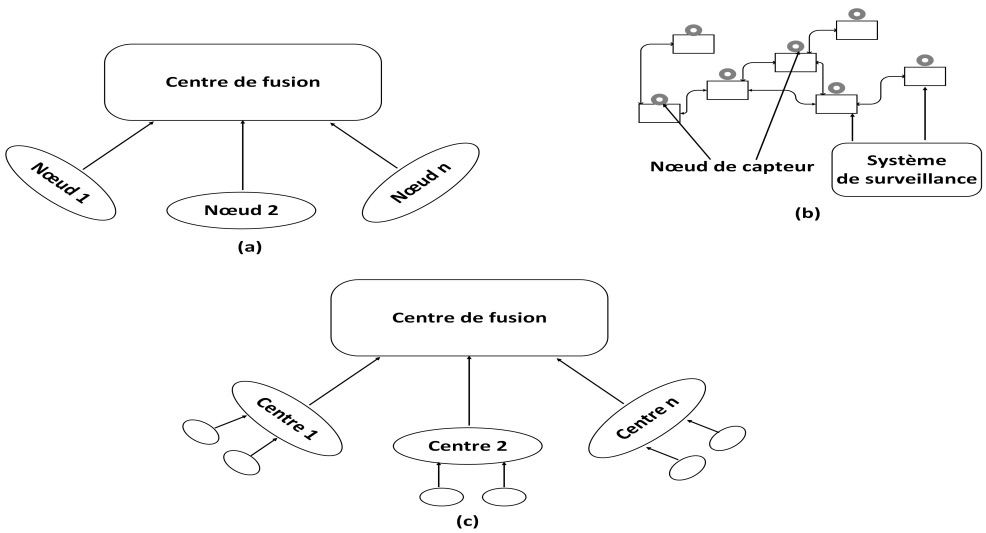


Figure III.11 – Architectures de fusion de données : (a) traitement centralisé dans le centre de fusion ; (b) traitement décentralisé à chaque unité de traitement de nœud ; (c) traitement hiérarchique [165]

III.6 Techniques et méthodes de fusion de données

Les techniques de fusion de données disponibles peuvent être classées en trois catégories non exclusives [150] : (1) association de données ; (2) estimation de l'état et (3) fusion décisionnelle.

III.6.1 Techniques d'association de données

Le but de l'association de données est d'établir l'ensemble d'observations ou de mesures qui sont générées par la même cible au fil du temps. L'association des données est souvent effectuée avant l'estimation de l'état des cibles détectées. De plus, il s'agit d'une étape clé parce que l'estimation ou la classification se comportera incorrectement si la phase d'association ne fonctionne pas de manière cohérente. Le processus d'association de données pourrait également apparaître dans tous les niveaux de fusion, mais la granularité varie selon l'objectif de chaque niveau. Les techniques les plus couramment utilisées pour résoudre le problème d'association de données sont :

III.6.1.1 K- Plus proches voisins (K-NN)

K-NN est la technique d'association et classification de données la plus simple. K-NN mesure la distance entre les observations non marquées et les échantillons d'entraînement pour déduire à quelle classe ils appartiennent. L'observation sans étiquette est attribuée à l'étiquette de ses voisins les plus proches où k est le nombre d'observations de formation à prendre en compte. Les mesures de distance incluent la distance euclidienne et Manhattan. K-NN a été largement utilisé et publié dans la littérature pour les applications de classification [166]–[173].

III.6.1.2 K-Moyennes

La méthode K-Moyennes [175] est une modification bien connue de l'algorithme K-NN. Elle vise à classer les données en fonction de la distance d'un point de données au centroïde moyen de chaque grappe. Elle divise les valeurs de l'ensemble de données en K grappes différentes. L'algorithme K-Moyenne trouve la meilleure localisation de la grappe centroïdes, où le meilleur signifie un centroïde qui est au centre de la grappe de données.

III.6.1.3 Machine à vecteurs de support (SVM)

SVM a été largement utilisé pour la classification de l'activité humaine [167],[172],[175]–[180] et peuvent être utilisées pour des problèmes de classification linéaire et non linéaire. SVM est un classificateur binaire trouvant la séparation entre deux classes. Les données sont cartographiées dans un espace de grande dimension en utilisant une fonction du noyau (comme une fonction gaussienne, sigmoïde ou radiale).

III.6.1.4 Association de données probabiliste (PDA)

L'algorithme d'association de données probabilistes PDA a été proposé par Bar-Shalom et Tse [181] est également connu comme le filtre modifié de tous les voisins. Cet algorithme attribue une probabilité d'association à chaque hypothèse à partir d'une mesure valide d'une cible. Une mesure valide fait référence à l'observation qui tombe à la grille de validation de la cible à ce moment précis. La grille de validation est le centre autour des mesures prévues de la cible, est utilisée pour sélectionner l'ensemble des mesures de base. Dans l'algorithme PDA, l'estimation de l'état de la cible est calculée comme une somme pondérée de l'état estimé sous toutes les hypothèses. L'algorithme peut associer différentes mesures à une cible spécifique. PDA utilisé dans de nombreux projets de suivi [182]–[184] .

III.6.2 Méthodes d'estimation de l'état

Les méthodes d'estimation ont été héritées de la théorie du contrôle et utilisent les lois de probabilité pour calculer un vecteur d'état de procédé à partir d'un vecteur de mesure ou d'une séquence de vecteurs de mesure [185].

Dans cette section, nous présentons les méthodes d'estimation les plus connues comme : filtre de Kalman et maximum de vraisemblance.

III.6.2.1 Filtre de Kalman

Le filtre de Kalman est une méthode de fusion très populaire. Il a été proposé à l'origine en 1960 par Kalman [186] et il a été abondamment étudié depuis [187]–[189]. Le filtre de Kalman est utilisé pour fusionner les données de bas niveau. C'est un estimateur récursif qui estime les états du système à partir des mesures bruitées tout en minimisant l'erreur quadratique moyenne. Il est utilisé dans une large gamme de domaines : poursuite de trajectoire et suivi d'objets [190]–[193], navigation [194]–[197].

III.6.2.2 Maximum de vraisemblance

Les méthodes d'estimation fondées sur la vraisemblance conviennent lorsque l'état estimé n'est pas le résultat d'une variable aléatoire [198]. Cette méthode est couramment utilisée pour résoudre les problèmes de découverte d'emplacement. Dans ce contexte, la méthode est souvent utilisée pour obtenir des estimations de distance (direction, angle) précises qui sont utilisées pour calculer l'emplacement des nœuds [199][200] ou sources (cibles)[201]–[204].

D'autres méthodes pourront être utilisées pour l'estimation de l'état : L'estimateur du maximum a posteriori (MAP) [205][206], moindres carrés [143][207] , filtre à moyenne mobile [208]–[210] et filtre particulaire [211]–[214].

III.6.3 Méthodes de décision

Les méthodes d'inférence sont souvent appliquées dans la fusion des décisions. Dans ce cas, une décision est prise en fonction de la connaissance de la situation perçue. Ces techniques visent à faire une inférence de haut niveau sur les événements et les activités qui sont produits à partir des cibles détectées. Les méthodes d'inférence classiques sont basées sur l'inférence bayésienne et la théorie

de l'accumulation de la croyance de Dempster-Shafer. D'autres méthodes d'inférence basées sur l'intelligence artificielle comme logique floue et réseaux de neurones sont décrites dans cette section.

III.6.3.1 Inférence bayésienne

Fusion de l'information basée sur le l'inférence bayésienne fournit un formalisme pour combiner des preuves selon les règles de la théorie des probabilités. L'incertitude est représentée en termes de probabilités conditionnelles décrivant la croyance, et elle peut supposer des valeurs dans l'intervalle [0, 1], où zéro indique un manque total de croyance et un indique une croyance absolue. L'inférence bayésienne est fondée sur la règle plutôt ancienne de Bayes [215].

$$P(Y|X) = \frac{P(X|Y) * P(Y)}{P(X)} \tag{III.1}$$

Où la probabilité postérieure, P (Y | X), représente la croyance dans l'hypothèse Y compte tenu de l'information X. Cette probabilité est obtenue en multipliant la probabilité a priori de l'hypothèse (P(Y)) par la probabilité d'avoir X étant donné que Y est vrai (P(X | Y)).

Hall et Llinas [216] ont décrit les problèmes associés à l'inférence bayésienne suivante :

- Difficulté à établir la valeur des probabilités a priori.
- Complexité lorsqu'il y a de multiples hypothèses possibles et un nombre important d'événements qui dépendent des conditions.
- L'hypothèse devrait être mutuellement exclusive.
- Difficulté à décrire l'incertitude des décisions.

III.6.3.2 Inférence de Dempster-Shafer

Il est basé sur l'accumulation de croyance Dempster-Shafer, qui est une théorie mathématique introduite par Dempster [217] et Shafer [218], qui généralise la théorie bayésienne. Il traite des croyances ou des fonctions de masse, tout comme la règle de Bayes traite des probabilités. La théorie de Dempster-Shafer fournit un formalisme qui peut être utilisé pour la représentation incomplète des connaissances, les mises à jour des croyances et la combinaison de données probantes [219].Selon Luo et Kay [187] , l'utilisation de la théorie de Dempster-Shafer pour la fusion sensorielle a été introduite en 1981 par Garvey et al. [220]. La théorie de Dempster-Shafer est plus souple que l'inférence bayésienne, car elle permet à chaque source de fournir des informations avec différents niveaux de détail [154].

III.6.3.3 Logique floue ou théorie des ensembles floue

La logique floue généralise la probabilité [221], et est donc capable de traiter le raisonnement approximatif pour tirer des conclusions (décision) [222]. Cette structure a été utilisée avec succès dans des situations réelles qui défient la modélisation exacte et le contrôle complexe.

La logique floue fera l'objet de plus d'explications dans le quatrième chapitre.

III.6.3.4 Réseaux de neurones

Selon Bonissone [223], les réseaux de neurones ont été créés au début des années 1960 avec Rosenblatt [224] et Widrow et Hoff [225]. Les réseaux de neurones représentent une alternative aux théories bayésiennes et de Dempster-Shafer, utilisés par les tâches de classification et de reconnaissance dans le domaine de la fusion de l'information. Une caractéristique clé des réseaux de neurones est la capacité d'apprendre à partir d'exemples de paires entrées/sorties (apprentissage

supervisé). Les réseaux de neurones ont été appliqués à la fusion de l'information principalement pour la reconnaissance automatique des cibles à l'aide de plusieurs capteurs complémentaires [187], [226]–[229]. Les réseaux de neurones pour la fusion de l'information peuvent également être utilisés dans d'autres applications. Lewis et Powers [230] utilisent les réseaux de neurones pour fusionner l'information audiovisuelle pour la reconnaissance vocale. Cimander et al. [231] utilisent une méthode de fusion en deux étapes qui fonctionne sur des signaux provenant de bioréacteurs (température, pH et oxygène) pour contrôler le processus de fermentation du yogourt. Yiyao et al. [232] proposent un schéma de fusion pour fusionner des cartes de bord à partir d'images de capteurs multispectraux acquises à partir de radars, de capteurs optiques et de capteurs infrarouges. Luyang et al. [233] proposent une approche de diagnostic des défaillances basée sur la fusion de données multi-capteurs par l'utilisation de réseaux neuronaux convolutionnels profonds.

III.7 Conclusion

Ce chapitre présent le contexte nécessaire pour répondre à certaines questions sur la fusion de données, tels que : (1) Qu'est-ce que la fusion de données ? (2) Pourquoi un utilisateur devrait-il l'utiliser ? (3) Quelles sont les techniques disponibles ? (4) Comment l'utilisateur devrait-il utiliser de telles techniques ?
En mots simples, les réponses sont :
(1) La fusion de données est l'ensemble des techniques utilisées pour combiner les informations issues de plusieurs sources.
(2) La fusion de données devrait être utilisée pour améliorer l'exécution d'une tâche en comprenant la situation actuelle et en appuyant les décisions.
(3) Plusieurs techniques sont disponibles (ça dépend du type de problème et des hypothèses établies pour chaque technique).
(4) L'utilisation des techniques de fusion devrait être guidée par des architectures et des modèles.

Dans le chapitre suivant, nous présentons les différents outils hardware et software utilisés pour la mise en place d'un système de fusion de données appliqué dans le cadre de notre travail de recherche dans le but de supervise et contrôler un environnement agricole.

Chapitre IV

Outils hardware et software

IV.1 Introduction

La réalisation de notre système de contrôle et surveillance d'un environnement agricole nécessite plusieurs outils software et hardware.

Dans ce chapitre, on va aborder en détail ces outils. Notre système est divisé en cinq parties principales : l'unité de traitement, l'algorithme de fusion et contrôle, le système de surveillance à base d'IdO, le système de communication et la base de données.

IV.2 Hardwares utilisés

IV.2.1 Unité de traitement

Le Raspberry pi a été choisi comme unité de traitement car il satisfait le mieux le cahier de charge de notre système à développer.

IV.2.1.1 Raspberry pi

Le Raspberry pi est un mini-ordinateur à processeur ARM développé au Royaume-Uni (UK) par la fondation Raspberry pi pour promouvoir l'enseignement de l'informatique de base et pour représenter un moyen d'apprentissage de la programmation en plusieurs langages (python, scratch, etc.) [234]. L'intérêt d'utiliser le Raspberry Pi est sa capacité d'interaction avec le monde extérieur et d'exécuter plusieurs variantes du système d'exploitation libre (GNU/Linux, Raspbian, Debian, etc.).

Plusieurs générations de Raspberry pi ont été développées. La première génération est sortie en février 2012 (Raspberry pi B). Les différents modèles sont présentés par la figure IV.1.

IV.2.1.2 Présentation de la carte Raspberry Pi 3 modèle B

Le Raspberry Pi 3 modèle B (Figure IV.2), est un ordinateur miniature en taille, grosso modo, d'une carte de crédit. Il a remplacé le Raspberry Pi 2 Model B en février 2016. Il repose sur un processeur à quadruple cœur ARM Cortex-A53, le BCM2837 de Broadcom, cadencé à 1,2 GHz. Cela signifie qu'il est 50 à 60 % plus rapide que le Raspberry Pi 2 B. La communication par Wi-Fi 802.11n et du Bluetooth 4.1 est intégré.

La figure IV.2 montre les différents composants d'un Raspberry Pi 3 modèle B. Sur un petit bout de carte électronique, il y a un :

- Processeur ARM Cortex A-53 quatre cœurs de 64-bit cadencé à 1,2 Ghz

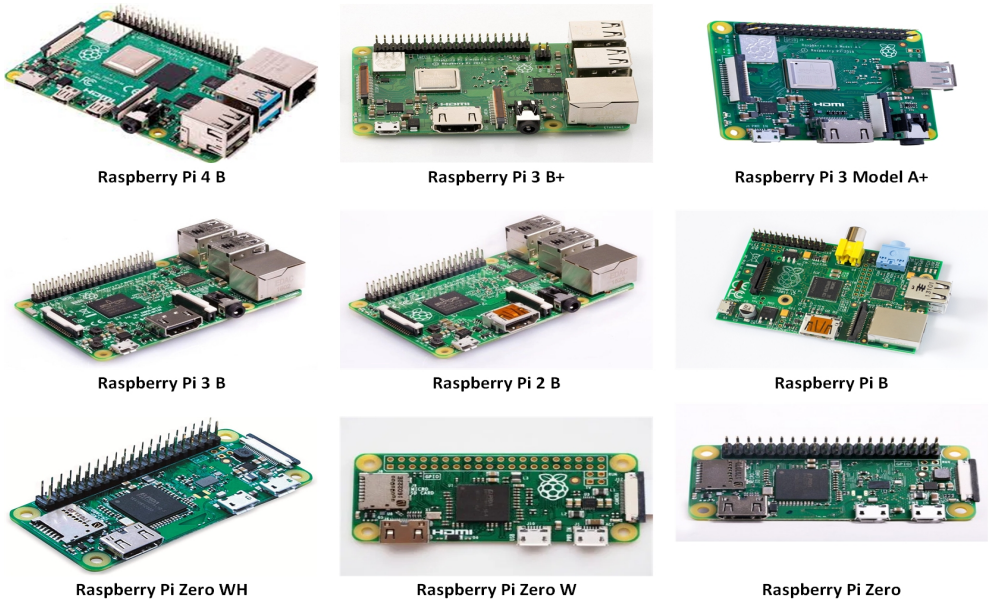


FIGURE IV.1 – Différents modèles de Raspberry Pi

- 1 Go de RAM
- Un contrôleur vidéo Broadcom VideoCore IV
- 4 ports USB 2.0
- Un port HDMI
- Un connecteur Jack 3,5 mm / sortie composite
- Une prise Ethernet 10 / 100 Mbps (Port RJ 45)
- WIFI 802.11n
- Bluetooth 4.1
- Bluetooth Low Energy (BLE)
- 40 pins GPIO
- Une interface de caméra (CSI)
- Une interface d'affichage (DSI)
- Un emplacement de carte micro SD
- Connecteur micro-USB pour alimentation 2,5A.

Un Raspberry Pi3 B contient les connecteurs et les ports suivantes :

- HDMI : « High Definition MultiMedia Interface » permet de relier le Raspberry Pi à un dispositif compatible (écran LCD ou un vidéo projecteur...).
- Port USB 2.0 : le Raspberry pi3 B contient 4 posts USB (un port série) qui sert à connecter le Raspberry aux autres périphériques (clavier, souris, clé USB, caméra Pixy, etc.).

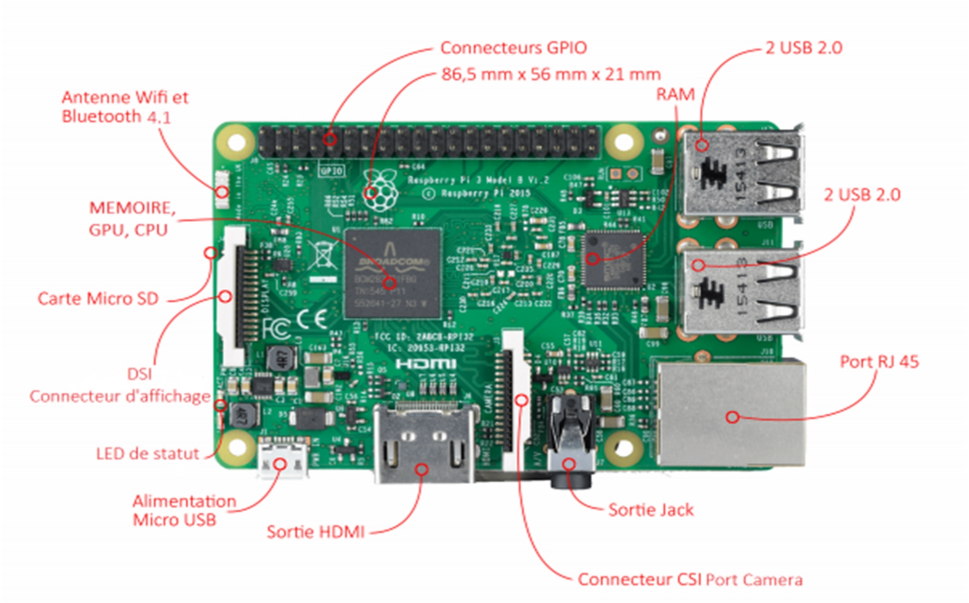


FIGURE IV.2 – Différents composants d'un Raspberry pi 3 B [235]

- Port Ethernet (port RJ45) : pour relier le Raspberry à un routeur ou à une box.
- Un slot les cartes SD : Pour le fonctionnement du Raspberry une carte SD est requis pour héberger le système d'exploitation (Raspbian, Linux, etc.).
- Une prise jack : C'est une connectique audio-vidéos à dimension est égale à 3.5mm.
- Bloc d'alimentation : le Raspberry Pi s'alimente sous tension unique de 5 volts, tension sur laquelle il peut consommer jusqu'à 1.8A selon les tâches qu'il exécute. Cette alimentation doit être normalement fournie via le connecteur micro USB place dans un angle de la carte.
  En effet, l'utilisation d'un chargeur pour Smartphone équipé d'un micro USB qui délivre une tension de 5 volts avec au minimum 1.8A est suffisante pour alimenter le Raspberry Pi.
- GPIO : « General Purpose Input Output » dispose de différents types de connexions.
  Ces broches (Figure IV.3) sont une interface physique entre le Raspberry Pi et le monde extérieur. En les utilisant pour allumer et éteindre des appareils (sorties), ou recevoir des données de capteurs et de commutateurs (entrées). Sur les 40 broches, 26 sont des broches GPIO et les autres sont des broches d'alimentation (+Vcc) ou de terre (GND).

IV.2.2 Communication

Deux modes de commination sont utilisés dans notre projet ; la communication série et la communication radiofréquence (par l'utilisation d'un réseau de capteurs sans fil).

La radiofréquence (RF) est une forme de transmission électromagnétique utilisée dans les communications sans fil. Les signaux RF sont facilement générés, allant de 3kHz à 300GHz. Ceux-ci sont utilisés dans la communication sans fil en raison de leur propriété de pénétrer à travers les objets et de parcourir de longues distances [254].

La communication sans fil a plusieurs avantages, les principaux résidents dans la simpliste de l'installation, l'auto-organisation et le câblage moins réduit, qui réduire considérablement les coûts d'installation et d'entretien dans les grandes zones.

Pin#	NAME		NAME	Pin#
01	3.3v DC Power		DC Power 5v	02
03	GPIO02 (SDA1 , I²C)		DC Power 5v	04
05	GPIO03 (SCL1 , I²C)		Ground	06
07	GPIO04 (GPIO_GCLK)		(TXD0) GPIO14	08
09	Ground		(RXD0) GPIO15	10
11	GPIO17 (GPIO_GEN0)		(GPIO_GEN1) GPIO18	12
13	GPIO27 (GPIO_GEN2)		Ground	14
15	GPIO22 (GPIO_GEN3)		(GPIO_GEN4) GPIO23	16
17	3.3v DC Power		(GPIO_GEN5) GPIO24	18
19	GPIO10 (SPI_MOSI)		Ground	20
21	GPIO09 (SPI_MISO)		(GPIO_GEN6) GPIO25	22
23	GPIO11 (SPI_CLK)		(SPI_CE0_N) GPIO08	24
25	Ground		(SPI_CE1_N) GPIO07	26
27	ID_SD (I²C ID EEPROM)		(I²C ID EEPROM) ID_SC	28
29	GPIO05		Ground	30
31	GPIO06		GPIO12	32
33	GPIO13		Ground	34
35	GPIO19		GPIO16	36
37	GPIO26		GPIO20	38
39	Ground		GPIO21	40

FIGURE IV.3 – Ports GPIO de Raspberry pi 3 B [235]

IV.2.2.1 Réseaux de capteurs sans fils

Un réseau de capteurs sans fil (RCSF) ou en anglais : Wireless Sensor Network (WSN) peut être défini comme un ensemble de dispositifs autonomes (nœuds capteurs) organisé de manière répartie, qui collabore les uns avec les autres pour transférer l'information recueillie à partir d'un champ surveillé (température, humidité, CO2,etc.) au moyen de liens sans fil à l'utilisateur [255].

La figure IV.4 montre une architecture générale d'un nœud capteur sans fils. Chaque nœud se compose d'une unité d'acquisition (module de capteur), unité de traitement, unité de communication et d'un module d'alimentation (batterie).

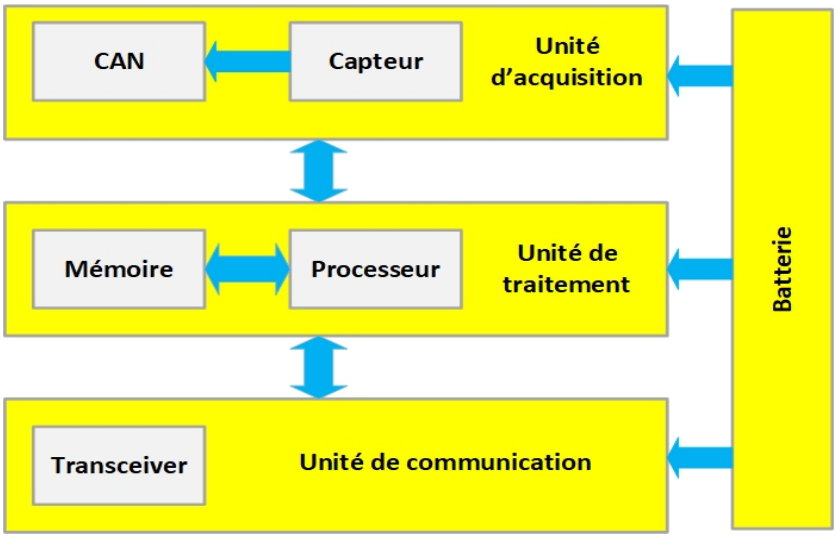


FIGURE IV.4 – Architecture d'un nœud de capteur sans fils [256]

Plusieurs topologies sont proposées pour les RCSFs [257], les plus utilisées sont [258] :

- Topologie en étoile (Figure IV.5. a) : est un système uni-saut. C'est-à-dire que tous les nœuds sont en liaison directe avec la station de collecte (Sink). Cette topologie demande une faible consommation d'énergie et aussi simple, mais la station de base est vulnérable, car

tout le réseau est géré par un seul nœud, et la distance entre les nœuds et la station est limitée.

- Topologie en arbre (Figure IV.5. b) : Cette topologie divise le réseau en sous-parties de sorte qu'il devient plus facile à gérer. Les connexions entre les nœuds sont structurées hiérarchiquement, ce qui signifie que chaque nœud peut être un fils à un nœud de niveau supérieur et un père à un nœud de niveau inférieur. Elle présente une bonne tolérance aux fautes, une bonne couverture, une bande passante élevée et une faible latence. Toutefois, les nœuds pairs peuvent consommer beaucoup d'énergie.

- Topologie toile (Figure IV.5.c) : Dans ce cas, tout nœud peut communiquer avec n'importe quel autre nœud du réseau (s'il est à portée de transmission). Un nœud voulant transmettre un message à un autre nœud hors de sa portée de transmission peut utiliser un nœud intermédiaire pour envoyer son message au nœud destinataire. Les nœuds consomment beaucoup d'énergie dans cette topologie.

- Topologie hybride : est un mélange entre les deux topologies. Les stations de base forment une topologie en toile et les nœuds autour d'elles sont en topologie étoile. Elle assure la minimisation d'énergie dans les réseaux de capteurs.

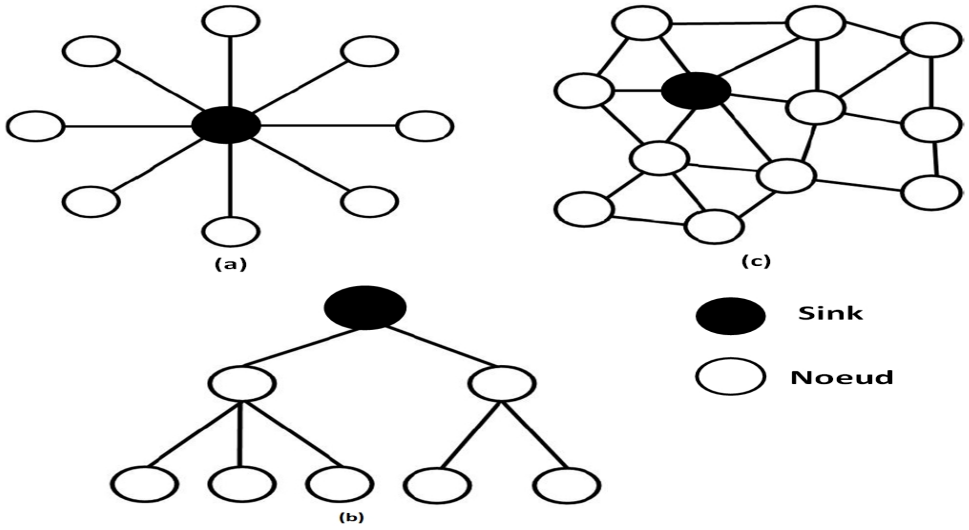


FIGURE IV.5 – Topologies des RCSF : (a)étoile ;(b)arbre ;(c) toile [258]

IV.2.2.2 Module nRF24L01+

Le module radio nRF24L01+ est un émetteur-récepteur sans fil, utilisé pour envoyer et recevoir des données en utilisant des ondes radio à 2Mbps pour la bande RF 2,4 GHz ISM (Industriel, Scientifique et Médical), en utilisant le protocole de communication propriétaire de Nordic nommée "ShockBurst". Ce protocole de communication permet au nRF24L01+ d'être considéré comme un modem complet, avec adressage, gestion des erreurs de transmission et retransmission automatique en cas de non-réponse du destinataire. Le module nRF24L01+ utilise la même gamme de fréquences que le WiFi et le Bluetooth, mais n'est pas compatible avec ceux deux protocoles. Le module nRF24L01+ support le protocole SPI qui lui permet de fonctionner avec tous les microcontrôleurs qui supportent la communication SPI (ex : Arduino). Le nRF24L01+ dispose de 32 octets de mémoire en émission et en réception par canaux de communication, pour un total de 6 canaux de communication simultanés (3 pour l'émision et 3 pour la réception). La taille maximum d'un paquet est de 32 octets, ce qui largement suffisant pour transmettre des mesures et des commandes [259].

Le module nRF24L01+ a gagné beaucoup de popularité et d'intérêt [260] en raison de :

- Son coût (peu coûteux ; moins de 3 $).

- Sa simplicité dans l'interaction avec la plupart des microcontrôleurs standard.
- Sa plage de transmission (jusqu'à 1km).
- Large bande passante à un débit de données élevé.
- Vitesses de transmission : 250 kb/s, 1 Mb/s et 2 Mb/s.
- Très basse consommation (plusieurs mois).

Il existe deux versions du module nRF24L01 + :

- Première version (Figure IV.6.a) : cette version contient une antenne embarquée. Sa petite taille compacte peut convenir à des espaces compacts, mais perd de la portée de transmission et limitant les applications de modules.
- Deuxième version (Figure IV.6.b) : Cette version (module PA) est livrée avec une antenne IPX (Internetwork Packet Exchange) externe et est conçue avec un amplificateur de puissance. Cela permet d'élargir la portée de transmission jusqu'à 1000 mètres. Par conséquent, atteindre un bon équilibre entre la performance et le coût de la transmission sans fil.

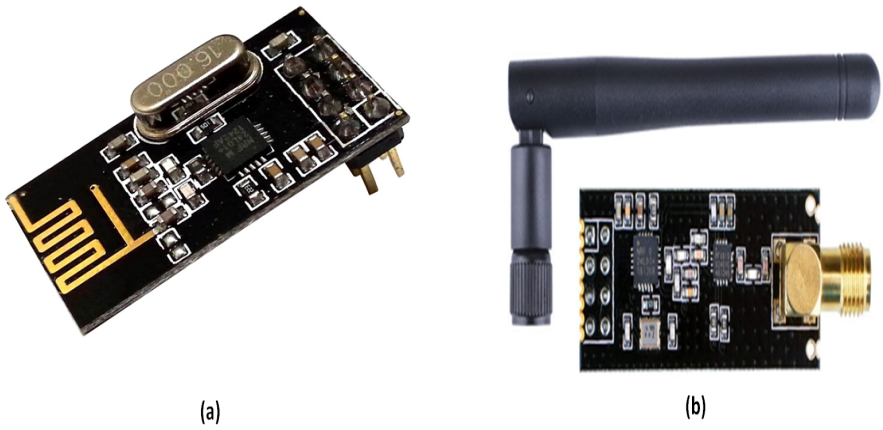


FIGURE IV.6 – Module nRF24L01+ : (a) version1 ;(b) version2 (PA) [261]

IV.2.2.2.1 Brochage du module nRF24L01+ PA

La figure IV.7 illustre les différentes broches du module nRF24L01+ :

- GND : connexion à la masse.
- VCC : tension d'alimentation comprise entre 1.9 et 3.6v.
- CE (Chip Enable) : passage du mode actif en mode veille.
- CSN (Chip Select Not) : basculement entre le mode d'émission et le mode de réception.
- SCK : horloge.
- MOSI (Master Out Slave In) : est l'entrée SPI du nRF24L01+ (envoie des données du maître vers l'esclave).

- MISO (Master In Slave Out) : est la sortie SPI du nRF24L01+ (envoie des données d'esclaves vers le maître).

- IRQ (Interrupt ReQuest) : est une broche d'interruption pouvant alerter le maître lorsque de nouvelles données sont disponibles pour traitement.

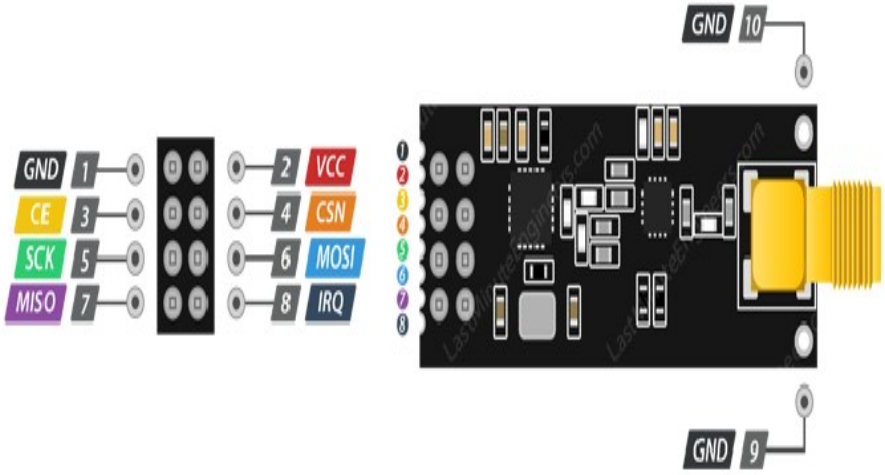


FIGURE IV.7 – Broches de nRF24L01+PA [262]

Le câblage du module nRF24L01+PA avec un Arduino UNO est illustré dans la figure IV.8, à noter que chaque carte Arduino possède différentes broches SPI qui doivent être connectées en conséquence. Pour les cartes Arduino telles que UNO / Nano, ces broches sont numériques 13 (SCK), 12 (MISO) et 11 (MOSI) en cas d'un Méga 50 (MISO), 51 (MOSI), 52 (SCK)).

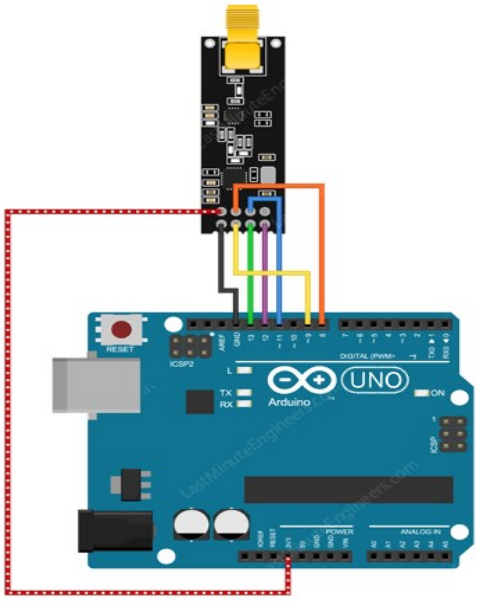


FIGURE IV.8 – Câblage du module nRF24L01 + PA avec un Arduino UNO [262]

IV.2.2.2.2 Principe de fonctionnement

Le module nRF24L01 + transmet et reçoit des données sur une certaine fréquence appelée canal. Pour commencer la communication, les deux modules doivent être sur la même canal. Cette canal

peut être n'importe quelle fréquence dans la bande ISM à 2,4 GHz (de 2 400 à 2 525 MHz). Le module nRF24L01+ utilise 125 canaux différentes, ce qui donne la possibilité d'avoir un réseau de 125 nœuds (Figure IV.9.a). Chaque canal peut avoir un nombre illimité d'adresses [259].

Le nRF24L01 + fournit une fonctionnalité appelée multiceiver (plusieurs émetteurs, récepteur unique). Le nRF24L01 peut être configuré comme un récepteur (Rx) de six nœuds émetteurs (Tx), chaque Tx utilise un data pipe avec sa propre adresse, sa propre adresse physique (adresse de canal de données) et peut être configuré. Ceci peut être illustré comme indiqué la figure IV.9.b [259].

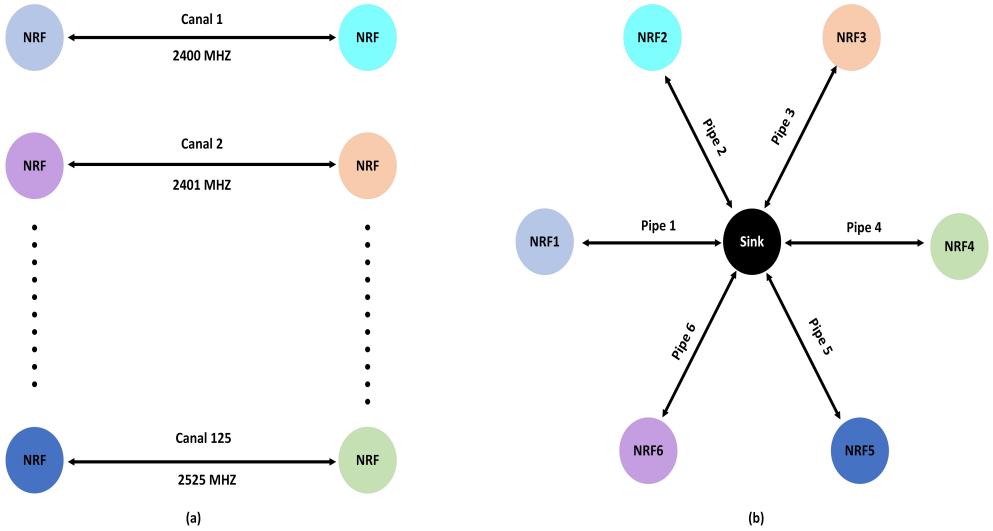


Figure IV.9 – Fonctionnement du module nRF24L01 + : (a) mode simple ; (b) mode multiceiver.

IV.2.2.2.3 Protocole Enhanced ShockBurst

ShockBurst est une couche de liaison de données à base de paquets qui est responsable de l'assemblage automatique, la synchronisation, la reconnaissance et retransmissions automatiques de paquets. Il permet la mise en œuvre d'une communication ultra basse puissance et haute performance avec des microcontrôleurs d'accueil à faible coût. Ce protocole permettant de réduire la consommation énergétique [259], il est caractérisé par :

- Un paquet de données de 32 octets.
- Gestion automatique de :
  - La construction de paquet.
  - La génération de l'acquittement (accusé de réception).
  - La retransmission.
- Possibilité de créer un réseau en étoile 1RX (récepteur) / 6TX (émetteurs) grâce au mode « MultiCeiver ».

La figure IV.10 montre le format de paquet ShockBurst, il contient [259] :

- Préambule : C'est un octet de synchronisation pour le récepteur. Si le premier bit de l'adresse est un 1, le préambule sera 10101010, sinon, il sera 01010101.
- Adresse : C'est l'adresse d'utilisation du système « MultiCeiver ». Sa taille peut être contrôlée avec le registre « SETUP_AW », et est comprise entre 3 et 5 octets.
- Contrôle du paquet : C'est une combinaison de 9 bits, structurée comme suit :

- Taille de la charge utile : Ce champ de 6 bits spécifie la taille de la charge utile en octets (entre 0 et 32). Codage : 000000 = 0 octet (utilisée pour un paquet ACK vide) ,100000 = 32 octets et 100001 indique que ne pas tenir compte de ce paramètre. Ce champ ne pas est utilisé si le mode « taille dynamique » est activé.

- PID (Paquet IDentification) : Le champ PID 2 bits est utilisé pour détecter si le paquet reçu est nouveau ou retransmis. Cela évite au récepteur de présenter plusieurs fois le même paquet au microcontrôleur.

- NO_ACK (No Acknowledgment) : Lorsque ce bit est mis à 1, le récepteur ne renverra pas de paquet ACK vers l'émetteur.

- Charge Utile : Est le contenu défini par l'utilisateur.

- CRC (Cyclic Redundancy Check) : Le CRC est le mécanisme de détection d'erreurs dans le paquet et est calculé à partir de tous les bits précédents dans le paquet.

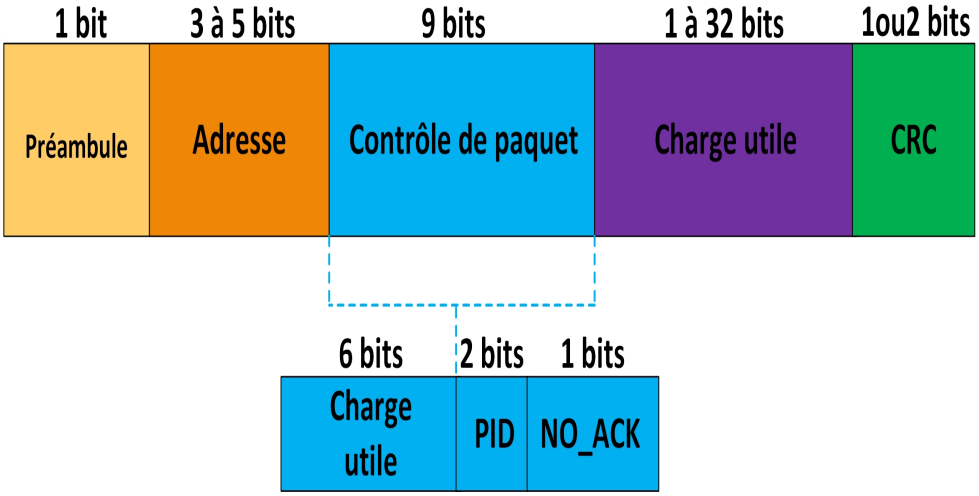


Figure IV.10 – Format de paquet ShockBurst [259]

IV.3 Softwares utilisés

IV.3.1 Algorithme de fusion et contrôle

La serre est considérée comme un système non linéaire complexe et son contrôle est une procédure complexe où la bonne décision nécessite une combinaison entre plusieurs paramètres.

La logique floue est considérée comme une meilleure approche pour les problèmes de prise de décision et une solution efficace pour contrôler l'environnement de la serre [49], elle axé sur la création d'un environnement plus approprié pour améliorer la croissance des plantes et réduire le coût de production ainsi que la consommation d'énergie.

La logique floue est une extension de la logique booléenne créée par Lotfi Zadeh en 1965, en se basant sur sa théorie mathématique des ensembles flous, qui est une généralisation de la théorie des ensembles classiques. En introduisant la notion de degré dans la vérification d'une condition, permettant ainsi à une condition d'être dans un autre état que vrai ou faux, la logique floue confère une flexibilité très appréciable aux raisonnements qui l'utilisent, ce qui rend possible la prise en compte des imprécisions et des incertitudes [236].

IV.3.1.1 Ensembles flous

Les ensembles flous sont des types d'ensembles qui ne peuvent pas garder de limites claires ou nettes. Ils représentent de vagues limites. Cela permet une meilleure représentation des termes et des connaissances vagues que nous, les humains, manipulons au quotidien. Dans un ensemble flou, un élément peut être un membre de l'ensemble avec un certain degré d'appartenance. Un nombre compris entre 0 et 1 indique le degré d'appartenance à un ensemble dans l'intervalle [0 1] [237]. La définition d'un ensemble flou est représentée comme suit :

Un ensemble flou défini comme A, est un sous-ensemble de l'univers du discours X, où A est caractérisé par une fonction d'appartenance $\mu_A(x)$.

$$\begin{array}{ccc} \mu_A(x) = 1 & si & x \; est \text{ compltement dans A} \\ \mu_A(x) = 0 & si & x \text{ n}'\text{est pas en A} \\ 1 < \mu_A(x) < 0 & si & x \text{ une } partie \;\; de \; A \end{array} \tag{IV.1}$$

IV.3.1.1.1 Fonction d'appartenance

Une fonction d'appartenance pour un ensemble flou A sur l'univers du discours X est définie comme $\mu_A X : \rightarrow [0\ 1]$, où chaque élément de X est mappé à une valeur comprise entre 0 et 1. Cette valeur représente le degré d'appartenance d'un élément dans X à l'ensemble flou A. La figure IV.11 illustre quelques formes des fonctions d'appartenance.

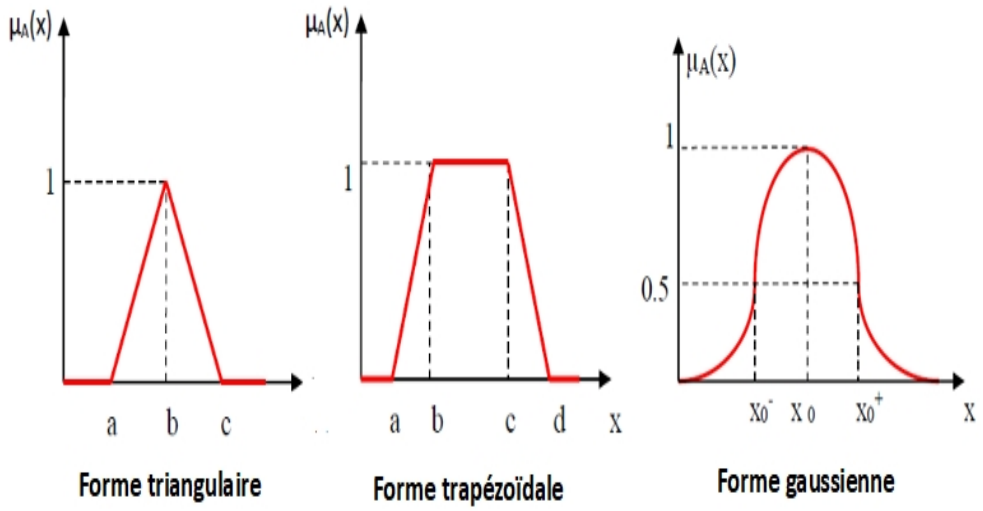


Figure IV.11 – Quelques formes des fonctions d'appartenance

Le choix des formes des fonctions d'appartenance est arbitraire. Des études comparatives ont montré qu'avec les différentes formes des fonctions d'appartenance, les résultats sont pratiquement similaires en boucle fermée. La forme la plus fréquemment utilisée est la forme triangulaire car en pratique, elles sont prouvées d'être de bon compensateurs entre l'efficacité et la facilité d'implémentation). Le nombre de fonctions d'appartenance est généralement impair (3,5 et 7 sont des valeurs courantes). Le choix du nombre dépend de la précision souhaitée [238].

IV.3.1.1.2 Variable linguistique

La variable linguistique est un concept important dans la logique floue et joue un rôle clé dans ses applications, en particulier dans le système expert flou. La variable linguistique est une variable dont les valeurs sont des mots ou des phrases dans un langage naturel. Une variable floue peut prendre simultanément plusieurs valeurs linguistiques. Par exemple, la température est une

variable linguistique qui peut prendre les valeurs comme suit : « Très Froid », « Tiède » et « Chaud ». La variable linguistique peut être représentée par un triplet (x,T(x),U) dans lequel x est le nom de la variable linguistique, T(x) L'ensemble des valeurs linguistiques de x et U l'univers de discours. Figure IV.12 illustre un exemple de variable linguistique 'température' avec cinq termes linguistiques : « Très froid (Tf) », « Froid (F) », « Tiède (T) », « Chaud (Ch) », « Très chaud (Tch) ».

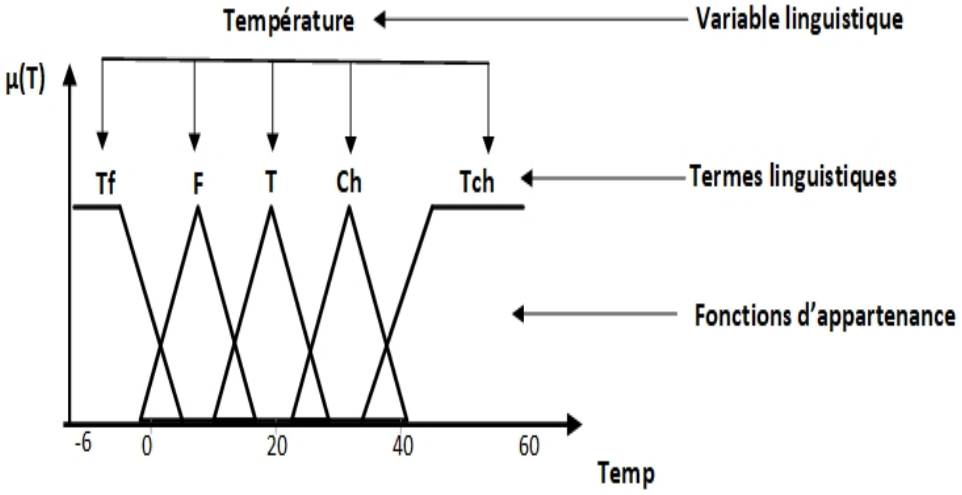


FIGURE IV.12 – Variables linguistiques

IV.3.1.1.3 Opérations sur les ensembles flous

Il y a trois opérations de base sur les ensembles flous : union, intersection et complément. Soient A et B deux ensembles flous dans X ayant respectivement μ_A, μ_B comme degrés d'appartenance.

- Union : L'union des ensembles flous A et B est un ensemble flou défini par la fonction d'appartenance :

$$\mu_{A\cup B}(x) = \max\left[\mu_A(x), \mu_B(x)\right]$$

- Intersection : L'intersection des ensembles flous A et B est un ensemble flou défini par la fonction d'appartenance :

$$\mu_{A\cap B}(x) = \min\left[\mu_A(x), \mu_B(x)\right]$$

- Complément : Le complément d'un sous-ensemble flou A est un ensemble flou dénoté par $\overline{A}$ dont la fonction d'appartenance est donnée par : :

$$\mu_{\overline{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$$

IV.3.1.2 Structure d'un contrôleur flou

On peut distinguer quatre parties principales constituant la structure d'un régulateur flou : fuzzification, inférence flou, base des règles et défuzzification. La figure IV.13 montre la structure générale d'un contrôleur flou à deux entrées (x1 et x2) et une sortie y [239][240].

IV.3.1.2.1 Fuzzification

Ce bloc permet de traduire les données numériques quantitatives en variables linguistiques qualitatives par l'utilisation des fonctions d'appartenance.

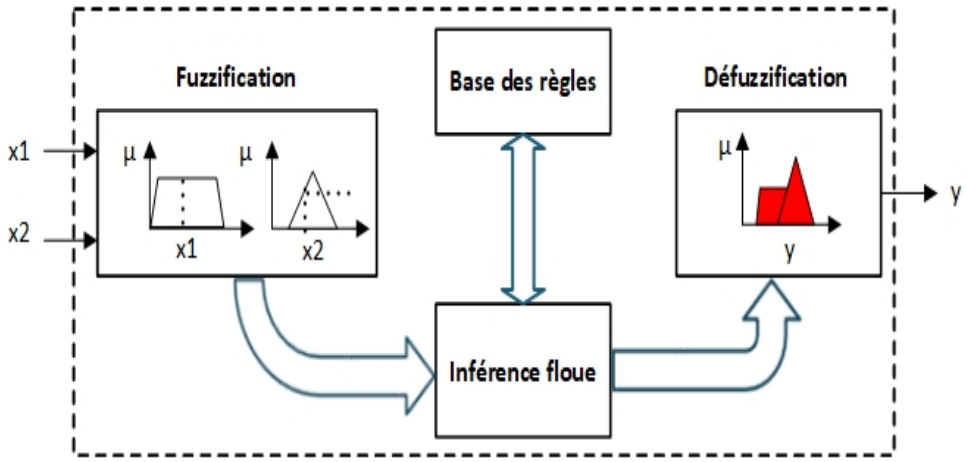


FIGURE IV.13 – Structure d'un contrôleur flou

IV.3.1.2.2 Base des règles

Les règles d'inférence sont considérées comme un ensemble de plusieurs règles reliant les variables d'entrée floues du système à ses sorties floues. Les règles proviennent donc des sources suivantes : expériences d'experts et connaissances de commande, actions des opérateurs de commande et apprentissage du régulateur. Ces règles sont représentées comme suit :

Si condition 1 et/ou condition 2 (et/ou...) **alors** action sur les sorties.

IV.3.1.2.3 Inférence floue

C'est le cœur d'un contrôleur flou, il est capable de simuler les décisions humaines et d'induire une action de contrôle floue en utilisant des règles d'implication et d'inférence floues dans la logique floue. Le traitement numérique des règles d'inférence qui permet d'obtenir la sortie linguistique ou floue du régulateur se fait par différentes méthodes [241] :

- Méthode d'inférence max-min (Mamdani).
- Méthode d'inférence max-prod (Larsen).
- Méthode d'inférence somme-prod (Zadah).

IV.3.1.2.4 Défuzzification

Ce bloc permet de fusionner les différentes commandes générées par le moteur d'inférence pour donner une seule sortie et transformer cette variable linguistique qualitative en donnée numérique quantitative. Plusieurs méthodes de défuzzification existent, les plus utilisées sont :

- Méthode de centre de gravité.
- Méthode de la moyenne de maxima.
- Méthode du maximum.

IV.3.1.3 Avantages de la logique floue

La logique floue a plusieurs avantages [242][243], les principaux sont :

- Similarité au raisonnement humain.
- Non nécessité de modélisation du système à contrôler
- Conception de base de connaissances flexible et intuitive.
- Facilité d'implémentation.
- Maîtrise du procédé avec un comportement complexe (fortement non linéaire et difficile à modéliser).
- Contrôle plusieurs grandeurs à la fois et avec la même règle (la température et l'humidité dans notre cas).

IV.3.2 Internet des Objets (IdO)

En général, les champs agricoles des agriculteurs peuvent être situés à des kilomètres de leur résidence. Parfois, les agriculteurs doivent se rendre dans leurs champs agricoles plusieurs fois par jour pour voir ce qui se passe là-bas. Afin d'éliminer ces difficultés pratiques et aider l'utilisateur, un système de supervision basé sur l'IdO a été proposé dans notre travail.

IV.3.2.1 Définition d'IdO

Nous sommes encore à nos débuts où chacun essaie d'interpréter l'IdO en fonction de ses visions et ses besoins. Pour cette raison, il n'y a pas une définition universelle de l'IdO [244]. Dans cette section nous présentons quelques définitions afin que le lecteur puisse obtenir une vue générale de l'IdO.

"The term Internet of Things is used as an umbrella keyword for covering various aspects related to the extension of the Internet and the Web into the physical realm, by means of the widespread deployment of spatially distributed devices with embedded identication, sensing and/or actuation capabilities. Internet of Things envisions a future in which digital and physical entities can be linked, by means of appropriate information and communication technologies, to enable a whole new class of applications and services "[245].

"An "Internet of Things" means "a world-wide network of interconnected objects uniquely addressable, based on standard communication protocols", or, more widely : "Things having identities and virtual personalities operating in smart spaces using intelligent interfaces to connect and communicate within social, environmental, and user contexts" [246].

"The basic idea of this concept is the pervasive presence around us of a variety of things or objects – such as Radio-Frequency IDentification (RFID) tags, sensors, actuators, mobile phones, etc. – which, through unique addressing schemes, are able to interact with each other and cooperate with their neighbors to reach common goals " [247].

IV.3.2.2 Historique de l'IdO

L' IdO est une concrétisation technique de l'informatique ubiquitaire telle qu'imaginée en 1991 par Mark Weiser [248] où la technologie est intégrée naturellement aux objets du quotidien. Très prometteur, ce concept ouvre la voie vers une multitude de scénarios basés sur l'interconnexion entre le monde physique et le monde virtuel.

Le terme IdO a été utilisé pour la première fois en 1999 par le pionnier britannique de la technologie Kevin Ashton [249] pour décrire un système dans lequel des objets du monde physique pourraient être connectés à internet par des capteurs. Ashton a inventé le terme pour illustrer le pouvoir de connecter les étiquettes d'identification par radiofréquence (IRF) utilisées dans les chaînes d'approvisionnement des entreprises à internet afin de compter et de suivre les marchandises sans

intervention humaine.
Au fil du temps, ce concept s'est développé et a été généralisé en tant qu'une méthode et un processus de connexion d'un grand nombre d'objets du quotidien à Internet pour réaliser des tâches spécifiques, collecter des informations de manière autonome et atteindre des objectives dans plusieurs domaines.

Aujourd'hui, l'IdO est devenu un terme populaire pour décrire des scénarios dans lesquels la connectivité internet et la capacité informatique s'étendent à une variété d'objets, d'appareils, de capteurs, etc.

IV.3.2.3 Avantages de l'IdO en agriculture

L'utilisation de l'IdO dans le secteur agricole présent divers des bénéfices. Certains de ces bénéfices sont les suivants [250] :

- Efficience des intrants : elle améliorera l'efficacité des intrants de l'agriculture comme le sol, eau, engrais, pesticides, etc.
- Réduction des coûts : Elle réduira les coûts de production.
- Rentabilité : Elle augmentera la rentabilité des agriculteurs.
- Durabilité : Améliore la durabilité.
- Protection de l'environnement : elle joue un rôle important dans la protection de l'environnement.
- Et bien sûr, réduire les efforts des agriculteurs et économiser du temps.

IV.3.2.4 Serveur Node-RED

La supervision se fait par la réception des données et l'émission des commandes à travers une Interface Homme Machine IHM. Node-RED est un outil puissant dédié à des systèmes à base d'IdO.

Node-RED est un outil de programmation développé par IBM en 2013 pour interconnecter des périphériques matériels, des APIs ainsi que des services en ligne. Il s'agit d'un simple raccordement de nœuds ou de blocs de codes prédéfinis pour effectuer des tâches [251]. En particulier, Node-RED est basé sur JavaScript, l'un des langages de programmation les plus largement utilisés et faciles à apprendre. Son exécution est construite sur Node.js (plateforme open source, légère et efficace exécute des codes JavaScript), qui utilise un modèle d'E/S non bloquant, piloté par événement, idéal pour un développement d'applications rapide et facile avec une large gamme de bibliothèques [252].

L'un des plus grands avantages de Node-RED est sa capacité à fonctionner au bord du réseau sur du matériel à faible coût comme le Raspberry Pi, dans le cloud (IBM, Oracle, Google, etc.). et localement sur un PC standard (Windows, Linux, Raspbian et Mac OS) [253].

— **Editeur de Node-RED**

La fenêtre de l'éditeur de Node-RED se compose de quatre composants (Figure IV.14) :

- L'en-tête en haut.
- La palette à gauche.
- L'espace de travail principal au milieu.
- Sidebare à droite.

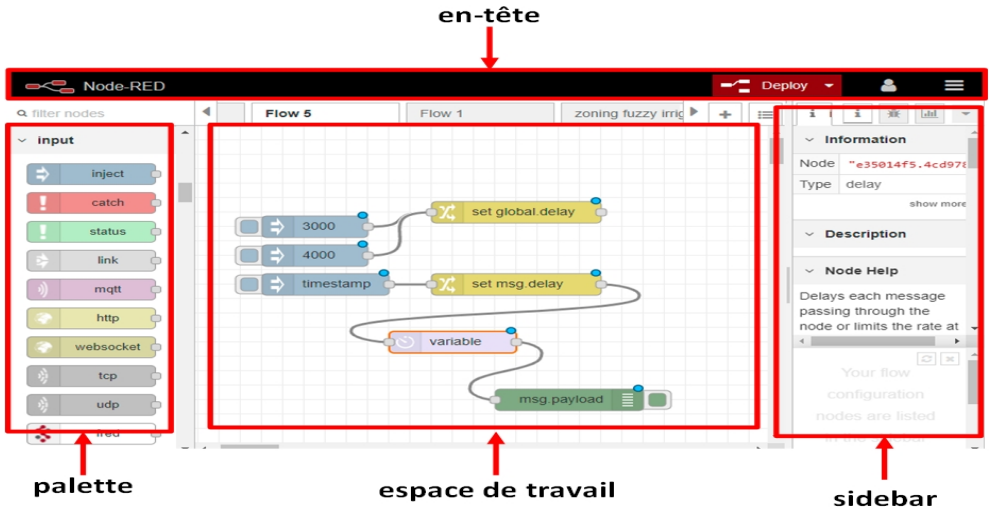


FIGURE IV.14 – Editeur Node RED

IV.3.2.4.1 En-tête

L'entête contenant le bouton de déploiement, le menu principal et le menu utilisateur.

IV.3.2.4.2 Palette

La palette contient tous les nœuds installés et disponibles à utiliser. Le gestionnaire de palette (palette manager) peut être utilisé pour installer de nouveaux nœuds.
Figure IV.15 illustre certains modules (ensemble des nœuds) disponibles dans Node-RED, comme :

- Dashboard : est un module qui fournit un ensemble de nœuds (texte, jauge, graphes, LED, etc.) dans Node-RED pour créer rapidement un tableau de bord de données en temps réel (pour affiche l'état de plusieurs services).

- Input / Outputs : contient des nœuds offrent des moyens d'envoyer / recevoir des données sur le même ensemble de protocoles (ex : serial, mqtt, http, etc.).

- Function : contient une série de nœuds supportant des fonctions de traitement. Cela va d'un simple nœud délai (delay), à un nœud d'aiguillage (switch), à nœud de fonction programmable qui peut être adapté à presque tous les besoins de programmation.

- Storage : les nœuds de ce module purent être utilisés pour lire / écrire des données depuis /dans un fichier ou une base de données (file, MySQL, etc.).

- Social : Les nœuds "media sociaux" supportent les interactions avec l'email, Twitter, Facebook, etc. Ces nœuds permettent d'envoyer ou recevoir des emails, notifications, tweets.

Les nœuds sont créés quand un flux est déployé, ils peuvent envoyer et recevoir des messages pendant que le flux est en cours d'exécution et ils sont supprimés lorsque le prochain flux est déployé. Ils sont composés d'un fichier HTML et d'un fichier JavaScript. Le fichier HTML indique à quoi le nœud doit ressembler, combien d'entrées / sorties doit utiliser. Le fichier JavaScript est responsable de la façon dont le nœud devrait fonctionner.

IV.3.2.4.3 Espace de travail

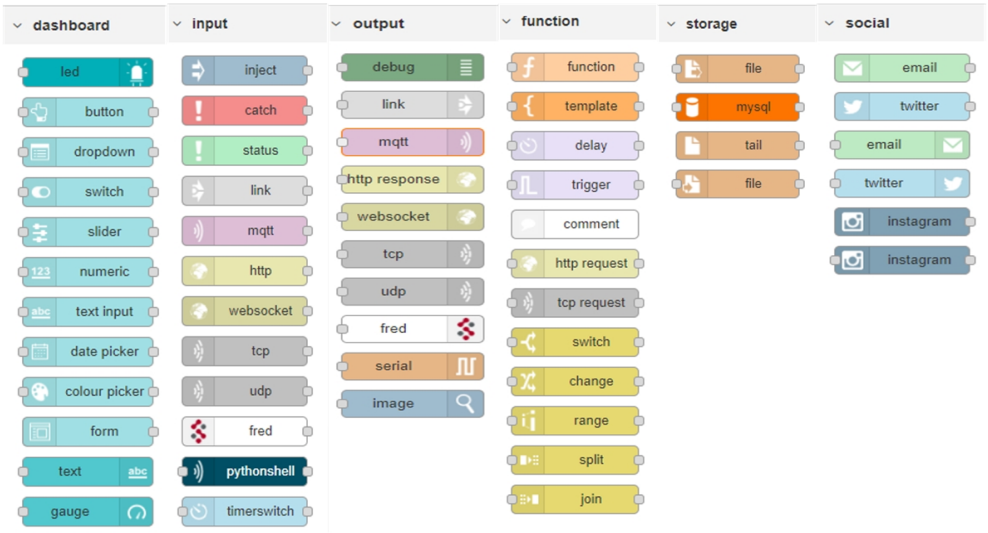


FIGURE IV.15 – Certains des nœuds disponibles dans Node-RED

L'espace de travail principal est l'endroit où les flux sont développés en faisant glisser les nœuds de la palette et les raccorder ensemble.

IV.3.2.4.4 Sidebare

Le sidebare (la barre latérale) contient des panneaux qui fournissent un certain nombre d'outils utiles au sein de l'éditeur, où :

- La barre information affiche plus d'informations sur le nœud sélectionné actuel (un résumé de ses propriétés et textes d'aide pour le nœud).
- La barre de débogage(debug) affiche les messages passés aux nœuds de débogage dans le flux, ainsi que certains messages de log de l'exécution.
- La barre des nœuds de configuration (config) fournit une liste de tous les nœuds de configuration organisée par leur périmètre.
- La barre context affiche le contenu du stockage de données de contexte.

Certains nœuds fournissent leurs propres sidebare, tels que node-red-dashboard.

IV.3.3 Base de données

Avec le développement important des technologies de l'information et de l'IdO et sa prolifération dans de nombreux domaines tels que la santé, agriculture, transport, administration et l'éducation ; les bases de données sont aujourd'hui essentielles pour chaque entreprise, société, unité de recherche, etc. pour stocker et bien gérer les grandes quantités d'informations, et ça c'est l'un des facteurs les plus importants pour le succès des grandes entreprises à travers le monde comme Google, Yahoo, Facebook, etc.

Pendant mes recherches, nous avons rencontré de nombreuses difficultés pour trouver des informations détaillées sur le secteur agricole et la production en Algérie, parce que les autorités compétentes (comme plusieurs domaines) utilisent des méthodes traditionnelles pour stocker les données (papier, fichier Excel, etc.)

Une base de données permet de mettre des données à la disposition des utilisateurs d'une manière

rapide et facile pour une analyse, un traitement, une saisie ou bien une mise à jour.

Le terme base de données désigne une collection de données qui est gérée par un système de gestion de base de données (SGBD) [263]. Ce système permet de :

- Manipuler les données : interroger et mettre à jour les données.
- Contrôler les données : intégrité (vérification de contraintes d'intégrité), confidentialité (contrôle des droits d'accès, autorisation), etc.
- Partage de données (multi-accès) : plus d'une personne peut accéder à la même en même temps et les données peuvent être importées dans d'autres applications facilement.
- Augmenter la sécurité des données : contre les indiscrétions (par un mot de passe), les destructions (en cas d'incident, des procédures de sauvegarde et reprise doivent être prévues afin de relancer le système sans avoir recommencé les saisies par la transaction).

IV.3.3.1 Types de base de données

On distingue deux types de base de données [264] :

IV.3.3.1.1 Bases de données centralisées

Une base de données centralisée (Figure IV.16. a) est gérée par un seul SGBD. Ses divers traitements sont confiés à une seule et même unité de traitement.

IV.3.3.1.2 Bases de données distribuées

Le deuxième type (Figure IV.16. b) peut avoir différents matériels informatiques (hardware), systèmes d'exploitation, SGBD, et différents schémas de base de données (la structure décrite dans un langage formel qui soutient le modèle géré par le SGBD).

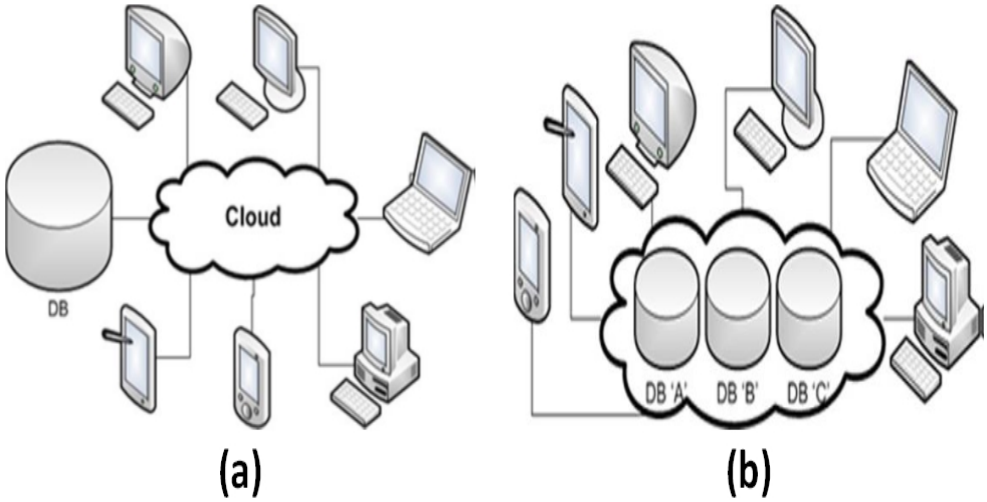


Figure IV.16 – Types de base de données : (a) centralisée ; (b) distribuée [264]

IV.3.3.2 Modèle de SGBD

Il existe cinq modèles de SGBD (Figure IV.17) [265] :

- Modèle Hiérarchique : Il s'agit le premier modèle de SGBD. Il est apparu dans les années 60s, son but premier était de faciliter la représentation de l'information. Les données sont organisées selon des relations hiérarchiques et une arborescence descendante.

- Modèle réseau : Est un modèle très complexe. Ce modèle utilise des pointeurs vers des enregistrements comme le modèle hiérarchique. Il renforce la sémantique par rapport au modèle hiérarchique.

- Modèle relationnel : Les données sont organisées en tableaux (ligne et colonnes). Les données d'un tableau peuvent faire référence à des données similaires dans d'autres tableaux, ce qui maintient l'intégrité des liens entre eux. Il est le modèle le plus utilisé.

- Modèle déductif : Les données sont représentées sous forme de table, mais leur manipulation se fait par calcul de prédicats.

- Modèle objet : Les données sont stockées sous forme d'objets, c'est-à-dire de structures appelées classes présentant des données membres. Les champs sont des instances de ces classes.

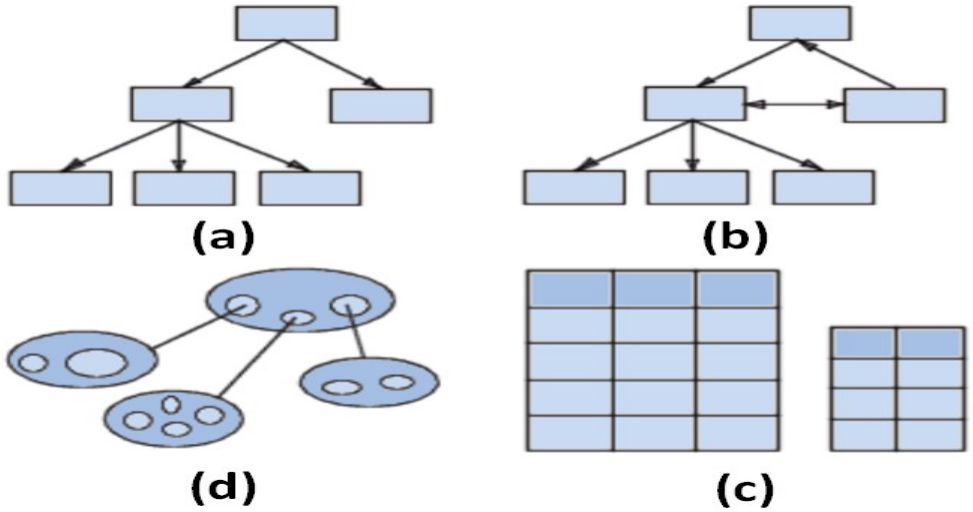


FIGURE IV.17 – Modèles de SGBD : (a) hiérarchique ; (b) réseau ; (c) relationnel ; (d) objet [265]

IV.3.3.3 MySQL

Il existe de nombreux systèmes de gestion de bases de données (MySQL, Orcale, PostgreSQL, Microsoft SQL, Informix, etc.). Dans notre projet MySQL a été utilisé.
MySQL est un système de gestion de bases de données relationnelles open-source développées et soutenu par Oracle, lancé en 1995. MySQL peut fonctionner sur plusieurs plateformes (Windows, Linux, Raspbian, etc.). Il a également des API pour un grand nombre de langues (C, C++, Java, Lua, Perl, PHP, Python et Ruby) [266].

Les avantages de MySQL sont nombreux et expliquent sa grande popularité, notamment [267] :

- Il est open source et les frais pour une licence commerciale sont très raisonnables.

- Il est facile à utiliser.

- Il peut fonctionner sur de nombreux systèmes d'exploitation.

- Le support technique est largement disponible.

- Il est rapide par rapport d'autres systèmes de gestion.

- C'est sécurisé : Le système d'autorisation flexible de MySQL autorise certains ou tous les privilèges de base de données (par exemple, le droit de créer une base de données ou de supprimer des données) à des utilisateurs ou groupes d'utilisateurs spécifiques.

IV.3.3.4 Serveur XAMPP

IV.3.3.4.1 Présentation du XAMPP

XAMPP (Figure IV.18) est un ensemble de logiciels permettant de facilement créer une interface web interagissant avec une base de données SQL. XAMPP est également multi-plateformes, ce qui signifie qu'il fonctionne aussi bien sur Linux, Mac et Windows [268].

XAMPP a quatre composants principaux. Ceux-ci sont :

- Apache : Elle est l'application de serveur Web qui traite et livre le contenu Web à un ordinateur. Apache est le serveur web le plus populaire en ligne, alimentant près de 54 % des sites web.

- MySQL : Chaque application web, simple ou compliquée, nécessite une base de données pour stocker les données collectées. MySQL est donc un Système de Gestion de Base de Données Relationnelles (SGBDR), qui utilise le langage SQL. C'est l'un des SGBDR les plus utilisés. Sa popularité est due en grande partie au fait qu'il s'agit d'un logiciel Open Source, ce qui signifie que son code source est librement disponible et que quiconque peut modifier MySQL pour l'améliorer ou l'adapter à ses besoins. MySQL peut donc s'utiliser seul, mais est la plupart du temps combiné à un autre langage de programmation : PHP par exemple pour de nombreux sites web, mais aussi Java, Python, C++, et beaucoup, beaucoup d'autres.

- PHP : PHP signifie Hypertext Preprocessor, qui est un langage de script côté serveur qui alimente certains des sites Web les plus populaires au monde, y compris WordPress et Facebook. Il est open source, relativement facile à apprendre, et fonctionne parfaitement avec MySQL, ce qui en fait un choix populaire pour les développeurs web.

- Perl : Perl est un langage de programmation dynamique de haut niveau largement utilisé dans la programmation réseau, l'administration système, etc. Bien que moins populaire à des fins de développement web, Perl a beaucoup d'applications de niche.



Figure IV.18 – Page bienvenu du XAMPP

IV.3.3.4.2 Interface phpMyAdmin

L'interface phpMyAdmin est accessible via un navigateur internet. Elle fonctionnera avec la plupart des navigateurs internet. Pour accéder à une interface phpMyAdmin, il faut accéder à l'adresse internet désignée dans un navigateur internet *http ://127.0.0/phpmyadmin/* ou bien *http ://localhost/phpmyadmin /* [268].

PhpMyAdmin n'est pas un programme, mais un ensemble de pages PHP toutes prêtes dont on se sert pour gagner du temps. Figure IV.19 illustre l'accueil de phpMyAdmin.

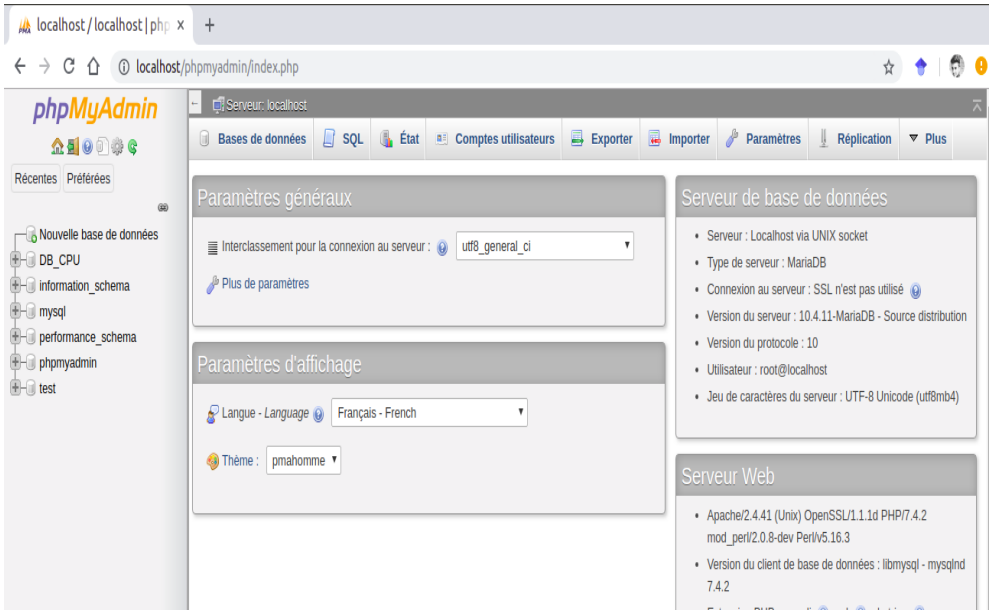


FIGURE IV.19 – Accueil de phpMyAdmin

IV.3.3.5 Création et Manipulation des bases de données

IV.3.3.5.1 Création d'une base de données

Pour créer une base de données, un clic sur nouvelle base de données en haut dans la section à gauche de l'accueil de phpMyAdmin (Figure IV.19) doit être effectué. Il suffit d'entrer le nom désirer pour la base de données et de cliquer sur créer.

On peut aussi choisir une option appelée les interclassements, ce sont des conventions pour la reconnaissance et l'affichage des caractères. En effet, il existe de nombreuses variantes selon les langues utilisées. Si l'on prévoit d'utiliser des accents dans un champ particulier, il est conseillé d'utiliser l'interclassement utf8_general_ci. Sinon, l'interclassement fourni par défaut est conservé.

IV.3.3.5.2 Création d'une table

Une table est une partie d'une base de données. Si l'on compare à Excel, une table est une feuille contenant des lignes et des colonnes, et la base est le classeur qui regroupe une ou plusieurs feuilles.

Après la création d'une base de données, elle peut être observée dans la barre de gauche. Comme il n'y a pas de table dans la base, il est demandé immédiatement de créer une table (Figure IV.20). Les champs sont ensuite introduits dans la table.

La page de description des nouveaux champs est montrée à la figure IV.21.

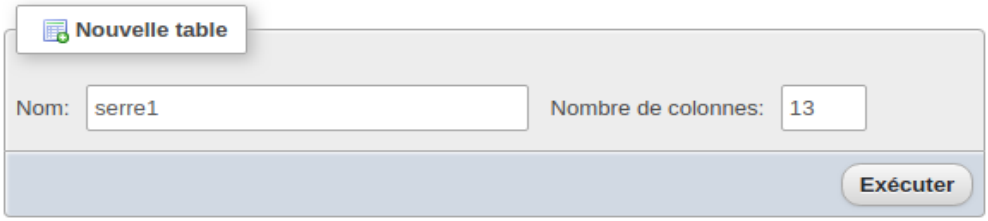


FIGURE IV.20 – Création d'une table

IV.3.3.5.3 Remplissage des champs

PhpMyAdmin demande beaucoup d'informations à remplir (Figure IV.21), mais il n'est pas nécessaire de tout remplir. Les sections les plus intéressantes sont :

- Champ : permet de définir le nom du champ.
- Type : le type de données que va stocker le champ (nombre entier, texte, date, etc.).
- Taille/Valeurs : permet d'indiquer la taille maximale du champ, utile pour le type VARCHAR notamment, afin de limiter le nombre de caractères autorisés.
- Index : active l'indexation du champ. Il signifie dans les grandes lignes que votre champ sera adapté aux recherches. Le plus souvent, on utilise l'index PRIMARY sur les champs de type id.
- Auto_increment : permet au champ de s'incrémenter tout seul à chaque nouvelle entrée. On l'utilise fréquemment sur les champs de type id.

On remplit donc les deux champs de la nouvelle table ma table de la base ma base. On choisit l'un des champs un nombre entier (INT) et l'autre chaines de caractères (VARCHAR) de 30 caractères, respectivement. Les champs sont :

- id : C'est le numéro d'identification, Grâce à lui, toutes nos entrées seront numérotées.
- nom : ce champ contiendra les paramètres agricoles (température, humidité, etc.).

Une fois que c'est fait, un clic sur le bouton Enregistrer en bas de la page permet de créer le nôtre table.



FIGURE IV.21 – Description des nouveaux champs

IV.3.3.5.4 Onglets de phpMyAdmin

Nous pouvons effectuer différentes opérations sur notre base de données et notre table grâce aux différents onglets affichés sur la page d'accueil de phpMyAdmin. Le rôle de chaque onglet est :

- L'onglet Parcourir (Figure IV.22) : Affiche le contenu de la table.

- L'onglet SQL (Figure IV.23) : Exécuter une ou des requêtes SQL sur la base de données. C'est ici que vous pouvez exécuter ce que l'on appelle des requêtes SQL pour demander à MySQL de faire quelque chose, par exemple la requête « *SELECT * FROM 'serre1' WHERE 1* » signifie : *«afficher tout le contenu de la table "serr1" »*.

- L'onglet Structure : présente la structure de la table (liste des champs), permet de faire modification sur les tables comme l'ajout des colonnes, la modification et la suppression des champs, etc.

- L'onglet Importer (Figure IV.24) : dans la page qui s'affiche, on peut envoyer un fichier de requêtes SQL (généralement un fichier.sql) à MySQL pour qu'il les exécute (Figure IV.23).

- L'onglet export (Figure IV.25) : permet de récupérer un fichier texte.sql qui contiendra des tonnes de requêtes SQL. Il peut être utilisé pour deux choses :

  - Transmettre de la base de données sur Internet : lorsque nous voudrons héberger notre site sur Internet, il faudra utiliser la base de données en ligne de votre hébergeur. Le fichier. sql que nous allons générer nous permettra d'effectuer facilement des opérations sur notre base en ligne.

  - Faire une copie de sauvegarde de la base de données : nous permettra, en cas de détruire toutes les informations sur notre site, d'avoir une copie de secours sur le disque dur.

- L'onglet opérations (Figure IV.26) : permet certaines opérations globales sur la base de données ou la table active. Pour une base de données sélectionnée, L'onglet opérations permet de :

  - Ajouter une nouvelle table.

  - Renommer la base de données.

  - Supprimer la base donnée.

  - Réaliser une copie de la base de données.



FIGURE IV.22 – Onglets de la page d'accueil

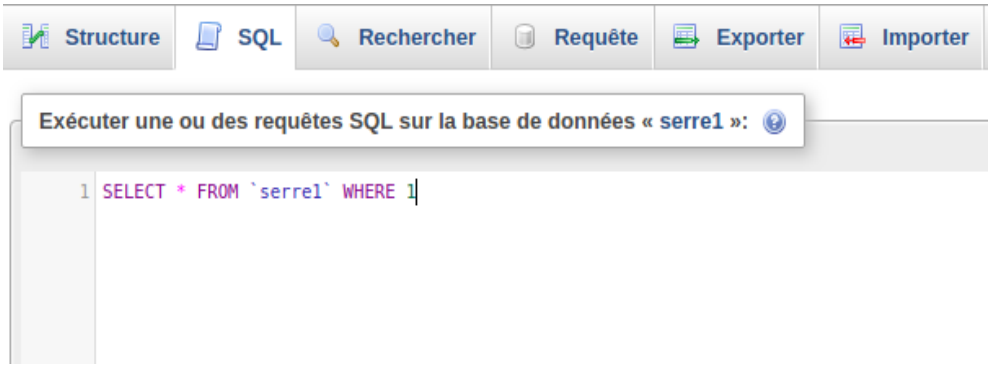


FIGURE IV.23 – Onglet SQL

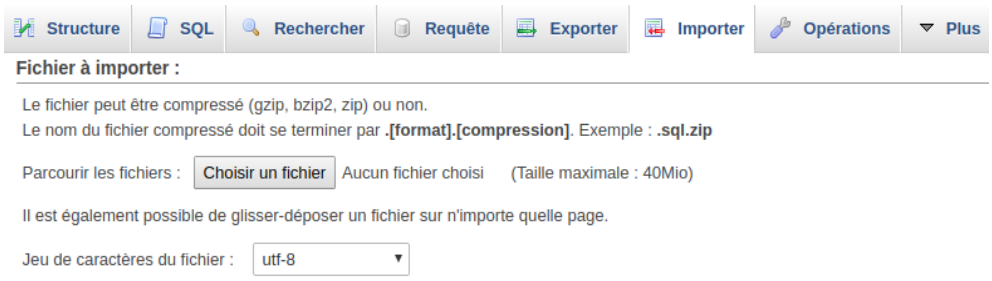


FIGURE IV.24 – Onglet importer



FIGURE IV.25 – Onglet export

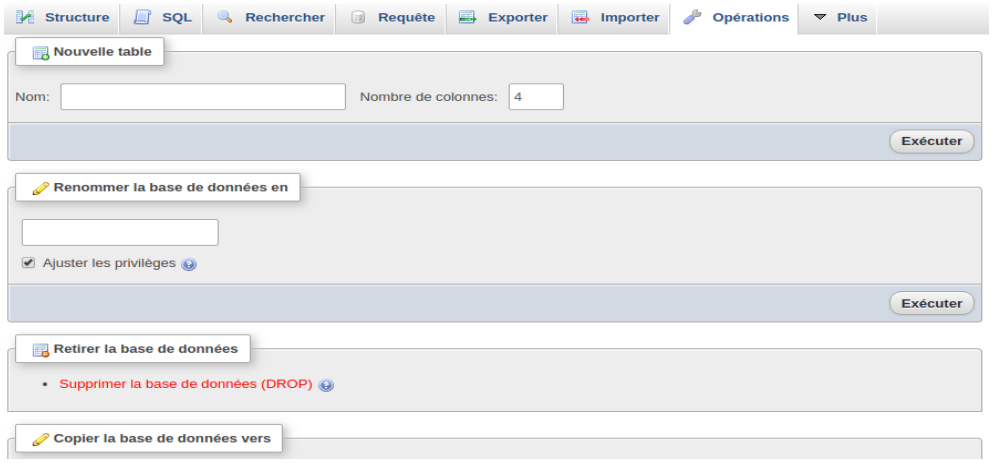


FIGURE IV.26 – Onglet opérations

IV.4 Conclusion

Les nouvelles technologies et l'essor du numérique redessinent l'agriculture. Elles sont entrain de transformer l'agriculture et le système alimentaire. Ces progrès technologiques peuvent contribuer au renforcement de la résilience, de la productivité et de la durabilité des secteurs agricoles et alimentaires afin qu'ils répondent plus précisément aux besoins.

Dans ce chapitre on a détaillé les différents outils hardware et softwares utilisés dans notre projet. Ils ont été choisis pour leurs caractéristiques et avantages (la disponibilité, la rapidité, la précision, la simplicité, le support technique, et le coût).

Dans le chapitre suivant, nous allons expliquer les différentes étapes de notre projet pratique et discuter les résultats obtenus.

Chapitre V

Développement et implémentation pratique

V.1 Introduction

L'agriculture de précision dépend d'une variété d'information afin d'évaluer la variabilité spatiale des caractéristiques des cultures et du sol qui sont nécessaires à la gestion propre au site. Les différentes sources d'information transportent des informations complémentaires sur les cultures, le sol, et l'environnement, par la suite cette complémentarité nécessite une combinaison d'informations provenant de capteurs afin d'estimer avec précision les paramètres des cultures et du sol.

Pour une meilleure utilisation de technologie de l'information et la fusion de données, une solution intelligente a été proposée dans notre travail pour contrôler et superviser un environnement agricole.

L'objectif de ce chapitre est de présenter en détail l'implémentation technique et pratique de la solution proposée. Les résultats obtenus lors de l'implémentation sont présentés à la fin du chapitre.

V.2 Cahier des Charges

Afin de réaliser notre système de contrôle et de supervision, nous avons tracé de grandes lignes qui sont considérées comme des exigences de notre projet, ce qui rend l'objectif de ce travail clair et précis.

La figure V.1 montre l'architecture générale du système proposé pour la surveillance et de contrôle basé sur l'IdO. L'analyse de cette architecture permet de différencier cinq grandes parties à considérer.

V.2.1 Déploiement d'un réseau de capteurs

La collection de données nécessite une distribution bien étudiée des différents capteurs afin d'assurer un balayage surfacique et volumique de l'environnement et éviter toute influence indésirable entre les différents nœuds de capteurs.

V.2.2 Protocole de communication

L'échange de données entre l'environnement agricole et l'unité de traitement nécessite un protocole de communication bien déterminée.

V.2.3 Système de décision

La décision au niveau des serres nécessite une combinaison entre plusieurs paramètres.

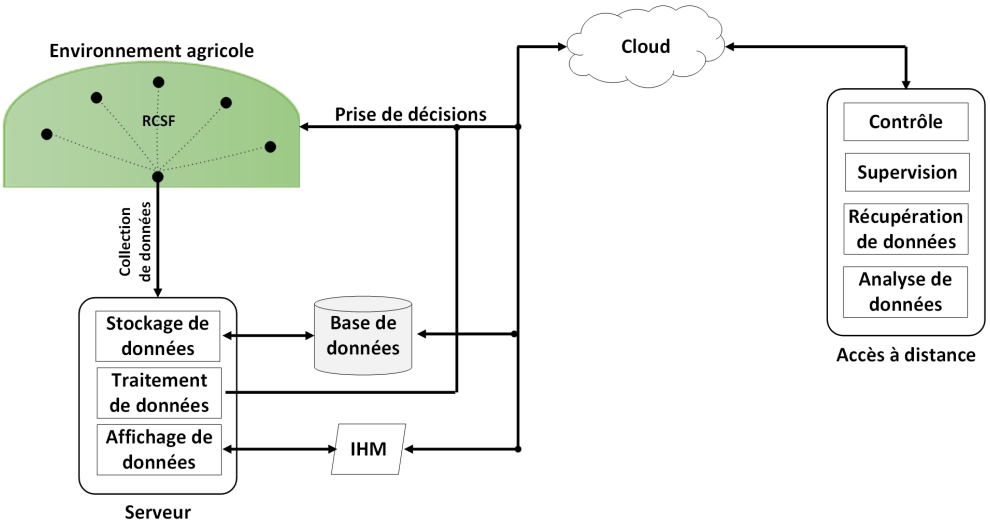


FIGURE V.1 – Architecture générale proposé du système de surveillance et de contrôle basé sur l'IdO

V.2.4 Interface Homme Machine

L'IHM est un outil très important par lequel, l'utilisateur peut contrôler et superviser l'environnement de n'importe où et n'importe quand.

V.2.5 Base de données

L'agriculture de précision peut être qualifiée d'agriculture de l'information, c'est-à-dire qu'elle repose sur la capacité à collecter, analyser et combiner de multiples informations afin de pouvoir prendre des décisions plus ciblées à la fois dans le temps et dans l'espace.

Pour stocker et bien gérer l'énorme quantité de données issues de plusieurs capteurs, la base de données est un outil nécessaire et important. La base de données développée permet de stocker une énorme quantité de données sur l'environnement agricole telles que la température, l'humidité, l'humidité du sol, le CO_2, la vitesse du vent, et autre pour prendre des décisions en temps réel et aussi d'exploiter ces données ultérieurement pour faire des analyses, modélisations de systèmes affin d'appliquer les différentes techniques d'intelligence artificielle.

V.3 Système proposé

Cette section décrit la solution proposée pour contrôler et surveiller un environnement agricole. La solution est basée sur l'installation de plusieurs nœuds sans fils accessibles et économiques dans un environnement agricole (une serre), ces nœuds contiennent des capteurs qui permettent de capter en temps réel les données des plantes et les conditions environnementales telles que le niveau d'humidité du sol, la température, et l'humidité de l'air, et des actionneurs (électrovanne, chauffage, ventilateur, etc.) pour contrôler l'environnement. Les différentes grandeurs physiques captées par les nœuds sont envoyées à un nœud collecteur (Sink) en utilisant la communication radiofréquence (RF). Le Sink collecte ces données et les transfère à une unité de traitement (Raspberry) par une liaison série. Une fois que les données sont collectées au niveau du serveur (Node -RED), un système de fusion et décision basé sur la logique floue traite ces données et il en résulte des commandes des différents actionneurs au niveau de la serre à travers le Sink. Les données issues des capteurs peuvent être stockées dans une base de données (MySQL). L'utilisateur peut surveiller les différentes grandeurs agricoles, envoyer des commandes et interroger la base de données localement ou bien à distance (Cloud) par l'utilisation d'une Interface Homme-Machine (IHM) basée sur la plateforme Node-RED.

La figure V.2 illustre la structure générale du système proposé.

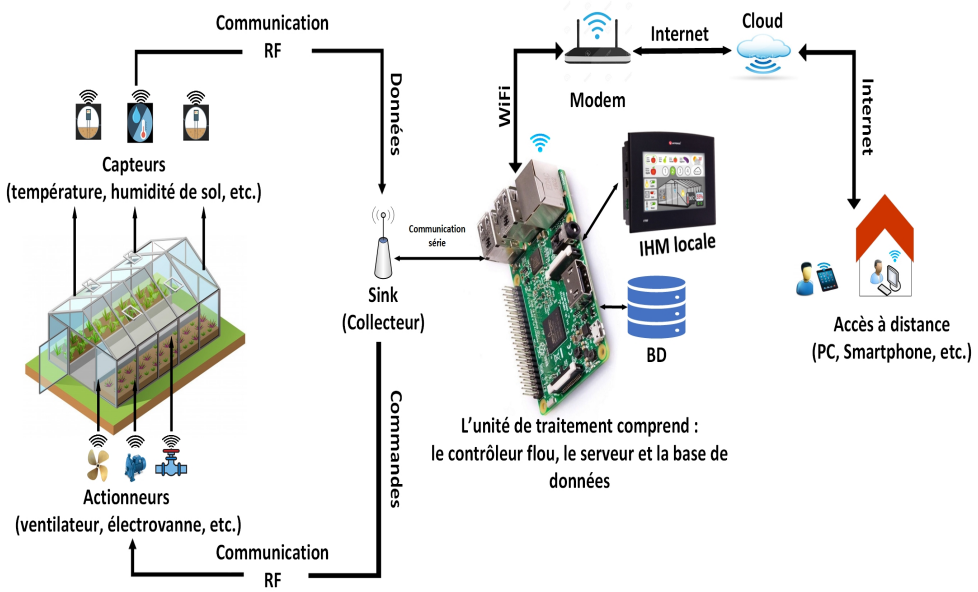


FIGURE V.2 – Structure générale du système proposé

Le système proposé peut être appliqué à plusieurs serres à la fois (Figure V.3), où les données de chaque serre sont envoyées vers le Sink selon un protocole de communication bien établi.



FIGURE V.3 – Communication multi-serres

Fournir un climat idéal et une quantité d'eau nécessaire et en temps réel sont deux conditions essentielles pour la bonne croissance des cultures. Dans ce contexte, notre travail consiste à contrôler le climat et l'irrigation.

V.3.1 Contrôle du climat

Le système proposé (Figure V.4) fournit une solution intelligente pour contrôler et superviser le climat dans la serre. Notre système se compose des nœuds simples installés dans la serre. Le premier nœud (Noeud 1) contient un capteur de température et d'humidité pour mesurer la température et l'humidité internes,les autres nœuds(Noeud 2,3,4 et 5) contiennent des actionneurs (ventilateurs, extracteur, chauffage, et humidificateur) pour contrôler le micro climat. Le nombre des nœuds dépend de la taille de la serre et l'emplacement des actionneurs, où d'autres nœuds peuvent être ajoutés. Les données collectées par le Nœud 1 sont envoyées vers le Sink (par des modules RF), qui transfère ces

données au serveur (Node-RED) afin d'être utilisées, traitées et stockées. Le contrôleur flou traite les données reçue et envoye ainsi des commandes vers la serre. Quand les nœuds reçoivent un signal du Sink, ils agissent en fonction du signal reçu pour agir sur l'actionneur correspondant.

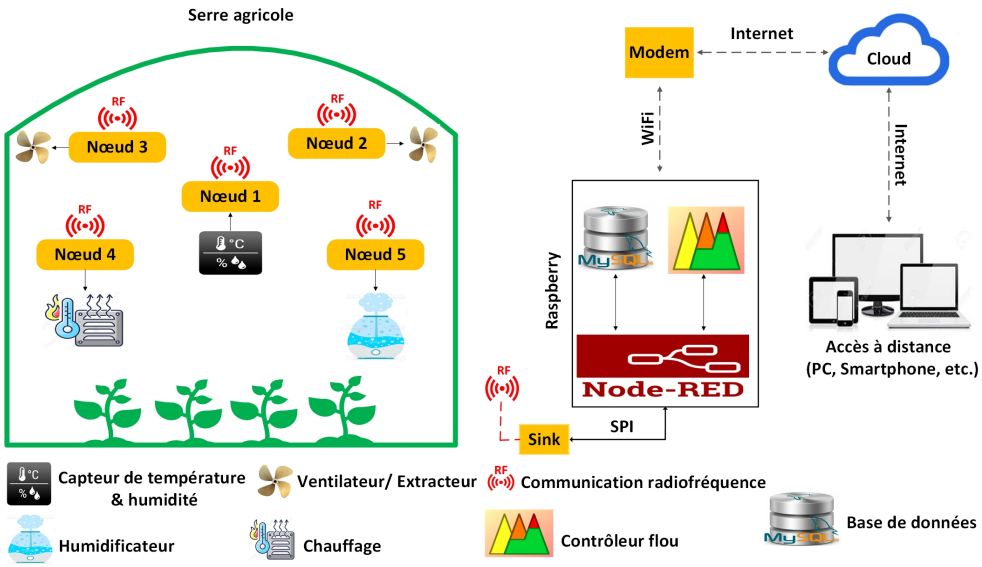


FIGURE V.4 – Architecture interne du système de contrôle et supervision du climat proposé

V.3.2 Contrôle d'irrigation

Un système d'irrigation intelligent basé sur le zonage a été développé en utilisant la structure illustrée par la figure V.5. Tout d'abord, la serre est divisée en plusieurs zones en fonction de sa taille et de la zone qui peut être couverte par le capteur. Chaque nœud contient un capteur (capteur d'humidité du sol) et un actionneur (électrovanne) qui sont installés au niveau de chaque zone. Puisque la température affecte le sol, un capteur de température est utilisé pour mesurer la température à l'intérieur de la serre. Les données mesurées sont envoyées au Sink par l'utilisation des modules de communication sans fil NRF, puis transmises au serveur Node-RED hébergé au niveau du Raspberry. Le contrôleur flou qui est situé au niveau du serveur permet de contrôler le temps d'irrigation pour chaque zone, c'est à partir de ce temps que des commandes ON/OFF sont envoyées aux différents nœuds pour irriguer la zone correspondante.

Le système adopté est une combinaison entre l'irrigation goutte à goutte et sillon. L'eau utilisée pour l'irrigation fourni par la pompe est véhiculée à l'intérieur d'un tuyau flexible acheminé entre les rangs de la culture de chaque zone en sillons séparés par 10 à 20 cm selon le type de sol (Figure V.5). Le tuyau est équipé de branches qui dirigent l'eau dans chaque sillon.

La mise en œuvre de la solution proposée a été faite en prenant en considération les contraintes suivantes :

- La non-linéarité et la complexité pour la modélisation et contrôle de la serre : contrôler le climat de la serre par les méthodes classiques est une tâche très complexe.
- La superficie des champs : irriguer une petite zone n'est pas la même chose qu'irriguer une grande zone.
- Portée du capteur : la zone couverte par le capteur, dans une zone immense, un seul capteur n'est pas suffisant.
- La non-linéarité du sol.

- Débit d'eau : le débit d'eau dépend de la longueur des tuyaux et de la distance depuis la source d'eau, en particulier dans les grandes zones.

- Le type de la plante : le même système peut être appliqué à n'importe quelle plante.

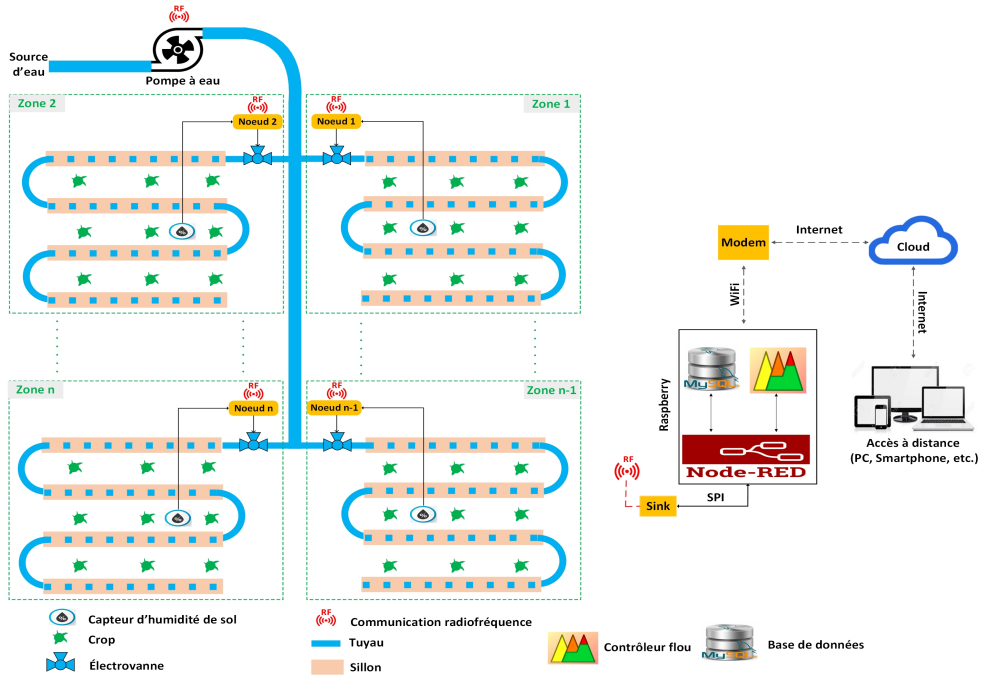


FIGURE V.5 – Architecture interne du système d'irrigation proposé

V.4 Implémentation du système proposé

Le système proposé est composé de quatre couches :

1. Couche de traitement et décision : contient les contrôleurs flous.

2. Serveur Node-RED.

3. Couche de communication : pour le transfert de données entre les différentes parties du système en utilisant la communication série et RF à l'aide d'une architecture RCSF.

4. Couche de stockage de données : basée sur MySQL.

V.4.1 Couche de traitement et décision

La gestion de la production dans une serre nécessite des décisions à plusieurs échelles. Ces décisions sont principalement liées aux conditions de croissance des cultures, à la période de culture et au contrôle de l'environnement. La régulation de l'environnement intérieur peut être effectuée par l'utilisation des actionneurs (chauffage, ventilateur, pompe, humidificateur, extracteur, électrovannes, et la pompe). Les réponses rapides et fréquentes sont nécessaires pour rendre le système adaptable aux conditions météorologiques alternées. Pour cela, un système de fusion basé sur logique floue (Figure V.6) a été proposé pour ce travail.
La logique floue est une meilleure approche pour les problèmes de prise de décision [41], car elle a la capacité d'imiter le raisonnement des êtres humains [269], la flexibilité et l'aptitude à gérer les

systèmes non linéaires et incertains [270]–[274].

Le système de fusion permet de combiner entre les différentes grandeurs agricoles (la température, l'humidité et l'humidité de sol) et prend les décisions adéquates pour fournir les conditions idéales nécessaire à la croissance de cultures. Ce système englobe deux systèmes flous : SF1 pour contrôler le climat ; et SF2 pour contrôler l'irrigation.

Les deux systèmes qui sont validés préalablement avec le toolbox "fuzzy" de Matlab sont développés en utilisant le langage python en adoptant les idées suivantes :

- Les deux formes triangulaire et trapézoïdale des fonctions d'appartenance sont décrites par des fonctions selon les équations V.1 et V.2 respectivement.
- Le degré d'appartenance correspondant à chaque valeur linguistique est calculé et stocké dans un vecteur (pour chaque entrée).
- Les règles sont déclarées sous forme d'une matrice.
- Les règles actives sont déterminées à l'aide des vecteurs correspondant aux degrés d'appartenance (par la multiplication des vecteurs de chaque entrée).
- Puisque les règles ET sont utilisées, le minimum entre les deux degrés correspondant à une règle active est obtenu.
- Les règles actives sont comparées à la matrice des règles afin d'obtenir les valeurs linguistiques de la sortie.
- La valeur maximale est calculée dans le cas de deux règles ou plus résulté sur la même valeur linguistique de sortie.
- Pour obtenir la valeur numérique de sortie du système flou, une défuzzification est effectuée en utilisant la méthode du centre de gravité (COG). Trois formes géométriques possibles sont obtenues (figure V.7). L'abscisse du COG de la forme finale obtenue est la valeur numérique de la sortie selon l'équation V.3 (S : surface ; C_g : centre de gravité).

$$Tri(x) = \begin{cases} 0 & if \quad x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & if \quad a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & if \quad b < x \leq c \\ 0 & if \quad x > c \end{cases} \tag{V.1}$$

$$Trap(x) = \begin{cases} 0 & if \quad a \leq x \\ \frac{x-a}{b-a} & if \quad a < x < b \\ 1 & if \quad b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & if \quad c < x < d \\ 0 & if \quad x \geq d \end{cases} \tag{V.2}$$

$$Sortie = \frac{\sum_{i=1}^{5} S(i) * C_g(i)}{\sum_{j=1}^{5} S(j)} \tag{V.3}$$

V.4.1.1 Système flou 1 (SF1)

Le contrôle du climat des serres est une procédure compliquée étant donné le nombre de variables qui y sont associées et la dépendance des unes aux autres, et surtout la température et l'humidité [271]. La technique de contrôle logique floue a été utilisée pour surmonter les problèmes à la non linéarité et à la complexité du système. En particulier, la corrélation entre la température et l'humidité a été abordée à ce niveau de la table des règles. Le SF1 proposé est illustré par la figure V.8, les variables

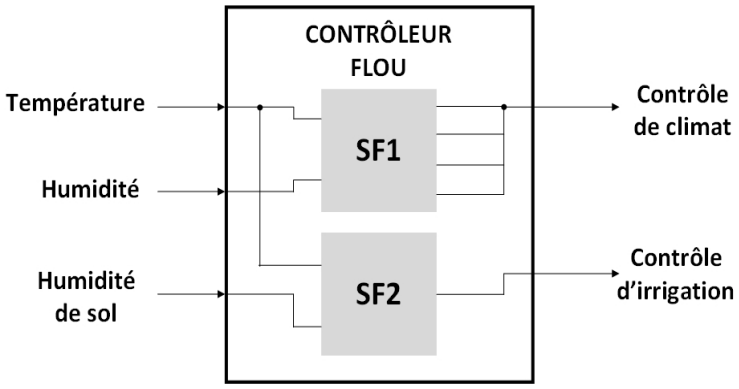


FIGURE V.6 – Système de fusion basé sur logique floue

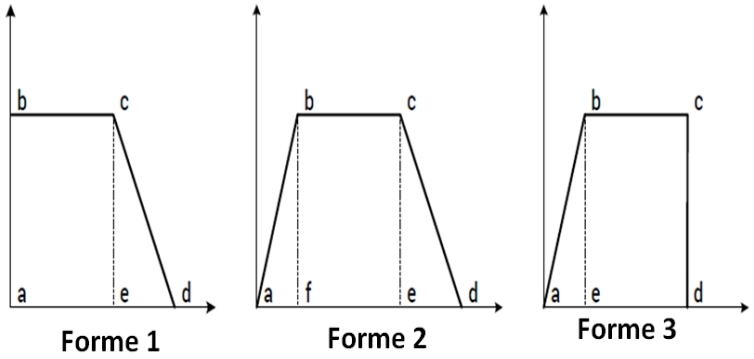


FIGURE V.7 – Formes géométriques possibles obtenues après l'inférence

d'entrée sont : (T_{ref} – T_{in}), c'est la différence entre la température de référence et la température intérieure T_{in}. (H_{ref} – H_{in}) différence entre l'humidité de référence et l'humidité intérieure H_{in}. Les variables de contrôle sont la durée de ventilation (D_vent), de chauffage (D_chau), d'humidification (D_hum), et d'extraction (D_extr).

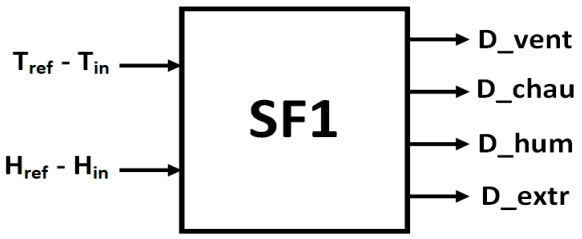


FIGURE V.8 – Système flou 1

— **Fonctions d'appartenance**

Les fonctions d'appartenance associées aux ensembles flous d'entrées et de variables de contrôle sont présentées par la figure V.9. Les deux entrées sont définies par cinq variables linguistiques : Négative Grande 'NG', Négative Moyenne 'NM', Zéro 'Z', Positive Moyenne 'PM', Positive Grande 'PG'. En outre, les variables de contrôle sont définies par cinq variables linguistiques : Très Court 'TC', Court 'C', Moyen 'M', Longue 'L', Très Longue 'TL'.

— **Base des règles**

Le SF1 qui est géré par 25 règles est basée sur la relation entre la température et l'humidité. Ces règles sont basées sur l'inférence de Mamdani. Le tableau V.1 montre certains de ces règles.

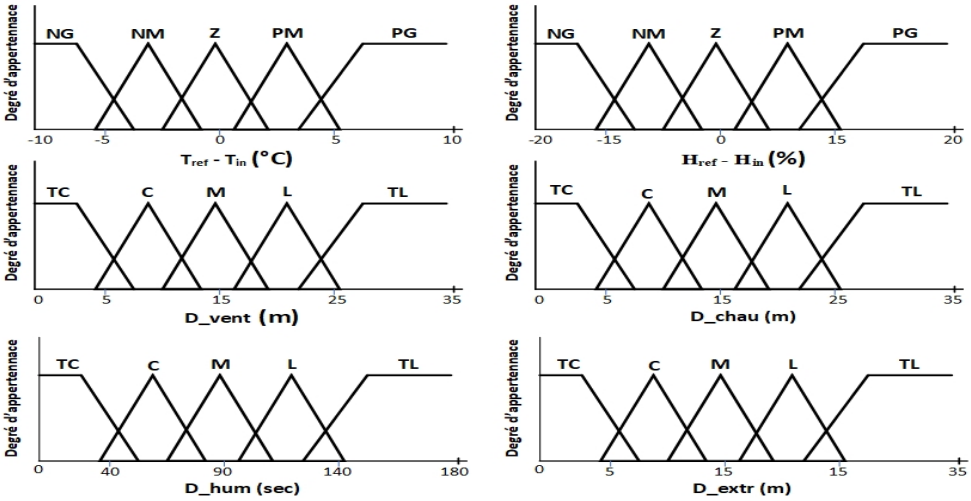


Figure V.9 – Fonctions d'appartenances de SF1

Table V.1 – Certaines règles de SF1

Règle	Entrées		Sorties			
	T_{ref} - T_{in}	H_{ref} - H_{in}	D_vent	D_chau	D_hum	D_extr
1	NG	NG	TL	0	0	TL
2	NM	NM	M	0	0	C
3	PM	NM	0	C	0	0
4	PM	PM	0	C	M	0
5	PG	PG	0	M	TL	0
...	...	...	...	...	...	...

V.4.1.2 Système flou 2 (SF2)

Comme l'environnement du sol est caractérisé par une grande inertie, une non-linéarité et un fort couplage, il est difficile d'établire un modèle mathématique exact et précis [275]. En effet, un système flou a été adopté puisqu'il n'y est pas besoin d'avoir un modèle mathématique, juste une expertise et une bonne configuration des différents éléments du système sont nécessaires. La figure V.10 montre le système flou proposé qui permet de calculer la durée d'irrigation (D_irr) de chaque zone en fonction de la température de la serre (Temp) et la différence entre le consigne et l'humidité de sol actuelle (Err).

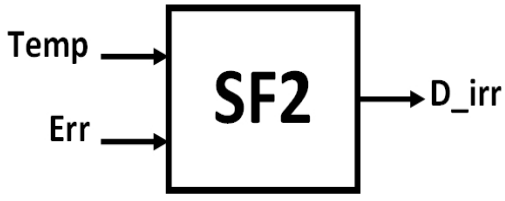


Figure V.10 – Système flou 2

— **Fonctions d'appartenance**

Chaque entrée et sortie a cinq fonctions d'appartenance (deux trapézoïdales et trois triangulaires). La première entrée (Temp) est décrite par cinq variables linguistiques Très Froid 'TF', Froid 'F', Tiède 'T' , Chaud 'Ch', Très chaud 'Tch', la deuxième entrée (Err) est également décrite par cinq termes linguistiques Zéro 'Z', Petite 'P', Moyenne 'M', Grande 'G', Très Grande 'TG' et les cinq valeurs linguistiques de sortie (T_irr) sont Très Court 'TC', Court 'C' , Moyen 'M' , Longue 'L', Très Longue 'TL' . La figure V.11 donne des détails sur les fonctions d'appartenance et les univers du discours.

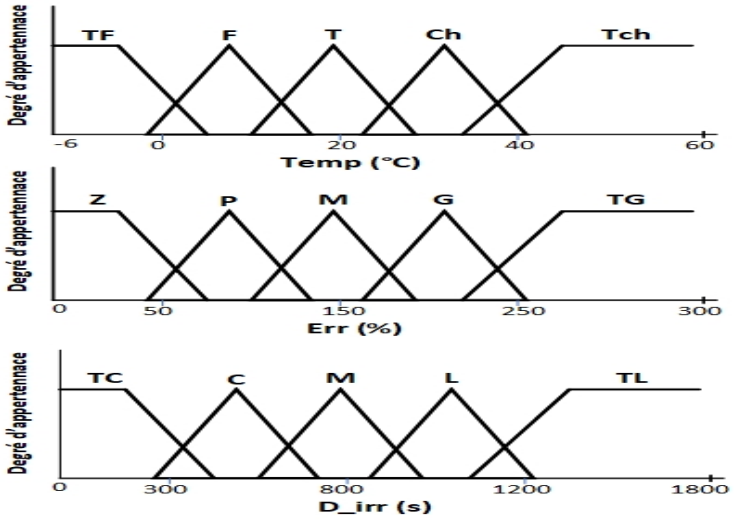


FIGURE V.11 – Fonctions d'appartenances de SF2

— **Base des règles**

L'humidité du sol est l'eau stockée dans le sol qui sont affectées par les précipitations, la température du sol et d'autres paramètres. L'interaction entre l'humidité du sol et ses facteurs est prise en considération lors de l'établissement des règles. 25 règles basées sur l'inférence de Mamdani sont utilisées dans le système flou. Certaines de ces règles sont données par le tableau V.2.

TABLE V.2 – Certaines règles de SF2

Règle	Entrées		Sortie
	Temp	Err	D_irr
1	T	P	TC
2	Ch	P	C
3	F	M	M
4	TF	G	M
5	Tch	TG	TL
...	...	...	...

La combinaison du contrôleur flou (CF) avec la stratégie de zonage peut être considérée comme une solution pour l'optimisation de la consommation de l'eau et de l'énergie.

L'algorithme d'optimisation a été intégré dans le CF grâce au bon choix de trois paramètres importants :

- Le type des fonctions d'appartenance des entrées et des sorties.
- Le nombre de fonctions d'appartenance pour chaque variable.
- Les règles utilisées.

Ces choix ont été faits de manière optimale en se basant sur savoir d'un expert et de tests expérimentaux. L'environnement de la serre (taille, localisation, sol, etc.) et la capacité des actionneurs sont prises en considération.

V.4.2 Serveur Node-RED

Le serveur Node-RED est le cœur de notre système. En effet, il permet de faire le lien entre les trois couches et aussi la gestion des différentes tâches du système.

Charger le serveur par ces différentes tâches offre plusieurs avantages comme la libération des mémoires et l'allégement des fonction des microcontrôleur relatifs aux nœuds ce qui permet de prolonger la durée de vie des batteries des nœuds où son rôle sera réservé juste à l'émission et la réception de données

V.4.2.1 Structure générale du système développé sous Node-RED

La figure V.12 montre la structure générale du système développé sus Node-RED, il se compose de sept blocs principaux : réception de données, traitement de données, séparation de données, opérations sur la base de données, récupérations des conditions météorologiques affichage des données et bloc émission des commandes.

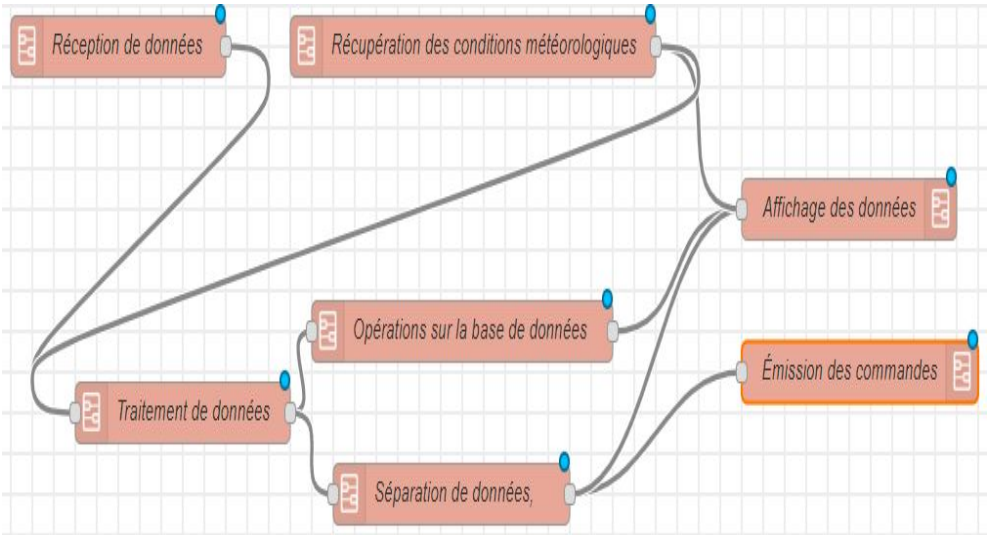


Figure V.12 – Structure générale du système développé sous Node-RED

V.4.2.1.1 Réception de données

C'est le bloc responsable de lire les données de l'environnement agricole issues du Sink et les consignes de régulation de la plante choisie par l'utilisateur à travers IHM (dashboard de Node-RED). La figure V.13 illustre l'architecture interne de ce bloc, il se compose de :

- Nœud 'serial in' : pour lire les données envoyées par le Sink à partir d'un port série local (COM12).
- Nœud 'button' : pour sélectionner la plante à cultiver à travers l'IHM.
- Des fonctions pour stoker les valeurs de Sink et les valeurs de références de la plante considérées dans des variables (Sink, temp_ref, Hum_ref,Hsol_ref, CO2_ref, Lum_ref) à travers la commande 'global.set'.
- Une fonction de concaténation (Figure V.14) : Le bloc de traitement contient un nœud avec une seule entrée (Figure V.15), car il n'est pas possible de transférer plusieurs grandeurs séparément à la fois vers ce nœud. Pour assurer le transfert de toutes les données en même temps, cette fonction a été utilisée, où elle permet de regrouper les différentes données dans un seul vecteur avant les transférer vers le bloc de traitement. Les données stockées par les différentes fonctions sont appelées par la commande 'golbal.get' et concaténées dans un

vecteur de format 'string' séparées par espace (l'opérateur '+= 'est utilisé pour concaténer les différentes valeurs).

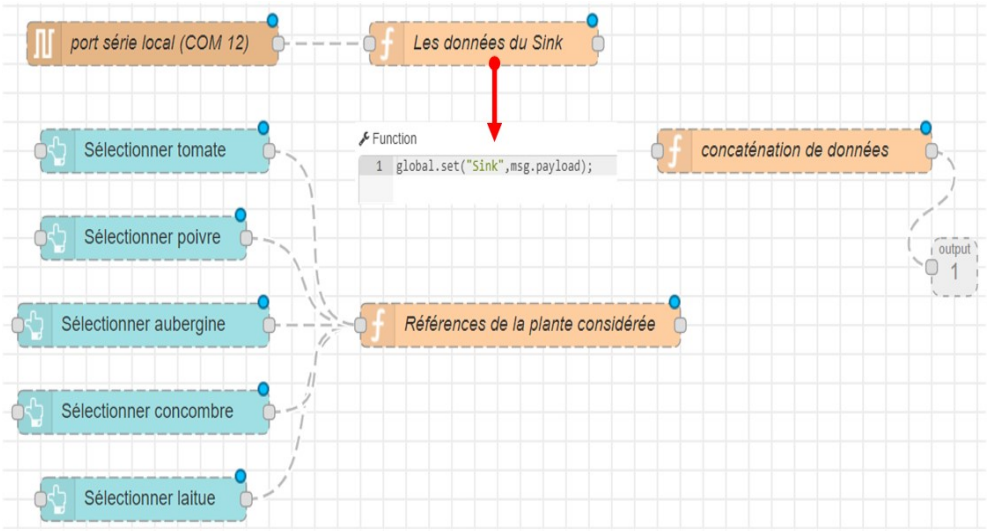


Figure V.13 – Architecture interne du bloc de réception de données



Figure V.14 – Concaténation des données

V.4.2.1.2 Traitement de données

Le bloc de traitement de données contient le nœud 'pythonshell in' (figure V.15). Ce nœud permet de faire l'exécution du programme python développé relatifs aux systèmes flous (programme de SF1, SF2 et programme de gestion de la base de données). Les arguments envoyés par le bloc précédent au script à travers l'entrée de nœud sont capturés par python et placés dans une liste appelée 'sys.argv'. La commande 'sys.argv [1]' lit le seul argument fourni au script. Pour séparer les données de cet argument la commande split() a été utilisée. La figure V.16 illustre le principe de réception des arguments.

Les sorties du script python seront envoyées à la sortie du nœud. La donnée pouvait être directement envoyée vers la sortie avec la commande "print" facilement, mais ça devient plus compliqué lorsqu'il y a deux ou plusieurs données, puisqu'on a besoin de préciser la position de chaque donnée. Autre problème est celui de la conversion de chaine de caractères qui est un éternel problème en informatique.



FIGURE V.15 – Nœud pythonshell in

```
import sys
rec= sys.argv[1]     # Réception d'argument
dr=rec.split()       # Splits une chaîne en une liste
Temp=float(dr[0])    # 1er donnée
Hum=float(dr[1])     # 2eme donnée
```

FIGURE V.16 – Réception des arguments à travers 'pythonshell in'

Pour éviter tous ces problèmes, il faut mettre en forme les données et indiquer à chaque fois à quoi elle correspond. Pour cela, le format 'JSON'(JavaScript Object Notation) est utilisé. Le JSON est une mise en forme structurée des données de type nom/valeur, où elle permet de stocker l'information de manière organisée et à accès facile. L'avantage, c'est qu'il est supporté par tous les langages modernes. C'est même la structure de données par défaut du JavaScript (langage sur lequel repose Node-RED). La figure V.17 illustre le principe d'envoyer les données par format JSON où chaque ligne de données est séparée par une virgule.

```
Valeur1= ;
Valeur2 = ;

Valeurn = ;

print("{\"V1\":",Valeur1,",\"V2\":",Valeur2,...,\"Vn\":",Valeurn,"}")
```

FIGURE V.17 – Échange de données par format 'JSON'

V.4.2.1.3 Séparation de données

La sortie de 'pythonshell in' délivre une trame de données qui se compose de plusieurs variables de type 'string' (les données issues de Sink, les sorties des systèmes flous, etc.), donc il faut séparer ces données pour les afficher séparément et aussi pour envoyer les commandes vers le Sink. C'est la raison pour laquelle la fonction 'json' a été utilisée. Cette fonction permet de convertir les données de type 'string' en données de type 'objet'. La fonction 'json' doit être suivi par plusieurs fonctions (Temperature, Humidity, etc.), chaque fonction représente un type de donnée, où le nombre de données envoyé par le bloc de traitement est le même nombre de fonctions qui sont reliées directement à la sortie de nœud 'json'. La figure V.18 montre le principe de la fonction 'json'.

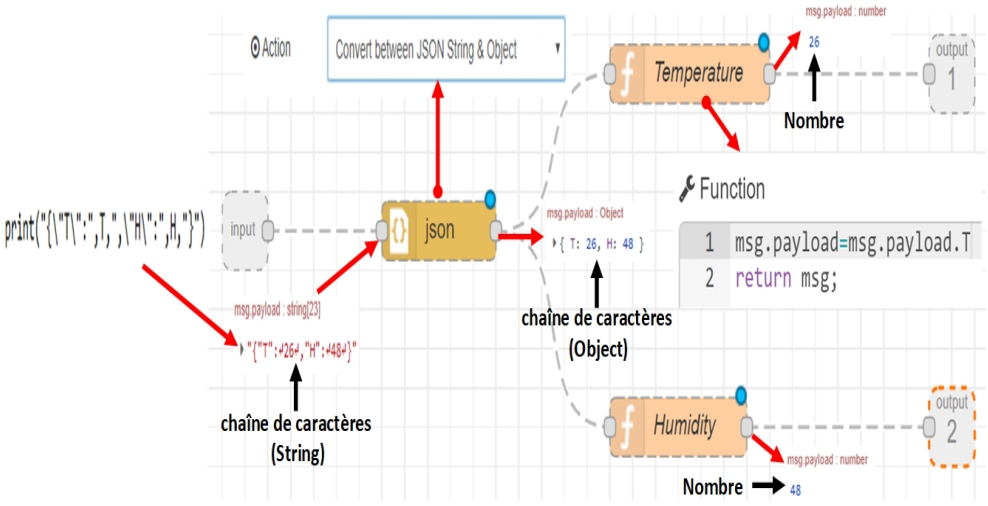


FIGURE V.18 – Séparation de données par 'json'

V.4.2.1.4 Récupération des conditions météorologiques

Ce bloc permet d'obtenir les données environnementales à l'extérieur des serres sans l'utilisation des capteurs. On a utilisé le service OpenWeatherMap [276] (Figure V.19) qui permet d'accéder aux données météorologiques actuelles pour n'importe quel endroit sur la terre, où il suffit d'accéder au site web et sélectionner la zone considérée. La météo actuelle est fréquemment à jour. En préalable, il faut s'inscrire auprès de ce site et récupérer une clé API qu'il faudra fournir au nœud openweathermap (Figure V.20), ce nœud reçoit le bulletin et les prévisions météorologiques comme :

- description - une brève description verbale du temps actuel pour la lecture humaine.
- tempc - la température actuelle à l'endroit choisi en degré Celsius.
- humidity - l'humidité relative actuelle à l'endroit choisi en pourcentage.
- windspeed - la vitesse actuelle du vent en mètres par seconde.
- winddirection - la direction actuel du vent.

Les données sont disponibles en format JSON. La figure V.21 illustre la structure interne de bloc des conditions météorologiques.

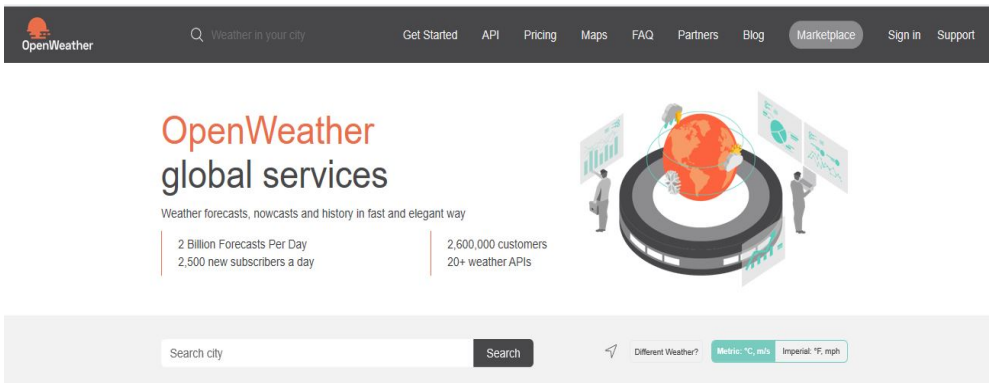


FIGURE V.19 – Service OpenWeather [276]

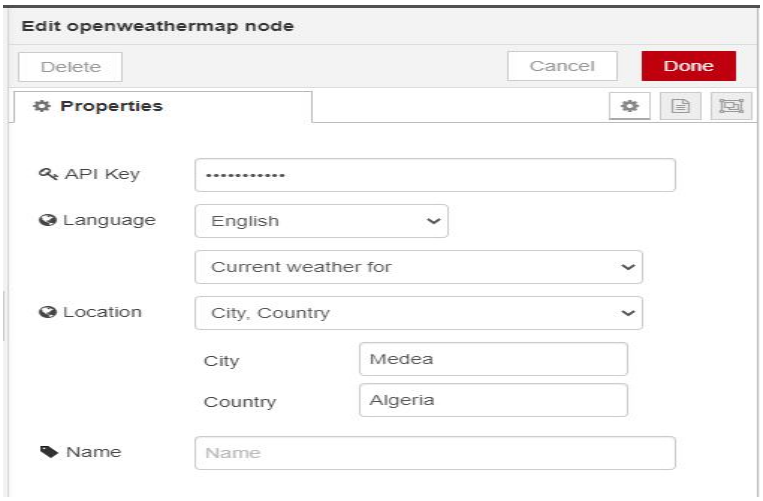


FIGURE V.20 – Configuration interne de nœud openweathermap

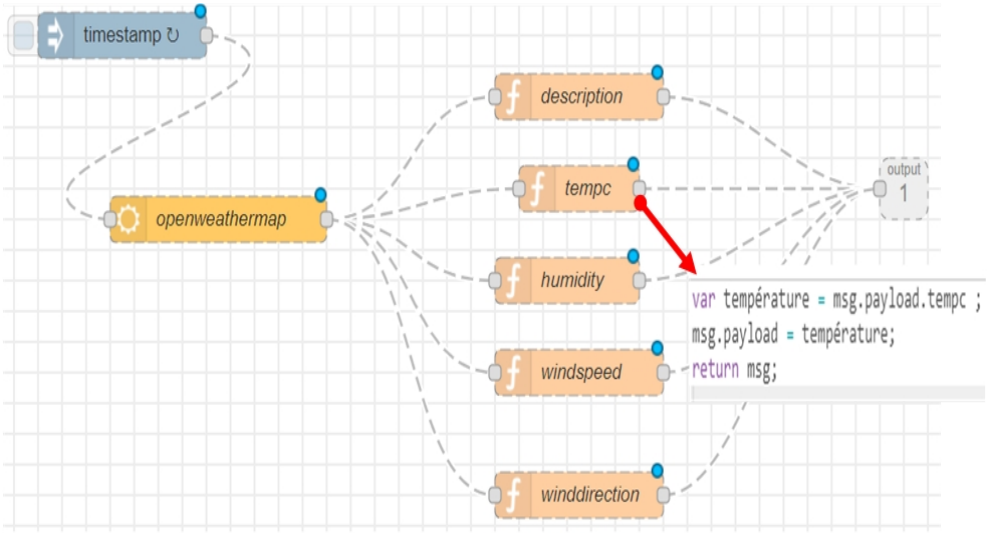


FIGURE V.21 – Structure interne de bloc des conditions météorologiques

V.4.2.1.5 Opérations sur la base de données

Ce bloc permet à l'utilisateur d'accéder à la base de données via l'IHM et visualiser l'historique de données stockées. Il est divisé en deux parties :

1. Partie pour obtenir les données d'un temps fixe (Figure V.22.a) où :
   - Nœud date picker est utilisé pour sélectionner la date.
   - Nœud time picker est utilisé pour sélectionner le temps.
   - Nœud Date/Time formatter pour convertir la chaîne de caractères de date/heure en un texte bien formaté afin d'utiliser cette valeur plus tard avec le nœud db.
   - La fonction SQL permet de trouver les paramètres correspondants à l'id du temps sélectionné.
   - Les fonctions permettent de lire les différents paramètres de la base de données (température, lumière, humidité de sol, etc.).

2. Partie pour obtenir les données relatives à une période de temps (Figure V.22.b) où :

   - Deux nœuds date sont utilisés pour sélectionner la date de début et la fin.
   - La fonction SQL permet de trouver les paramètres correspondants aux toutes les id de la période sélectionnée.

L'historique de données peut être stocké dans des fichiers (.txt, .csv, etc.). Le flux développé à la figure V.23 permet à l'utilisateur de récupérer cet historique par email.

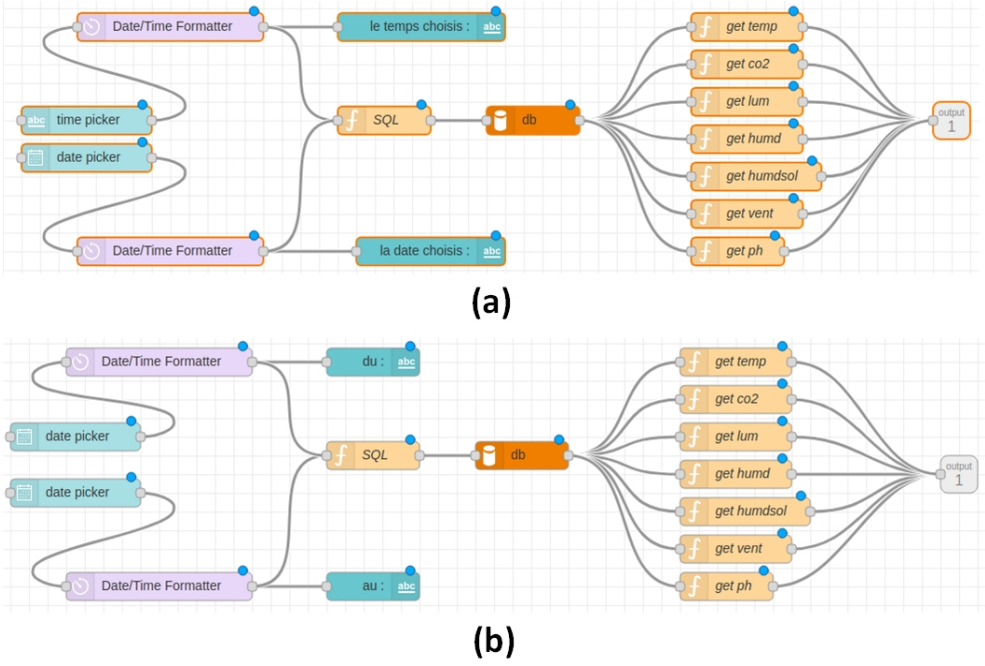


FIGURE V.22 – Flux d'historique de données : (a) historique d'un temps fixe ; (b) historique relatif à une période de temps

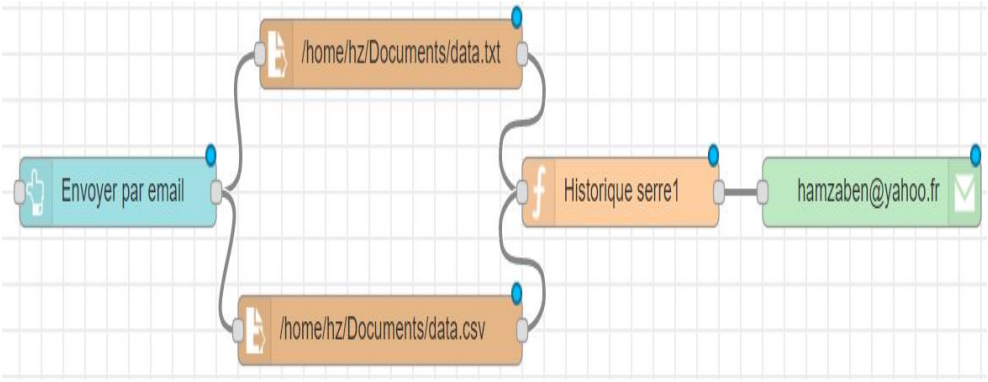


FIGURE V.23 – Flux d'envoyer l'historique de données par email

V.4.2.1.6 Affichage de données

L'un des objectifs principaux de l'IHM est l'affichage des données. En effet, ce bloc permet d'afficher les différentes variables séparées par le bloc précédent par l'utilisation des nœuds de la figure V.24, où le nœud :

- 'chart' et 'gauge' sont utilisés pour montrer la variation des différentes grandeurs climatiques (température, humidité, etc.).
- 'media' pour créer un moyen facile pour afficher des images (pour les différents actionneurs et type de plantes) sur dashboard.
- 'led' pour indiquer l'état des différents actionneurs (ON : vert ; OFF : rouge).
- 'text' permet d'afficher des messages et des commentaires sur la page web (dashboard).
- ' ui control' et 'button' ont été utilisés pour permettre un certain contrôle dynamique du tableau de bord (dashboard).
- 'template ' permet de formater un widget dans le dasboard en utilisant HTML, CSS (Cascading Style Sheets), des directives JS angulaires, des directives SVG et nécessite donc une configuration spécifique.
- 'mysql' a été utilisé pour permettre un accès de base à la base de données MySQL, où on peut lire la dernière valeur stockée dans la base de données pour chaque colonne et l'afficher (Figure V.25).

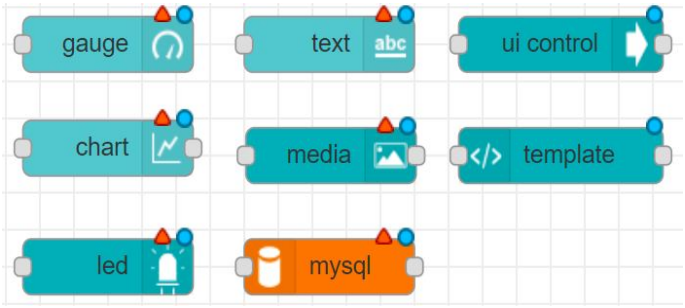


FIGURE V.24 – Nœuds utilisés pour l'affichage de données

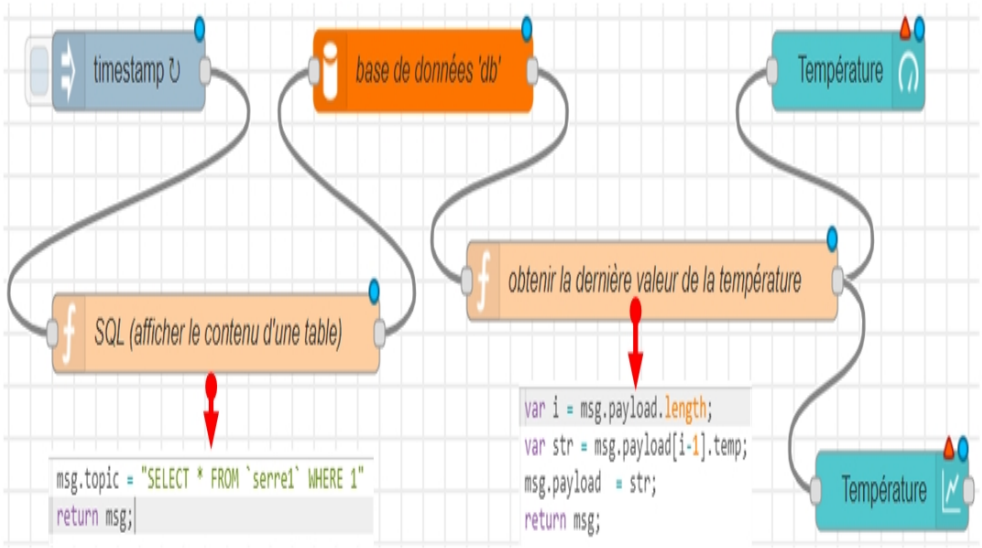


FIGURE V.25 – Affichage de la dernière valeur de température stockée dans la base de données

Pour que les composants d'affichage soient bien disposés sur la page web, il faut les mettre dans des tableaux (tab) (Page d'accueil, Supervision, Historique de données, Météorologique, Type de la plante,Contrôle manuel, et Image en direct), où chaque tableau contient plusieurs groupes (group)

(Temps fixe, Période de temps, Aller à, Météo, Température, Humidité, Aller à, etc.) pour rendre notre IHM bien organisé et facile à manipuler. Les tableaux et les groupes créés sont illustrés par la figure V.26, où chaque nœud doit être configuré selon son groupe.



FIGURE V.26 – Tableaux et groupes d'affichage

V.4.2.1.7 Émission des commandes

Les décisions des systèmes flous sont transférées vers le Sink par l'utilisation de nœud 'serial out' (figure V.27) à partir d'un port série local (COM12).

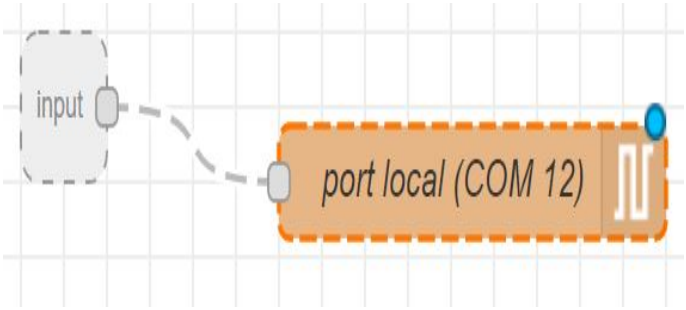


FIGURE V.27 – Nœud 'serial out'

V.4.2.2 Exposer Node-RED à l'internet

Node-RED fonctionne sur Raspberry localement, et si on veut y accéder à distance (par : PC, Smartphone, etc.), on aura besoin de connaître l'adresse IP du Raspberry, mais cela n'a aucun sens sur internet, car c'est une adresse locale et on peut accéder seulement localement.

Pour y remédier, on a besoin d'exposer notre serveur à l'internet, en ouvrant le port 1880 (port Node-RED) et le rendre public. Pour ce faire, nous avons suivi les étapes suivantes :

- Accéder au routeur utlisé de type Huawei HG532e (Figure V.28) à travers l'adresse : *http ://192.168.1.1/.*
- Aller à Mappage de port et autoriser l'accès aux ports suivant (Figure V. 29) :

- Port 1880 : port occupé par Node-RED.

- Port 80 HTTP (HyperText Transfer Protocol) : protocole utilisé pour transférer des données sur le Web.

- Port 443 HTTPS (HyperText Transfer Protocol Secure) : la version sécurisée de HTTP.

- Port 21 FTP (File Transfer Protocol) : protocole standard pour la transmission de fichiers entre un client et un serveur sur un réseau informatique.

- Port 22 SSH (Secure Shell) : protocole qui permet de faire des connexions sécurisées entre un serveur et un client SSH.

- On peut aussi ouvrir le port 3306 (port MySQL) pour accéder aussi à notre base de données à distance.

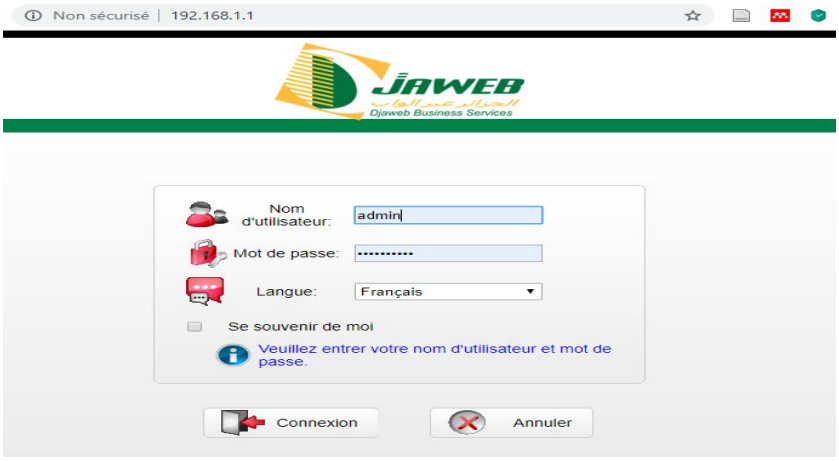


FIGURE V.28 – Connexion au routeur Huawei HG532e

Mappage du port — Nouveau

Nom de mappage	Interface	Protocole	Hôte distant	Port initial externe	Port externe de fin	Port interne
Noderedport	INTERNET_R_0_38	TCP/UDP		1880	1880	1880
Web server HTTP	INTERNET_R_0_38	TCP/UDP		80	80	80
Web server HTTPS	INTERNET_R_0_38	TCP/UDP		443	443	443
FTP	INTERNET_R_0_38	TCP/UDP		21	21	21
SSH	INTERNET_R_0_38	TCP/UDP		22	22	22

FIGURE V.29 – Mappage du port

V.4.2.3 Service DDNS

Puisque les adresses IP ne sont pas très conviviales et les FAI (Fournisseurs d'Accès à Internet) ne donnent pas des adresses fixes, on peut configurer notre serveur (par un DNS : Domaine Name System) afin d'y faciliter l'accès.

DDNS (Dynamic DNS) est un service qui met à jour automatiquement et périodiquement l'adresse IP. Il permet à l'utilisateur d'accéder à un serveur ou bien un site web facilement par un lien spécifique même s'il ne connait pas son adresse IP actuelle. Toutefois, il existe certains serveurs qui dispensent ce service gratuitement comme : FreeDNS, Securepoint DynDNS, Dynu, DynDNS Service, DNSdynamic, DuckDNS, no-IP (utilisé dans notre projet), etc.

Le serveur no-IP [277] a été utilisé dans notre travail (Figure V.30), où un hostname (hamzaben.ddns.net) a été créé pour distinguer notre Raspberry, comme l'indique la figure V.31.a (le hostname doit être confirmé tous les 30 jours). Le hostname a un code (IP/Target) qui change avec le changement de l'adresse IP du Raspberry. Dès que l'adresse IP du Raspberry change, le routeur signale l'adresse IP actuelle au service DDNS à travers l'application DUC (Figure V.31.b), qui fait la mise à jour de cette adresse et la relie au code de notre hostname. La figure V.32 montre le principe de DDNS, où l'utilisateur utilise le hostname 'hamzaben.ddns.net' pour accéder au Raspberry sans connaitre son adresse IP actuel.

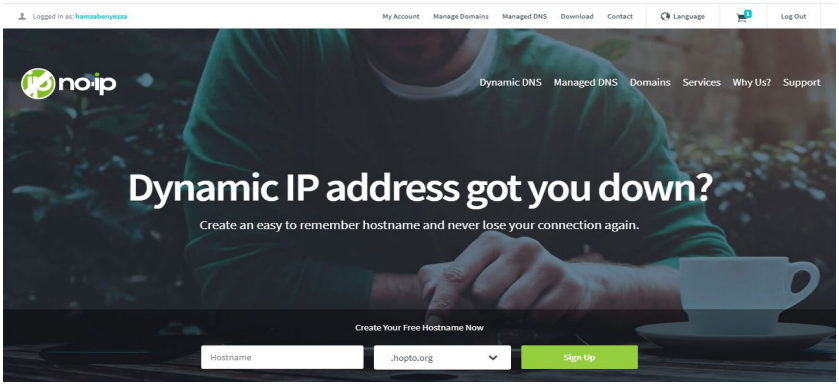


FIGURE V.30 – Serveur no-IP [277]

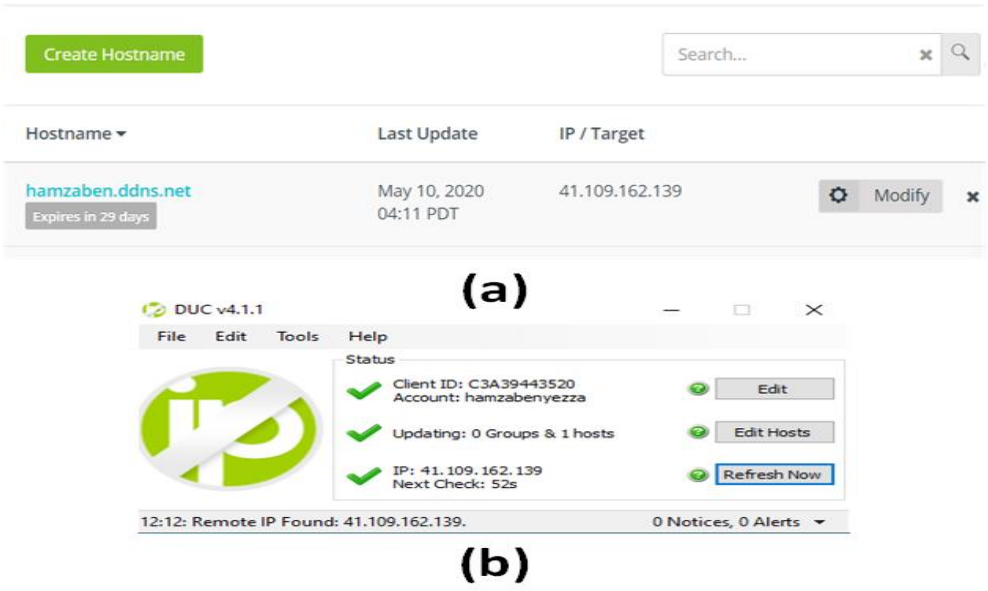


FIGURE V.31 – Configuration du serveur no-IP : (a) créer un hostname ; (b) mis à jour l'adresse IP avec l'application DUC

V.4.2.4 Sécuriser Node-RED

Par défaut, l'éditeur Node-RED n'est pas sécurisé ; quiconque peut accéder à son adresse IP et faire des modifications. Pour cette raison, on doit le protéger par un identifiant et un mot de passe

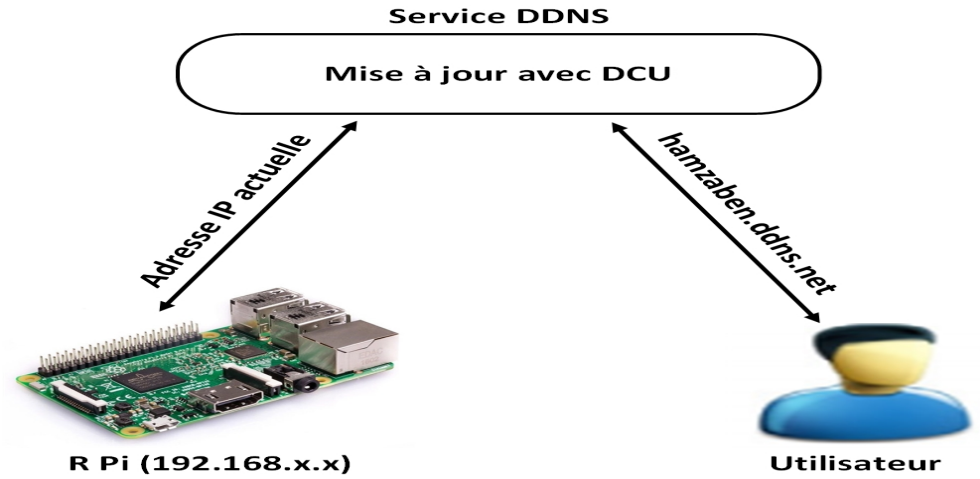


Figure V.32 – Principe du service DDNS

afin de sécuriser notre système et d'empêcher des personnes extérieures d'y accéder.

Cette section décrit les étapes suivies pour sécuriser le serveur Node-RED. La sécurité est divisée en deux parties : sécurisation de l'éditeur et admin API et sécurisation des nœuds HTTP et du Node-RED dashboard.

V.4.2.4.1 Sécurisation de l'éditeur et admin API

Pour activer l'authentification sur l'éditeur et admin API il faut décommenter la propriété 'adminAuth' dans le fichier de paramètres (settings.js) comme indique la figure V. 33.
La propriété 'users' permet de définir plusieurs utilisateurs, dont chacun peut avoir des autorisations différentes. Dans notre cas on a défini deux utilisateurs. Le premier (BENYEZZA) a la permission absolue (permissions :'*') et le deuxième (user1) a l'accès pour faire seulement la supervision (permissions :'read').

V.4.2.4.2 Sécurisation des nœuds HTTP et du Node-RED dashboard

Les nœuds "HTTP In" peuvent être sécurisées par authentification de base. La propriété 'httpNodeAuth' dans le fichier 'settings.js' peut être utilisée pour définir un nom d'utilisateur et un mot de passe qui seront autorisés à accéder aux routes (figure V.33). L'accès à tout contenu statique défini par la propriété "httpStatic" peut être sécurisé en utilisant la propriété "httpStaticAuth" (Figure V.33), qui utilise le même format.

L'utilisateur peut accéder à l'éditeur Node-RED et Node-RED dashoard à travers les adresses *http ://hamzaben.ddns.net :1880* et *http ://hamzaben.ddns.net :1880/ui* respectivement en utilisant un nom d'utilisateur et un mot de passe (Figure V.34).

V.4.3 Couche de communication

Comme il est indiqué précédemment, deux modes de communication sont utilisés (communication RF et série).

V.4.3.1 Communication série

La communication série a été adopté pour faire la liaison entre le Sink (composé d'un Arduino et un module nRF) et le serveur (Raspberry) puisque la communication RF entre un Arduino et un

```
// Securing Node-RED
 // -----------------
 // To password protect the Node-RED editor and admin API, the following
 // property can be used. See http://nodered.org/docs/security.html for details.
 adminAuth: {
   type: "credentials",
    users: [{
       username: "BENYEZZA",
         password: "$2a$08$OZOgeYSH1BegvYCtr7JOq.HBI61RvJ87Qq7u.DXa3qhLShAB.15XK",
         permissions: "*"    //full access
     }]
 },
 // User1  SUPERVISION
adminAuth: {
     type: "credentials",
    users: [{
       username: "user1",
         password: "$2a$08$zZWtXTja0fB1pzD4sHCMyOCMYz2Z6dNbM6tl8sJogENOMcxWV9DN.",
        permissions: "read"    //only supervision
     }]
 },
 // To password protect the node-defined HTTP endpoints (httpNodeRoot), or
 // the static content (httpStatic), the following properties can be used.
 // The pass field is a bcrypt hash of the password.
// See http://nodered.org/docs/security.html#generating-the-password-hash
 httpNodeAuth: {user:"BENYEZZA",pass:"$2a$08$OZOgeYSH1BegvYCtr7JOq.HBI61RvJ87Qq7u.DXa3qhLShAB.15XK"},
 httpStaticAuth: {user:"BENYEZZA",pass:"$2a$08$OZOgeYSH1BegvYCtr7JOq.HBI61RvJ87Qq7u.DXa3qhLShAB.15XK"},
```

FIGURE V.33 – Fichier settings.js



FIGURE V.34 – Sécurisé Node-RED : (a) mot de passe pour l'éditeur Node-RED ; (b) mot de passe pour Node-RED dashboard

Raspberry n'est pas fiable. La communication entre le Sink et le serveur est réalisée sur le port série de l'Arduino (Sink) comme suit :

- Le Sink commence la communication par l'émission d'un paquet de données contient les informations issues de plusieurs capteurs, ces données sont séparées par un espace comme indique sur la figure V.35.a, pour faciliter la concaténation au niveau du serveur.

- Le Sink reçoit des commandes ON/OFF sous forme d'indices bien définis, et les stocke dans des variables avant d'être envoyés aux nœuds (Figure V.35.b).

V.4.3.2 Communication RF

V.4.3.2.1 Protocole de communication

— **Problématique**

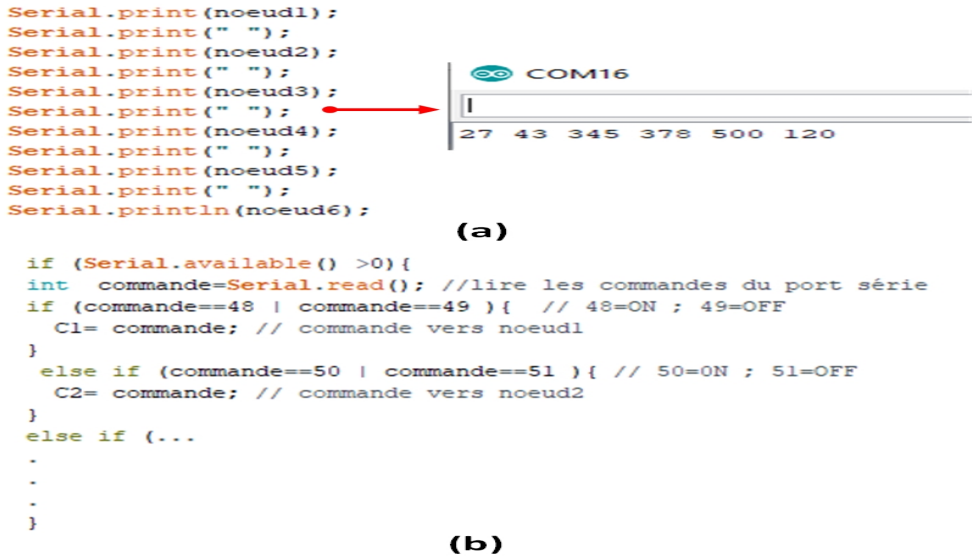


FIGURE V.35 – Communication série entre le Sink et serveur Node-RED : (a) émission de données ; (b) réception des commandes

La collection de toutes les données au niveau du Sink nécessite un protocole de communication bien étudié et établi, où :

- Les modules de transmission peuvent être utilisés soit en mode émission ou en mode réception. À cet effet, pour gérer le flot d'informations émises et reçues, une certaine gestion du mode de transmission est nécessaire.

- Le balayage entre les différents nœuds pour récupérer leurs données, nous oblige à proposer un protocole de communication cohérent.

- Au niveau de Sink, pour gérer les commandes provenant du serveur via le port série d'un côté et les données provenant des nœuds à travers une communication RF d'une autre côté, nous avons le besoin d'établir un protocole de communication cohérent.

— **Transaction avec accusé**

Le protocole ShockBurst support plusieurs scénarios de communication : Transaction simple, Transaction avec accusé, Transaction avec perte de paquet de données, etc.

Dans notre projet on a adopté le mode de transaction avec accusé comme solution efficace de la problématique posée, nous exploitons l'accusé de réception (ACK) pour transmettre les données des différents nœuds installés au niveau de la serre au Sink (ça permet au nœud de communique en deux modes et en même temps) autrement, il fait l'émission et la réception en même temps.
Le principe de ce scénario est illustré sur la figure V.36. Le Sink commence la communication avec les nœuds un par un sur le même pipe où chaqu'un possède une adresse. Le Sink commence le premier cycle de communication en envoyant un paquet de données (TX : PID1_1) au premier nœud (Noeud1). Une fois que ce dernier reçoit tout le paquet, il attend 130 µs puis envoie un accusé de réception (ACK1_1) au Sink. Après la réception du premier accusé le Sink commence la communication avec les autres nœuds et ainsi de la même manière jusqu'au dernier nœud (Nœud n). À la réception du paquet ACK1_n, le cycle est terminé. Le Sink transfère les données des différents capteurs au serveur et reçoit des commandes du serveur (via le port série), ensuite commence le cycle suivant.
Les variables considérées dans la serre ont une dynamique lente. Pour cette raison et pour économiser la consommation d'énergie, la durée de chaque cycle, a été fixée à une seconde, ce qui est plus que suffisant pour lire les données de tous les nœuds par le Sink.

Dans notre projet on a trois catégories des nœuds : nœuds contenants des capteurs et des actionneurs ; nœuds contenants uniquement des capteurs et d'autres ne contenants que des actionneurs, donc trois scénarios de communication sont proposés :

- Scénario 1 : Capteurs et actionneurs (Figure V.37.a)
  Lorsque le nœud reçoit les commandes ON/OFF (sous forme d'indices) provenant du Sink, il charge l'accusé de réception par la valeur du capteur (Humidité de sol), puis il envoie l'acquittement.

- Scénario 2 : Uniquement des Capteurs (figure V.37.b)
  Le Sink envoie un paquet vide et reçoit un accusé contient les valeurs de capteur (Température et Humidité).

- Scénario 3 : Uniquement des actionneurs (Figure V.37.c)
  Le nœud reçoit une commande ON/OFF (indice) et envoie un accusé de réception vide.

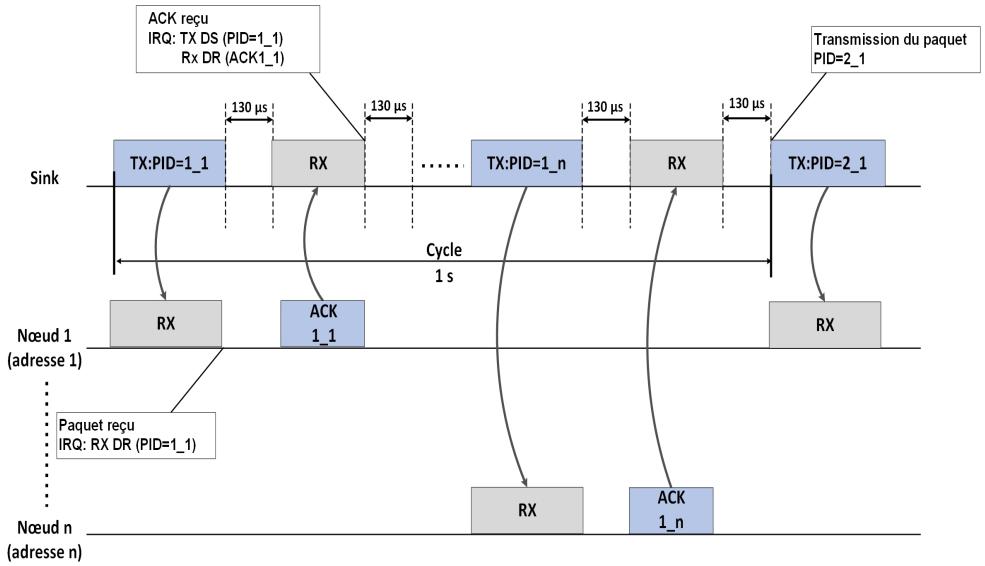


Figure V.36 – Protocole de communication basé sur la transaction avec accusé

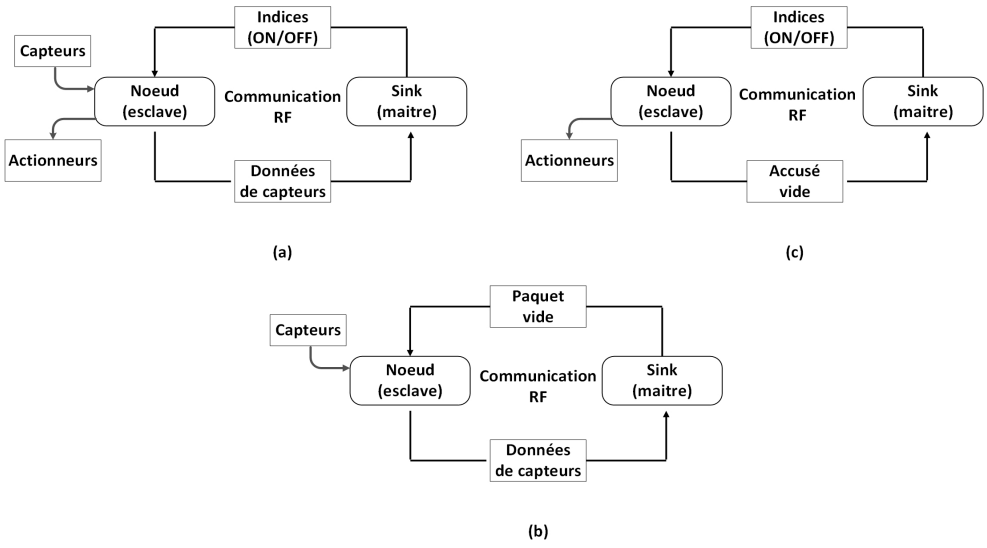


Figure V.37 – Communication maitre/esclave : (a) scénario1 ; (b) scénario2 ; (c) scénario3

V.4.3.2.2 Implémentation de protocole

La communication sans fil par le module nRF24L01+ nécessite l'installation de la bibliothèque <RF24>, cette dernière est destinée à gérer les différents registres du module nRF24L01+ (bande fréquentielle utilisée, le débit de transmission, etc.) [278].

— **Initialisation**

Premièrement, on fait appeler les bibliothèques <SPI.h>, <nRF24L01.h> et <RF24.h>, ensuite on a configuré le brochage des pines CE et CSN par la commande 'RF24 radio (CE_PIN , CSN_PIN)'. Après on attribue une adresse pour chaque nœud (esclave), les données considérées sont comme suit :

- dataToSend : La donnée que le Sink va l'envoyer vers les nœuds .
- ReceivedData :La donnée reçue par le nœud.
- ackData : c'est un vecteur réservé pour les données de retour reçues par acquittement (les données des capteurs).

La figure V.38 illustre l'initialisation qui a été faite au niveau de Sink.

```
#include <SPI.h>
#include <nRF24L01.h>
#include <RF24.h>
#define CE_PIN   9
#define CSN_PIN 10
RF24 radio(CE_PIN, CSN_PIN); // crée une Radio de communication
const byte numSlaves = 3;  // nombre des noeuds
const byte slaveAddress[numSlaves][5] = {          // les adresses des noeuds
                            {'R','x','A','A','A'},    //noeud1
                            {'R','x','A','A','B'},    //noeud2
                            {'R','x','A','A','C'}     //noeud3
                          };
int dataToSend;
int C1,C2,C3;  // les commandes récu par le serveur
// vecteur de commandes
int v[3]={C1,C2,C3};

float ackData[3]={0,0,0}; // les valeurs de capteurs {noeud1,noeud2,noued3}
float ACK; // accusé
```

Figure V.38 – Initialisation du Sink

— **Configuration du Sink**

La configuration se fait par des fonctions prédéfinies dans la bibliothèque RF24, la partie qui suit explique cette configuration où on a configuré :

- Début de communication sans fil : La fonction radio.begin ( ) démarre la communication.
- Vitesse de communication : on fait un appel à la fonction radio.SetDataRate ( ) pour définir le débit de communication, soit à 250Kb/s, 1Mb/s, 2Mb/s.
- Activation de mode accusé (ACK) : par l'utilisation de la fonction radio.enableAckPayload( ).

- Configuration de pipe : configurer pour l'écriture, l'émission, et la lecture pour la réception, en précisant l'adresse de chaque Noeud.

— **Fonctionnement du Sink**

Pour assurer le basculement entre les nœuds et le bon fonctionnement du Sink sans perdre aucune information, l'algorithme illustré par la figure V.39 a été développé, où le Sink communique avec les nœuds un par un comme suite :

- Le Sink ouvrir le canal de communication avec le nœud récepteur (radio.openWritingPipe(adresse)).
- Le Sink envoie la commande reçue par le serveur (dataToSend) au nœud correspondant par la fonction 'radio.write (dataToSend, sizeof (dataToSend))'.
- Le Sink reçoit les accusés (ACK) de la part de chaque nœud (radio.read(& ACK, sizeof(ACK))), ces derniers sont stockés dans un vecteur (ackData) pour les transférer vers le serveur.

```
  // appeler chaque esclave à son tour
for (byte n = 0; n < numSlaves; n++){
dataToSend= v[n];
  // ouvrir la pipe d'écriture avec l'adresse d'un esclave
  radio.openWritingPipe(slaveAddress[n]);

  bool rslt;
  // envoyer la commande vers le noeud correspondant
  rslt = radio.write( &dataToSend, sizeof(dataToSend) );
  // réception de l'accusé
  if (rslt) {
      if ( radio.isAckPayloadAvailable() ) {
          radio.read(&ACK, sizeof(ACK));
          newData = true;
      }
  ackData[n]=ACK; // Stocké les accusés dans un vecteur
```

Figure V.39 – Fonctionnement du Sink

— **Configuration des nœuds**

Au niveau de chaque nœud, on a développé un algorithme qui assure trois tâches différentes :

- Première tâche : Obtenir les données nécessaires (température, humidité, humidité de sol, CO2, etc.).
- Deuxième tâche :

- Recevoir les données émises par le Sink (ReceivedData).
- Charger l'accusé (ACK) par les données des capteurs.
- Envoyer l'accusé de réception (ACK) vers le nœud collecteur (Sink).

- Troisième tâche : recevoir les commandes provenant du serveur pour les actionneurs et les exécuter.

Les données envoyées (dataToSend) par le Sink, les données reçues (ReceivedData) par chaque nœud et l'accusé de réception (ACK) qui englobe les données de capteurs sont illustrés par les moniteurs correspondants donnés par la figure V.40.

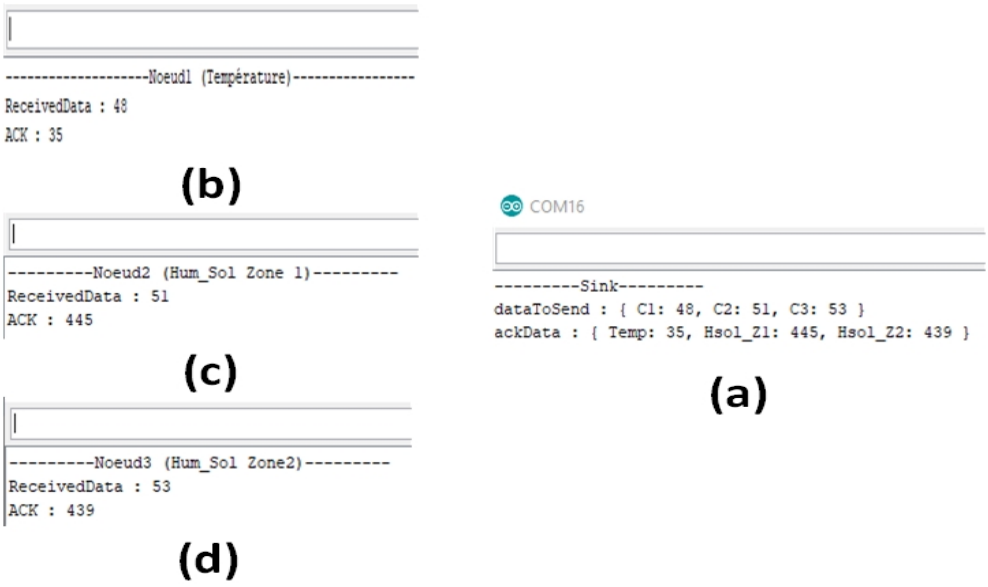


Figure V.40 – Communication multi-transceiver avec accusé : (a) Sink ; (b) Noeud1 ; (c) Noeud2 ; (d) Nœud3

V.4.4 Couche de stockage de données

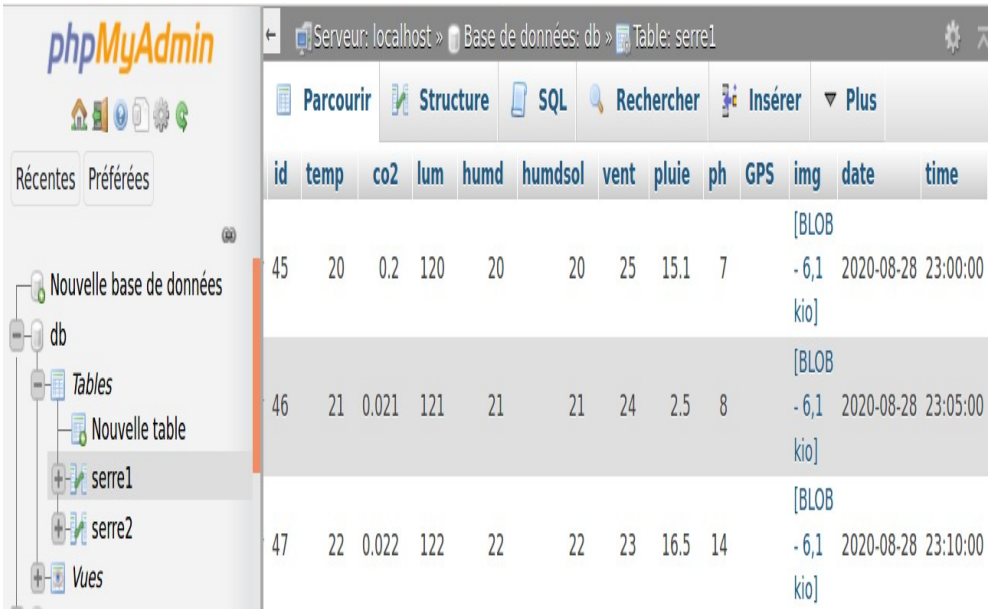
En adoptant les étapes mentionnées dans le chapitre précèdent et à travers le développement d'un programme python pour organiser le stockage des données, une base de données (Figure V.41) a été créée dans notre projet pour stoker les différents paramètres agricoles. Elles sont organisées dans plusieurs tables (serre1, serre2, etc.) pour stocker les données climatiques de plusieurs serres. Chacune de ces tables contient 13 colonnes de différents types :

- Le champ "Id" (numéro d'identification) est de type *INT, PRIMARY* et *Autoincrémental.*
- Les champs "temp" (température), CO_2, lum (taux de lumière), humd (humidité), humdsol (humidité de sol), vent, pluie et ph sont de type *FLOAT.*
- Le champ "GPS" est de type *TEXT* pour les coordonnées géographiques.
- Le champ "img" (image) est de type *LONGBLOB* pour les images capturées par la caméra installée dans la serre.
- Le champ "date" est de type *DATE* pour la date actuelle.
- Le champ "time" est de type *TIME.*

Selon la base de données développée, les données peuvent être stockées d'une manière bien organisée et sécurisée pour les exploiter ultérieurement : effectuer des analyses, modélisations, et autres.

V.5 Résultats de tests et discussions

Les résultats de notre thèse sont divisée en deux parties : Résultats du contrôle de climat et le contrôle d'irrigation.



id	temp	co2	lum	humd	humdsol	vent	pluie	ph	GPS	img	date	time
45	20	0.2	120	20	20	25	15.1	7		[BLOB - 6,1 kio]	2020-08-28	23:00:00
46	21	0.021	121	21	21	24	2.5	8		[BLOB - 6,1 kio]	2020-08-28	23:05:00
47	22	0.022	122	22	22	23	16.5	14		[BLOB - 6,1 kio]	2020-08-28	23:10:00

FIGURE V.41 – Table de données de la serre1

V.5.1 Contrôle du climat

La Figure V.42 montre la réalisation hardware, au niveau du laboratoire LSEA de l'Université de Médéa, du système proposé pour contrôler et superviser le micro climat d'une serre, où un prototype de la serre a été réalisé et connecté aux différents éléments. Puisque la serre considérée est de petite dimension, deux nœuds (Arduino) sont installés. Le premier contient un capteur DHT22 pour mesurer la température et l'humidité à l'intérieur de la serre et le deuxième contient quatre actionneurs (ventilateur, chauffage, humidificateur et extracteur) pour contrôler le climat.

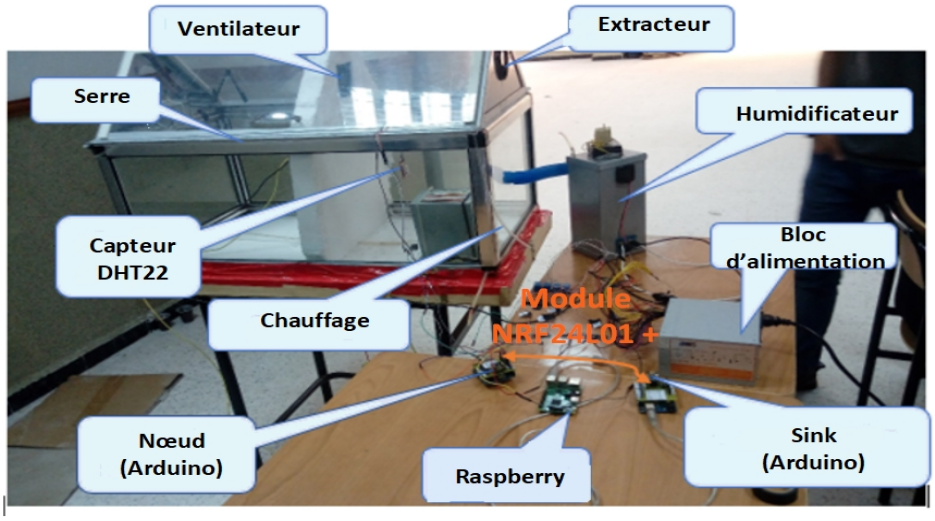


FIGURE V.42 – Réalisation hardware de système de contrôle et supervision d'une serre

Dans le but de montrer l'influence de la température sur l'humidité et l'importance de la fusion entre les deux grandeurs, des tests sont effectués, où trois cas sont considérés :

- Cas 1 : on a mesuré la température et l'humidité à l'intérieur de la serre à l'état normal où aucune action de contrôle n'est effectuée pendant quatre minutes.

- Cas 2 : une action de chauffage a été effectuée pendant quinze minutes et on a mesuré la

température et l'humidité.

- Cas 3 : La température et l'humidité sont mesurées sous l'influence d'une action de ventilation pendant seize minutes.

La figure V.43 illustre l'évaluation de la température et de l'humidité dans les trois cas, où :

- La température et l'humidité interne varient en fonction de l'état extérieur (cas1), mais le climat intérieur n'est pas toujours favorable (elles dépendent aux conditions extérieures).

- Le taux de chauffage fourni par le système de chauffage (cas 2) a augmenté la température interne, mais en même temps il a diminué l'humidité.

- L'action de ventilation (cas 3), au contraire de l'action de chauffage, a diminué la température et a augmenté l'humidité.

Donc, les résultats de la figure V.43 montre l'impact de la température sur l'humidité et la complexité du contrôle de climat à l'intérieur de la serre avec des contrôleurs classiques et indépendants et aussi la nécessité fusionner entre les deux grandeurs pour la prise de la bonne décision. Le contrôle séparé de chaque grandeur ne permet pas d'atteindre les performances souhaitées et en plus il consomment de l'énergie.

Pour cette raison, SF1 a été proposé dans notre travail, où il a permis de faire la fusion entre la température et l'humidité et ainsi appliquer une commande intelligente en prenant en compte l'interaction entre les deux grandeurs avec réduction de la consommation d'énergie. Dans certains cas, le système applique une seule action pour régler les deux grandeurs, par exemple dans le cas où la serre est un peu humide et le climat un peu froid. Le SF1, dans ce cas applique l'action de chauffage (Règle 3 de tableau V.1) pour régler les deux grandeurs en même temps sans y appliquer les deux actions (chauffage et extraction).

Afin de maintenir la température et l'humidité à leur valeur souhaitée, le système flou (SF1) proposé a été appliqué pour contrôler le fonctionnement de différents actionneurs.
Les valeurs de la température et de l'humidité avec le contrôleur flou (SF1) sont illustrées dans les figures V.44 et V.45 respectivement. Comme prévu, les résultats des mesures ont montré que le contrôleur flou gère efficacement le climat intérieur de la serre, où la température et l'humidité à l'intérieur de la serre sont stabilisées autour des points de référence 28 (°C) et 38 (%) respectivement.

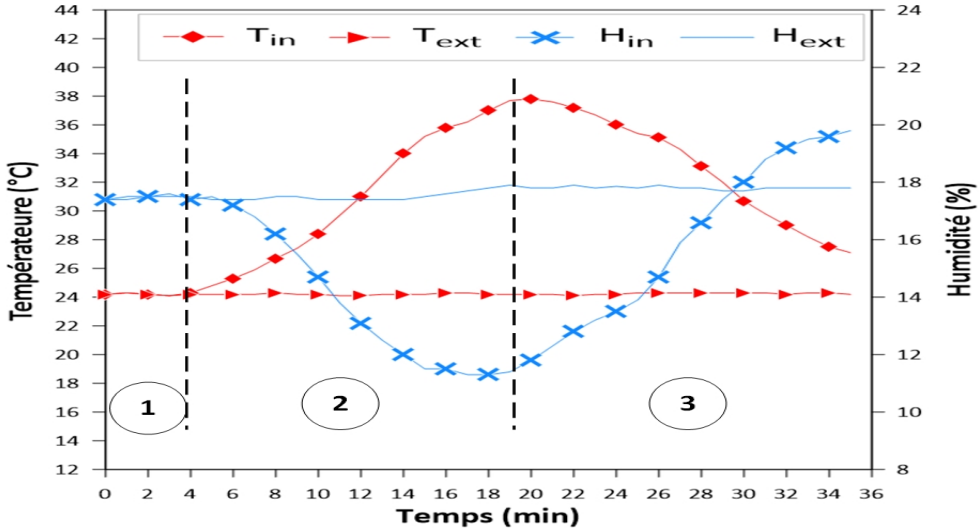


FIGURE V.43 – Évaluation de la température et de l'humidité à l'intérieur de la serre : (1) sans contrôle ; (2) avec action de chauffage ; (3) avec action de ventilation

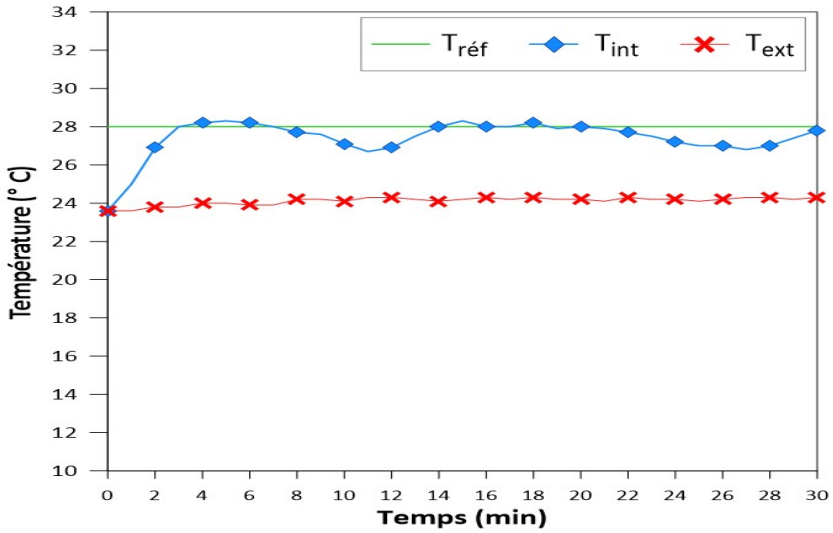


FIGURE V.44 – Évaluation de la température avec le contrôleur flou SF1

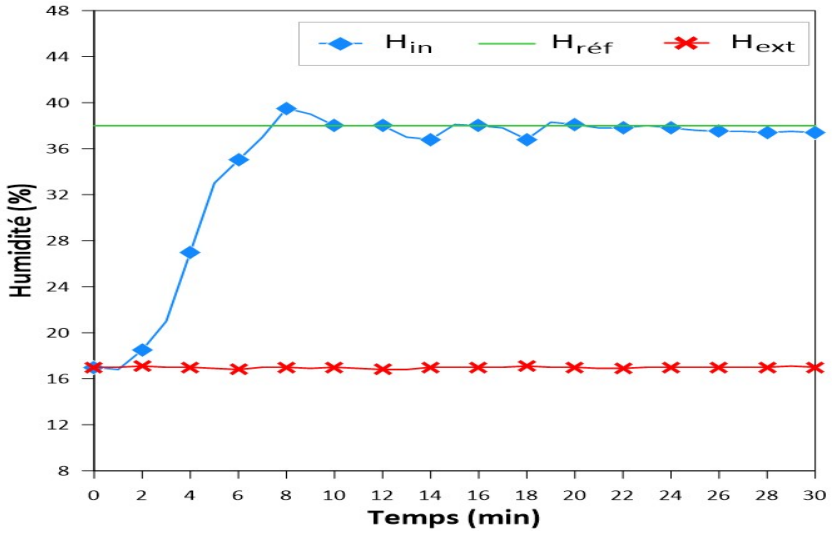


FIGURE V.45 – Évaluation de l'humidité avec le contrôleur flou SF1

V.5.2 Contrôle d'irrigation

Le système proposé pour l'irrigation est implémenté et testé dans un champ réel de six mètres carrés pour irriguer les cultures de tomates pendant huit jours ; du 28 juillet au 4 août 2019. La surface considérée est divisée en deux zones. Chacune contient un nœud sans fil contenant une électrovanne et un capteur d'humidité du sol (Figure V. 46.a, Figure V. 46.b). Un troisième nœud est également installé pour mesurer la température ambiante (Figure V. 46.c). La figure V.46.d montre le Raspberry utilisé avec le Sink.

La figure V.47 montre le nœud installé dans chaque zone qui se compose de : (a) Arduino nano ; (b) module nRF24L01+ ; (c) capteur YL-69 ; (d) batterie ; (e) électrovanne.

Les valeurs de l'humidité du sol correspondant aux deux zones avec le contrôleur flou pour différentes valeurs de température de l'environnement (Figure V.48) pendant les huit jours est illustrée sur la figure V.49. Comme prévu, ces résultats montrent que le contrôleur flou gère efficacement l'humidité du sol, qui a été varié avec succès autour de la valeur de référence (450%) fixée par l'utilisateur, où elle est stabilisée entre 400% et 500%, ce qui correspond aux conditions idéales pour la plante considérée.

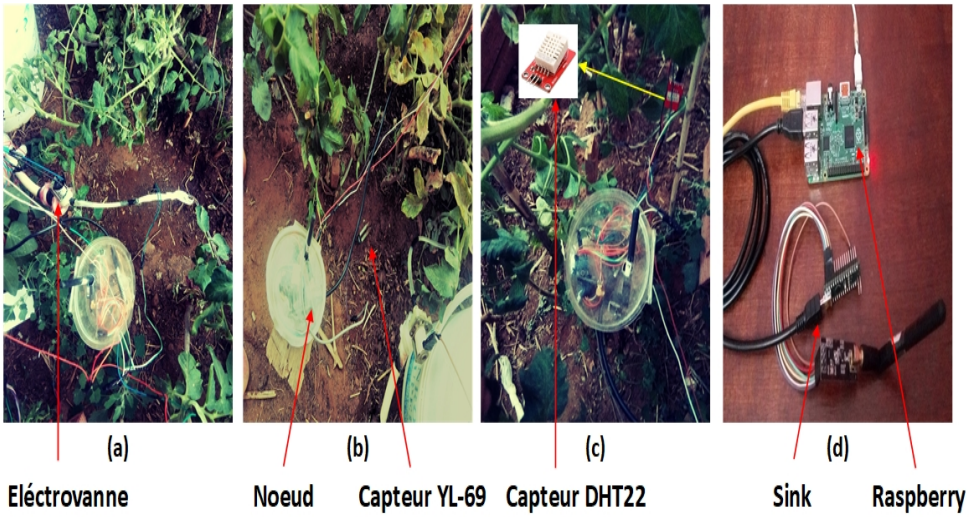


FIGURE V.46 – Implémentation hardware du système d'irrigation proposé

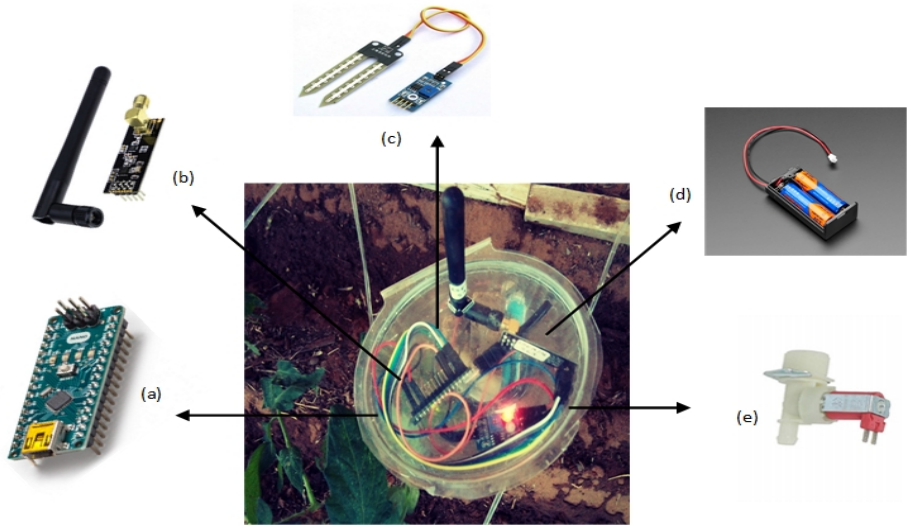


FIGURE V.47 – Composants du nœud sans fil utilisé : (a) Arduino nano ; (b) module nRF24L01+ ; (c) capteur YL-69 ; (d) batterie ; (e) électrovanne.

V.5.2.1 Validation de la stratégie proposée

Pour valider le système d'irrigation proposé, une comparaison avec trois autres méthodes d'irrigation a été effectuée :

- **Méthode 1 :** la même idée que celle proposée (deux zones sont considérées), la différence réside dans le contrôleur utilisé où un de type TOR est utilisé. Le contrôleur reçoit le l'humidité du sol de chaque zone, et si elle atteint la valeur de seuil (référence), le serveur envoie une commande pour ouvrir la vanne correspondante sinon là l'électrovanne est fermée.

- **Méthode 2 :** Selon le système proposé par Gao et al. [279], un nœud de capteur est installé sur le sol (une seule zone est considérée) pour envoyer les valeurs d'humidité du sol à un nœud collecteur qui est connecté à un Raspberry pi via un port série. Un contrôleur flou reçoit deux données (la différence entre la valeur de l'humidité de référence et celle de l'humidité de sol mesuré et la variation de l'erreur) envoyées par le nœud afin de calculer la durée d'irrigation.

- **Méthode 3 :** L'idée proposée par Harish Kumar [280] est implémentée, où un nœud contient un capteur d'humidité de sol, de température et une électrovanne est installée. Les données

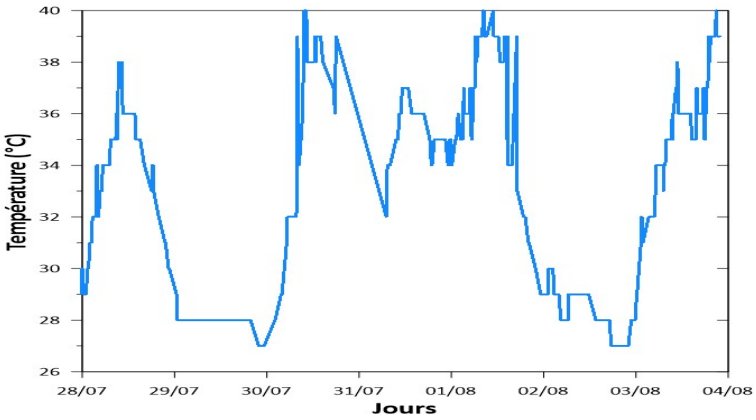


FIGURE V.48 – Variation de la température d'environnement pendant huit jours

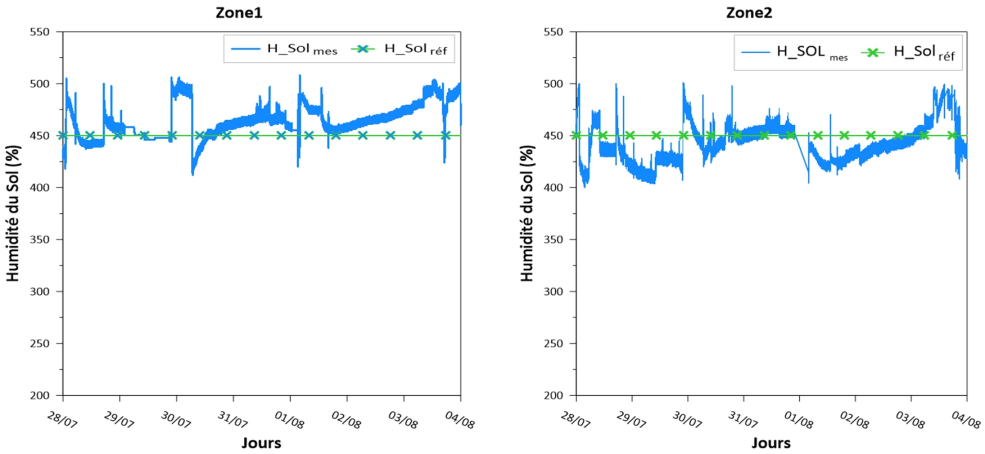


FIGURE V.49 – Évaluation de l'humidité de sol pour chaque zone avec le contrôleur flou SF2 pendant huit jours

de nœud sont transmises à un serveur Raspberry à l'aide de la communication RF. Le serveur compare les données envoyées à un seuil et envoie une commande ON/OFF vers l'électrovanne.

Les quatre méthodes sont testées pour irriguer la même plante (tomate) dans les mêmes conditions pendant huit jours (du 28 juillet au 4 août). La quantité d'eau consommée et la durée de fonctionnement des actionneurs dans chaque méthode sont indiqués dans le tableau V.3. Les résultats des tests montrent que la méthode proposée consomme le moins de quantité d'eau la moins (une moyenne de 5,75 litres par jour) et la durée de fonctionnement des actionneurs est la plus courte par rapport aux autres méthodes, ce qui signifie moins de consommation d'énergie.

TABLE V.3 – Comparaison de l'eau consommée et la durée de fonctionnent des actionneurs pendant huit jours

Méthodes utilisées	Eau consommée (L)	Durée de fonctionnement des actionneurs
1er méthode	64	01h31mn00s
2ème méthode	57	01h18mn45s
3ème méthode	72	01h40mn15s
méthode proposée	46	01h03mn52s

La quantité d'eau et de l'énergie consommée dans chaque méthode a été estimée sur une période de quatre mois, qui est la période requise pour la maturation des cultures de tomates (avec prise en

compte les besoins supplémentaires lorsque les plantes grandissent). Les résultats de la comparaison sont représentés par la figure V.50. Ces résultats montrent les avantages de la méthode proposée, où la quantité d'eau et l'énergie consommées sont considérablement réduites, plus de 188 L et 39 Wh respectivement par rapport à la deuxième meilleure méthode qui correspond à la méthode 2. Ces résultats montrent l'avantage de l'utilisation de l'irrigation par zonage combinée à un contrôle flou. Même si l'on considère de vastes zones agricoles, la consommation d'eau et de l'énergie est considérablement réduite.

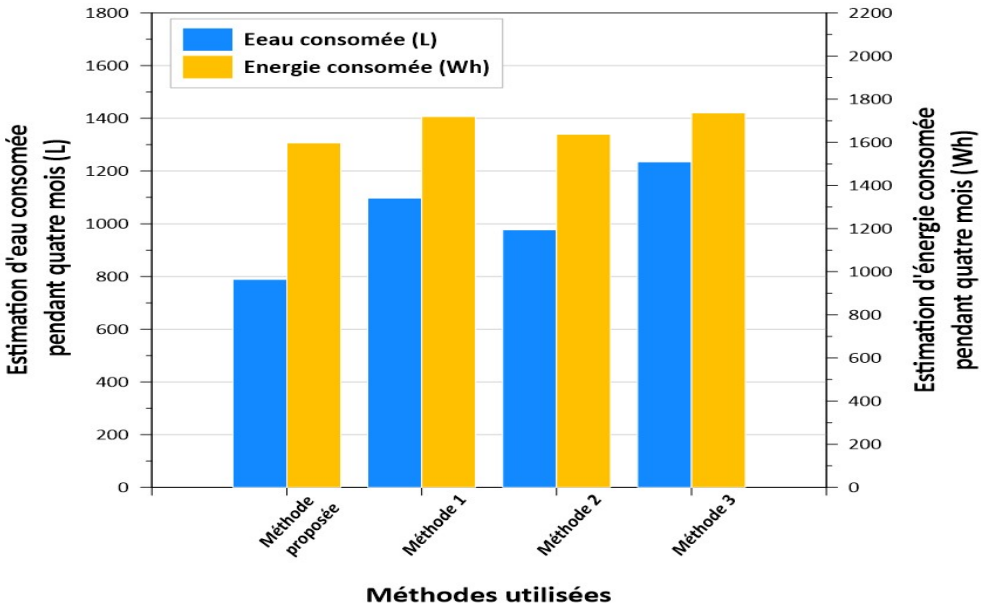


FIGURE V.50 – Estimation de la quantité d'eau et de l'énergie consommée pendant quatre mois

Le tableau V.4 représente la différence relative du coût de l'eau et de l'énergie entre les trois méthodes et la solution proposée pendant la période de maturation que l'agriculteur doit payer selon le prix réel donné par les autorités algériennes (60 DA/m^3 et 15,62 DA/kWh) [281][282]. Selon ces résultats, l'agriculteur peut économiser 46,81%, 26,41% et 65,22% du coût de production par rapport aux méthodes 1, 2 et 3 respectivement.

TABLE V.4 – Différence relative du coût de l'eau et de l'énergie des trois méthodes par rapport à la solution proposée pendant quatre mois

Méthodes utilisées	Différence relative du coût de l'eau	Différence relative du coût de l'énergie	Total
1^{er} méthode	+39.13 %	+7.68 %	+46.81 %
$2^{ème}$ méthode	+23.91 %	+2.50 %	+26.41 %
$3^{ème}$ méthode	+56.52 %	+8.70 %	+65.22 %

C'est vrai que la différence n'est pas considérable selon les résultats donnés par la figure V.50 et le tableau V.4, car la surface considérée est petite, mais dans le cas d'une grande serre ou d'une grande surface et par l'utilisation de plusieurs zones, une grande différence et plus d'avantages peuvent être remarqués.

V.5.2.2 Coût d'installation de la stratégie proposée

Le tableau V.5 indique le coût des composantes du système d'irrigation proposé [283]. Le système n'a pas de frais d'installation puisque les nœuds sans fil sont faciles à installer et que la procédure peut être effectuée par l'utilisateur. Comme on peut le remarquer, le système a un faible coût. Sur

une surface de 200 m^2 avec un nœud placé tous les 10 m^2 (vingt zones sont considérées), le coût total du système est d'environ 35684 DA (dépend de la qualité du matériel utilisé). Le faible coût et l'efficacité du système en font une solution abordable pour la majorité des agriculteurs qui ne peuvent tolérer de mettre en œuvre d'autres stratégies.

Bien sûr, une grande surface doit être divisée en plusieurs zones où chaque zone a besoin d'un nœud. Par conséquent, le coût d'installation augmente, ce qui peut être vérifiée par la figure V.51 qui indique que le coût d'installation de la méthode proposée est double par rapport à la méthode 2 et la méthode 3. Mais, ce coût supplémentaire peut être considéré comme un investissement qui peut être amorti en réduisant les coûts de l'eau et de l'énergie sur plusieurs productions agricoles.

TABLE V.5 – Coût des composants du système d'irrigation proposé

Composant	Raspberry pi3	Arduino nano	Module nRF24L01+	Capteur humidité de sol	Capteur de température	Electrovanne	Serveur Node-RED	Coût total en 200 m^2
Prix (DA)	A partir de 5846.49	A partir de 349.76	A partir de 385.89	A partir de 207.79	A partir de 553.67	A partir de 451.72	Open source	A partir de 35684.24

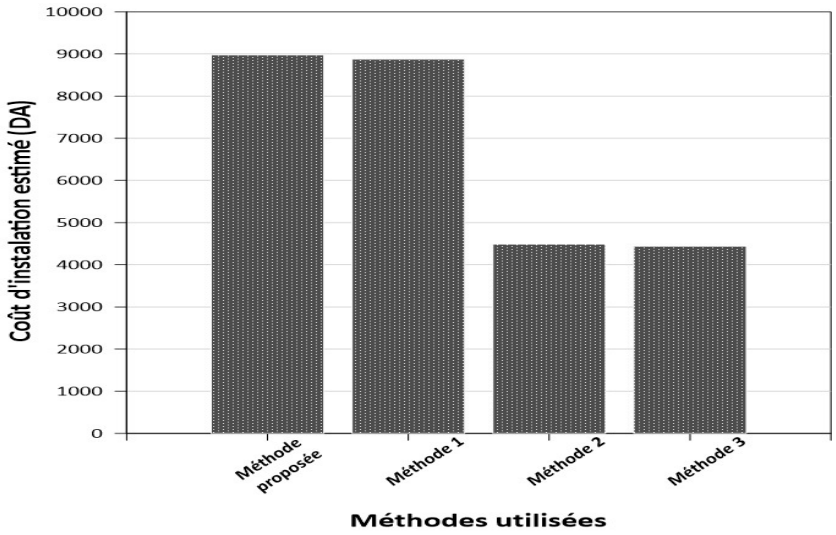


FIGURE V.51 – Estimation du coût d'installation

V.5.2.3 Nouveautés de la stratégie proposée

Suite aux travaux réalisés dans [284]–[287] et les résultats de nos tests, le tableau V.6 présente une comparaison entre la méthode proposée et les stratégies d'irrigation traditionnelles. Le tableau V.7 présente une comparaison générale entre la solution proposée et certaines nouvelles stratégies d'irrigation proposées précédemment. Le système développé présente de nombreux avantages qui peuvent aider l'utilisateur en termes d'économie d'eau et d'énergie, de contrôle intelligent, de coûts d'installation et de main-d'œuvre, de surveillance et de contrôle à distance.

Dans notre projet, une nouvelle stratégie d'irrigation à faible coût est proposée. Les nouveautés, qui sont liées à la mise en œuvre expérimentale et aux stratégies adoptées pour le contrôle et la supervision, sont données notamment :

- Utiliser l'irrigation par zones : Les travaux proposés précédemment ne prenaient pas en considération la superficie du champ, la portée du capteur, le débit d'eau et la taille de la plante, et la décision est basée sur une seule source d'information (capteur unique). Le débit d'eau est affecté par la longueur des tuyaux et la distance à la source d'eau, en particulier dans les zones très étendues. La stratégie d'irrigation par zonage donne une image complète du sol (par l'utilisation d'un réseau de capteurs) et garantit que chaque plante consomme la

même quantité d'eau avec une consommation optimale juste nécessaire (en tenant compte de la superficie du champ, de la portée des capteurs, etc.).

- Supervision en temps réel : En mettant en œuvre un RCSF à faible coût et à très faible consommation d'énergie et en développant une IHM basée sur la nouvelle plateforme IoT (Node-RED).

- Implémentation dans le serveur : Comme les microcontrôleurs ont des mémoires de traitement limitées, notre système utilise le serveur Node-RED comme unité de traitement et IHM en même temps.

- Implémentation d'un contrôleur intelligent : Le contrôleur flou proposé prend en compte la relation entre le sol et l'environnement et permet de prendre des décisions intelligentes pour contrôler l'irrigation dans chaque zone.

Table V.6 – Comparaison entre le système d'irrigation proposée et les stratégies d'irrigation traditionnelles

Critère de comparaison	Méthode proposée	Irrigation goutte à goutte	Irrigation par sillons	Irrigation par aspersion	Irrigation par inondation
Économie d'eau et d'énergie	Très élevé (surtout dans les grandes zones)	Elevé par rapport aux sillons et à l'inondation	Faible	Faible à moyenne	Très faible
Contrôle d'irrigation	Contrôle intelligent (très précis)	Manuelle	Impossible	Manuelle	Impossible
Coût d'installation	Le plus faible niveau d'opérationnel et de main d'œuvre (basé sur la communication sans fil)	Faible niveau initial et opérationnel par rapport à l'aspersion	Haute capacité opérationnelle et main-d'œuvre	Opérationnel élevé	Initial faible Haute capacité opérationnelle et de main d'œuvre
Surveillance	Basée sur RCSF et l'IdO	Local par des opérateurs	Local par des opérateurs	Local par des opérateurs	Local par des opérateurs
Maintenance	Faible coût (dû à l'utilisation de RCSF et l'IdO)	Besoin d'un entretien régulier	Haute capacité opérationnelle et de main-d'œuvre	Besoin d'un entretien régulier	/
Coût de la main d'œuvre	Très faible (remplacé par RCSF et l'IdO)	Modéré	Haut	Modéré	Haut
Problèmes de maladies et de parasites	Peuvent être surveillés par l'IHM (en ajoutant des capteurs)	Relativement moins	Élevé	Moyen	Très élevé
Efficacité de l'utilisation des engrais	Élevé	Élevé	Minimum	Modéré	Minimum

V.5.3 Analyse complexe

Le tableau V.8 illustre l'analyse complexe de l'approche proposée qui dépend du matériel utilisée (Raspberry Pi), ainsi que de l'efficacité du compilateur, de programme développé, de la taille et le nombre des entrées et d'autres :

- Le temps d'exécution : Il s'agit du temps nécessaire au Raspberry Pi pour exécuter le script python afin de contrôler le climat et l'irrigation, qui est équivaut à 10^{-13} secondes (décision en temps réel).

- Utilisation moyenne du CPU : L'ensemble du système (contrôleur flou, serveur Node-RED, et la base de données) occupe 67% du CPU de Raspberry Pi. Il a été calculé en utilisant le nœud "cpu" qui permet de surveiller l'utilisation du CPU dans Node-RED.

Des batteries ont été utilisées pour alimenter les nœuds sans fil. Ces nœuds sont principalement composés d'un microcontrôleur et d'un module de transmission à très faible consommation d'énergie (nRF24L01+). Le traitement des données est effectué au niveau de serveur, ce qui permet d'économiser l'énergie dans les nœuds et de maintenir une faible consommation, le rôle des nœuds étant pratiquement réduits à l'envoi et à la réception de données. En adoptant cette méthode, la durée

Table V.7 – Comparaison entre le système d'irrigation proposée et certaines nouvelles stratégies proposées précédemment

Méthodes	Capteurs inclus	Contrôleur	Connectivité	Interfaces utilisateur)	Méthodologie
[52]	Température, humidité, humidité du sol, niveau d'eau, pluie et LDR	Logique floue implémentée dans Arduino	GSM/GPRS	- Écran LCD local -Notification par téléphone mobile	- Forte économie d'eau et d'énergie par rapport à l'arrosage goutte à goutte et manuel - Surveillance à distance - Faible coût du main d'ouvre - Utilisation d'énergie solaire
[288]	Humidité, humidité du sol, température, lumière, niveau d'eau et oxygène	Logique floue implémentée dans un µc ATmega328p avec système multi-agents PANGEA	Wi-Fi, GPRS, Ethernet et RF	Application Android (plateforme TV, téléphone portable)	- Système à faible coût - Économie d'eau - basé sur un RCSF - Surveillance à distance - Base de données pour le stockage
[289]	Humidité du sol, température, rayonnement solaire et débit d'eau	Logique floue implémentée dans un µc Atmega32	Xbee, GSM/GPRS	PC (LabView)	- Énergie solaire - Économie d'eau élevée - Surveillance à distance - Faible coût, efficacité et facilité de mise en œuvre
[37]	Température et humidité du sol	Algorithme d'apprentissage automatique K-NN déployé dans Raspberry	SPI & ethernet	Page web	- Surveillance à distance -Prévision de la qualité du sol
[290]	Température du sol, humidité du sol, température et humidité de l'air	Machine à vecteurs de support et l'algorithme k-moyennes implémentés dans le serveur	Xbee, SPI & Wi-Fi	Page web	- Prévoir les besoins en irrigation avec une grande précision - Base de données centralisée - Basé sur RCSF - Surveillance à distance - Service web pour la collection de données météorologiques en ligne - Rentabilité - Économie d'eau
[49]	Lumière, humidité du sol, caméra, température et humidité	Système d'aide à la décision (DSS) basé sur logique floue implémenté dans le serveur	Wi-Fi & Bluetooth	Application Android	- Surveillance à distance - Communication sécurisée - Optimiser la consommation d'énergie - Base de données décentralisée
Méthode proposée	Température et humidité du sol	Logique floue implémentée dans le serveur	RF, SPI, Ethernet & Wi-Fi	Serveur Node-RED (accès par web sans avoir besoin d'installer des applications)	-Économie élevée d'eau et d'énergie par rapport à [279] et [280] - Irrigation par zonage - Haute précision (zonage + FC) - Surveillance et contrôle à distance - Implémentation dans le serveur (non limité à la mémoire des µc) - Basé sur RCSF - Stockage dans le cloud - Système à faible coût - Modulaire - Une installation facile

Table V.8 – Analyse complexe du système de surveillance et de contrôle proposé

Processeur	RAM	Temps d'exécution	Utilisation moyenne du CPU
1.2 GHz 64-bit quad core ARM Cortex-A53	1 GO	10^{-13} (s)	67%

de vie de la batterie peut être étendue de plusieurs semaines à plusieurs mois.

V.5.4 IHM réalisée

L'interface réalisée dans notre projet est illustrée dans les figures V.51- V.58, cette interface offre la possibilité de contrôler et superviser l'environnement agricole depuis n'importe quel terminal qu'il soit PC, smart-phone, tablette ou autres connecté à internet sans avoir besoin d'installer des logiciels ou pilotes supplémentaires. Pour avoir accès à cette IHM, il suffit d'ouvrir le navigateur web et d'y entrer l'adresse *http ://hamzaben.ddns.net :1880/ui.*

Après avoir validé l'adresse et l'insertion de nom d'utilisateur et le mot de passe, nous arrivons sur la page d'accueil de notre IHM *'Hz−Green'* en deux langues : en français (Figure V.52) et en arabe (Figure V.53).

Notre application est constituée en 6 parties (vues) : supervision, type de la plante, historique de données, contrôle manuel, météorologique et image en direct. Elles sont accessibles juste avec un clic.

- Vue de supervision (Figure V.54) : cette vue permet à l'utilisateur de surveiller les différentes serres (serre1, serre2, etc.). Elle contient :

  - Plusieurs jauges colorées qui nous donnent la valeur actuelle de chaque paramètre climatique (température, humidité, CO2, etc.), ces gauges changent de couleur selon la valeur des consignes du régulateur.

  - Plusieurs graphes qui nous montrent l'évolution de notre système sur une plage horaire que nous pouvons choisir (min, heure, jour, etc.).

  - Plusieurs LED pour indiquer l'état de différents actionneurs (ON : vert ; OFF : rouge).

- Vue de type de la plante (Figure V.55) : à travers cette vue l'utilisateur sélectionne le type de la plante cultivée dans la serre correspondante (serre1, serre2, etc.) et le système réagit d'une manière automatique avec la plante considérée selon les conditions idéales où les valeurs de références sont incluses dans le contrôleur.

- Vue d'historique de données (Figure V.56) : cette vue permet à l'utilisateur d'obtenir les données pour soit les afficher sur dashboard ou bien les envoyer par email.

- Vue de contrôle manuel (Figure V.57) : cette vue permet de commander manuellement les actionneurs de la serre grâce aux switches. Ces switches indiquent l'état de chaque actionneur par des couleurs : gris pour non activé et bleu activé. Par défaut, le mode manuel est désactivé. Le switch en haut à droite permet de faire le choix entre le mode manuel ou le mode automatique.

- Vue de météorologique (Figure V.58) : elle permet à l'utilisateur de visualiser les conditions météorologiques (température, humidité, etc.) dans la zone sélectionnée.

- Vue d'image en direct (Figure V.59) : cette interface permet d'afficher des images/vidéos captées par des caméras placées à l'intérieur des serres (serre1, serre2, etc.) afin de créer une meilleure visualisation en ligne.

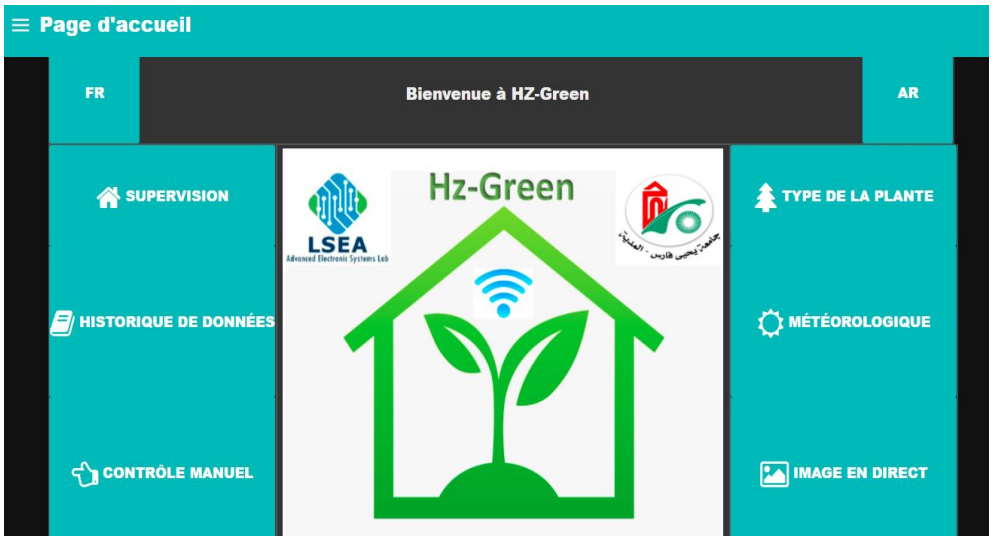


FIGURE V.52 – Vue d'accueil dans l'IHM en français



FIGURE V.53 – Vue d'accueil dans l'IHM en arabe



FIGURE V.54 – Vue de supervision dans l'IHM

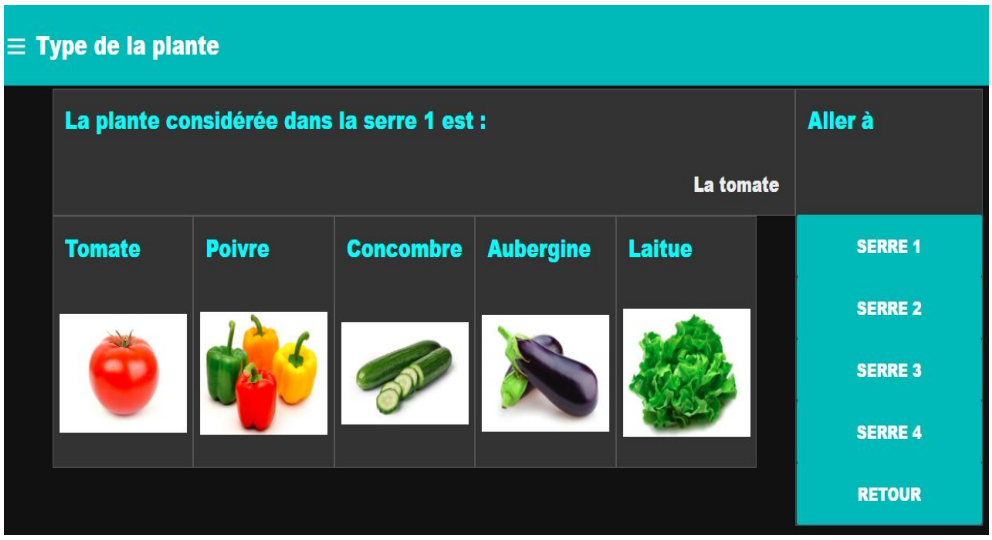


FIGURE V.55 – Vue de sélection de type de la plante dans l'IHM



FIGURE V.56 – Vue d'obtenir l'historique de données dans l'IHM

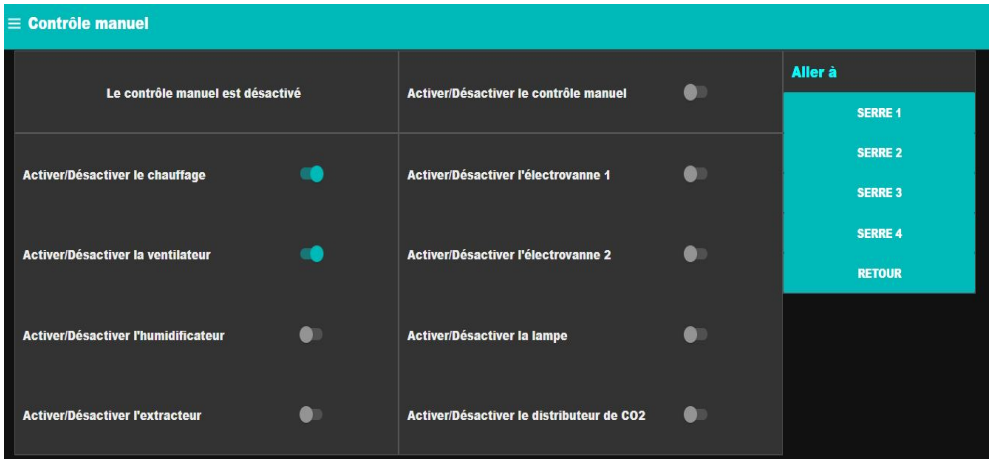


FIGURE V.57 – Vue de contrôle manuel dans l'IHM

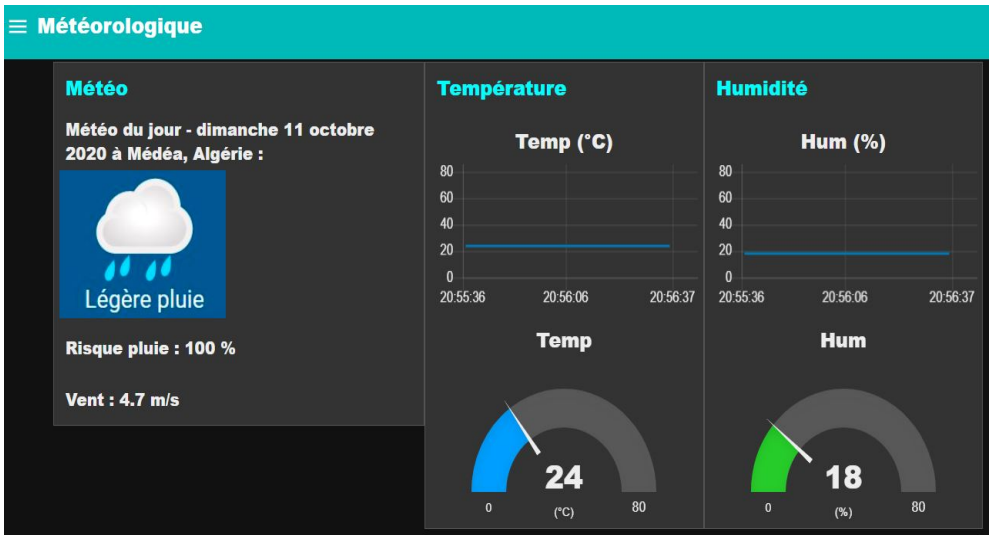


FIGURE V.58 – Vue des conditions météorologiques dans l'IHM

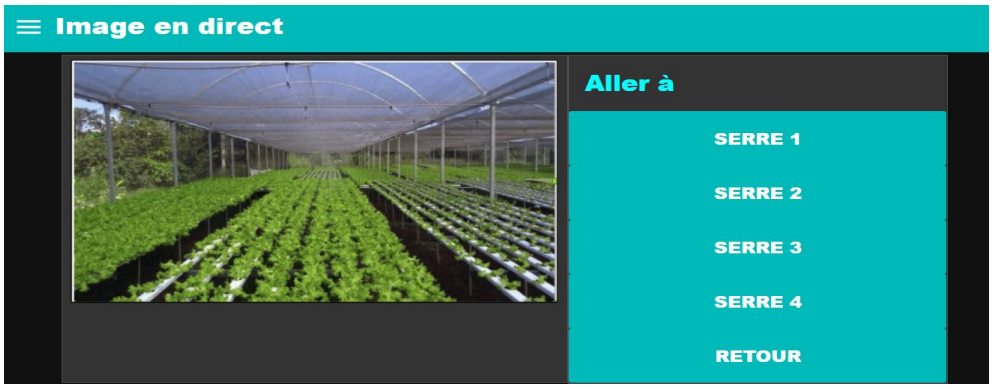


FIGURE V.59 – Vue d'image en direct dans l'IHM

V.5.5 Étude socioéconomique

Nous avons fait une étude socioéconomique afin d'estimer le prix des composants du système. Le tableau V.9 indique le coût des composants du système proposé [283]. Le système n'a pas de frais d'installation puisque les nœuds sans fil sont faciles à installer et que la procédure peut être réalisée par l'utilisateur. Comme on peut le voir, le système a un faible coût. Le faible coût et l'efficacité du système en font une solution abordable pour la majorité des agriculteurs.

TABLE V.9 – Coût des composants du système de surveillance et contrôle proposé

Composant	**Raspberry pi3**	**Arduino nano**	**Module nRF24L01+**	**Capteur d'humidité de sol (YL-69)**	**Capteur de tepérature et d'humidité (DHT22)**	**Serveur Node-RED**
Prix (DA)	A partir de 5846,49	A partir de 349,76	A partir de 385,89	A partir de 207,79	A partir de 553,67	Open source
Composant	**Électrovanne**	**Pompe à eau**	**Chauffage**	**Ventilateur**	**Extracteur**	**Humidificateur**
Prix (DA)	A partir de 451,72	A partir de 20000	A partir de 34679	A partir de 8646,35	A partir de 8646,35	A partir de 35190

V.6 Conclusion

Dans ce chapitre, le cahier de charge du système de supervision et de contrôle réalisé détaillé est donné tout en expliquant d'une manière claire le coté software et hardware de l'implémentation. Ce système a été développé en se basant sur les outils mentionnés au chapitre III. La solution proposée a été implémenté avec succès où les objectifs ont été atteints.

Le microclimat à l'intérieur de la serre n'est pas toujours favorable à la croissance des plantes. Pour cette raison, le système de fusion a été proposé pour gérer le climat intérieur en accordant une attention particulière à l'efficacité, à la corrélation entre la température et l'humidité, à la consommation d'énergie et aux coûts de production. Le contrôleur floue établi a présenté un outil parfait pour atteindre le microclimat souhaité à l'intérieur de la serre. Les résultats ont montré l'efficacité du contrôleur proposé pour suivre la valeur de consigne désirée avec une consommation d'énergie minimale.

Dans cette recherche une nouvelle stratégie d'irrigation basé sur zonage a été proposée pour résoudre le problème de consommation d'eau et d'énergie au niveau des systèmes d'irrigation. Les résultats de tests et comparaison avec d'autre stratégies ont montré l'efficacité et la supériorité de la combinaison du contrôleur flou avec la stratégie de zonage en termes de minimisation de l'utilisation de l'eau et de l'énergie lorsque la consommation a été réduite de manière significative.
En plus, avec l'utilisation du serveur Node-RED, une liaison a pu être établie entre l'unité de traitement, l'environnement agricole, la base de données ainsi que l'IHM afin d'obtenir une solution modulable utilisant l'Internet des Objets.

Chapitre VI

Conclusion générale et perspectives

VI.1 Conclusion générale

VI.1.1 Argumentation

L'agriculture est un secteur économique important qui conduit à la croissance économique globale d'une nation. Bien que l'agriculture ait relevé des défis importants dans le passé, des augmentations ciblées de la productivité devront être réalisées d'ici 2050, face à des contraintes strictes, notamment des ressources limitées en eau, l'augmentation de la population, une main-d'œuvre moins qualifiée, une quantité limitée de terres arables et les changements climatiques. Pour répondre aux exigences et augmenter la qualité et la quantité de la production agricole, de nouvelles technologies doivent être introduites afin de relever les normes agricoles où les méthodes conventionnelles dans les pratiques agricoles sont devenues insuffisantes.

L'agriculture de précision est une pratique moderne utilisée pour améliorer la productivité des cultures en utilisant les dernières technologies, à savoir l'IdO, RCSF, et l'IA. La plupart des recherches effectuées jusqu'à présent indiquent que les pratiques basées sur l'AP ont une grande influence sur la durabilité et la productivité. L'objectif de l'AP est de fournir des systèmes d'aide à la décision basés sur de multiples paramètres des cultures telles que la température, l'humidité, l'humidité de sol, l'intensité lumineuse, etc.

VI.1.2 Bilan

Notre objectif dans cette thèse a été le développement d'un système de surveillance et contrôle d'un environnement agricole à base d'IdO qui respecte les contraintes du secteur agricole dans l'objectif d'augmenter et d'améliorer la production et d'aider l'utilisateur. Ces contraintes peuvent être énumérées comme suit :

- Faible coût,
- Contrôle et supervision en temps réel,
- Précision,
- Faible consommation d'eau et d'énergie,
- Efforts des agriculteurs,
- Surmonter la non linéarité de la serre et du sol.

Le premier volet de l'étude (la recherche) a porté sur une étude générale de la production sous serre telle que les types de structures existants, les paramètres climatiques et les méthodes d'irrigation utilisée (Chapitre I), la notion de fusion de données (Chapitre II), ainsi que les nouvelles technologies (outils hardware/software) qui peuvent être utilisés dans le secteur agricole (Chapitre III). Ces derniers permettent de moderniser le secteur agricole et faciliter les tâches des agriculteurs telle que la surveillance et le contrôle. Dans la deuxième partie, nous avons développé un système embarqué intelligent à base d'IdO pour la surveillance et le contrôle d'une serre agricole (environnement

agricole). L'efficacité du système proposé est confirmée expérimentalement (Chapitre IV).

Dans cette thèse, notre démarche a été développé en sept étapes pour atteindre nos objectifs :

1. Conception d'un système de fusion et décision à base de la logique floue pour contrôler le climat et l'irrigation à l'intérieur d'un environnement agricole, tout d'abord le système est validé par une simulation, ensuite le système est implémenté sur un système embarqué à base d'un Raspberry.

2. Développement d'une IHM basée sur le serveur Node-RED pour faire la supervision et le contrôle à distance.

3. Conception d'un système de communication en utilisant : la radiofréquence (RF) pour les capteurs, actionneurs et la communication série filaire au niveau de l'unité de traitement et envoi d'information au cloud et enfin une communication Wi-Fi pour l'utilisation de l'Internet des Objets.

4. Conception d'une base de données MySQL pour stocker et bien gérer les différents paramètres agricoles.

5. Faire le lien entre les quatre concepts cités en 1), 2), 3) et 4).

6. Choix des solutions adéquates pour l'implémentation hardware et software des résultats de conception tout en pensant à l'autonomie et l'optimisation de la consommation en énergie.

7. Validation des résultats obtenus par des tests et comparaison.

VI.1.3 Signification

Controller de façon intelligente une enceinte agricole a pour but d'avoir un excellent rendement, tout en consommant le moins d'énergie et d'intrants (engrais, phytosanitaires, eau). Il est ici question d'améliorer la gestion d'une parcelle en prenant en compte l'aspect : agronomique, environnemental et économique.

La crise mondiale provoquée par la pandémie de coronavirus nous a poussé plus loin dans un monde numérique. Le système proposé dans ce travail de recherche permettra de moderniser et fait un saut qualitatif dans le secteur agricole. Il a introduit des méthodes innovantes pour effectuer des opérations agricoles traditionnelles tels que l'irrigation, la planification des cultures et la replantation, le contrôle, la supervision, le stockage des données agricoles, etc. L'utilisation des technologies modernes comme RCSF, IdO et les techniques d'IA aidera les agriculteurs à collecter une grande quantité d'informations sur les rendements des cultures, les sols, les prévisions météorologiques et les engrais et pour la prise de bonne décision.

VI.1.4 Contributions

Au cours de trois ans de recherche, nous avons développé et implémenté des solutions intelligentes qui permettent d'améliorer le secteur agricole et répondre aux différents défis auxquels il est confronté : l'augmentation de la population, la pénurie d'eau, la mauvaise gestion, la non linéarité des serres agricoles, les changements climatiques et manque de main-d'œuvre. Nous avons développé un système de fusion et décision intelligent basé sur la logique floue permet de fournir les conditions idéales pour la croissance des plantes et répondre au problème de la non linéarité des serres. Nous avons développé une plateforme de surveillance et contrôle à base d'IdO pour aider les agricultures. Nous avons aussi proposé un protocole de communication cohérent à base d'une communication série, RF, et Wi-Fi pour gérer l'échange des données entre l'environnement agricole, l'unité de traitement, et l'utilisateur. Pour stocker et bien gérer les différents paramètres agricoles, nous avons développé une

base de données.

A partir des résultats obtenus, nous avons pu définir les avantages principaux de ce travail de recherche que nous résumons dans :

- Contrôle intelligent des paramètres physiques agricole utilisant la logique floue.
- Optimisation de la consommation en eau au niveau de système d'irrigation.
- Surveillance en temps réel à l'aide d'IdO et du RCSF.
- Économiser de l'argent en minimisant la consommation d'eau et d'énergie.
- Réduction des efforts des agriculteurs.
- Installation facile où un nœud modulaire peut être adopté dans le cas où plus de zones sont nécessaires.
- Adaptation aisée des nœuds où plus de capteurs et/ou d'actionneurs peuvent être ajoutés facilement à l'architecture du système adopté.
- Utilisation de matériel peu coûteux, notamment en termes d'IdO et de communication.
- Valable pour plusieurs types de plantes.

En outre, la solution adoptée peut être adaptée à d'autres applications telles que :

- La santé : le RCSF peut être implanté dans le corps humain et envoyer des données en temps réel à un serveur, où ils peuvent être traitées et analysées. L'IHM nouvellement développée permet aux médecins de suivre la santé de leurs patients en dehors de l'hôpital et d'améliorer la gestion des risques. Le système proposé peut également être utilisé pour connecter les équipements médicaux au cloud, ce qui permet d'améliorer surveillance et la maintenance.
- Gestion du trafic : Le système proposé peut être utilisé pour surveiller les intersections (via RCSF et IdO) et contrôler intelligemment les feux de circulation (utilisant le contrôleur flou).
- Industrie 4.0 : Le serveur Node-RED peut être utilisé pour développer des IHMs qui permettent aux utilisateurs, depuis n'importe quel endroit et à n'importe quel moment, de surveiller et contrôler leurs processus, améliorer la sécurité et d'optimiser les processus et workflows.

VI.2 Perspectives

Les résultats obtenus dans ce travail de recherche sont prometteurs. Cependant, certaines limitations peuvent être pointées et peuvent constituer des pistes pour des travaux futurs.

Comme perspectives, nous souhaiterons que nous puissions apporter plus d'affinité pour ce travail comme par exemple :

- L'utilisation d'énergie solaire pour l'alimentation des différents systèmes embarqués développés surtout pour les systèmes installer au niveau des champs.
- Développement des solutions intelligentes à base des robots mobiles pour la détection des maladies et les besoins de l'environnement agricole.
- La sécurisation de transfert de données (cryptage).
- Optimisation de la consommation d'énergie des différents nœuds installés au niveau du champ agricole.

- Développement des solutions pour faire l'auto-diagnostic des différents capteurs utilisés.
- L'implémentation dans un environnement réel.

Bibliographie

[1] FAO, The State of Food and Agriculture. FAO, Rome, Italy., 2009.

[2] R. C. Poonia, X.-Z. Gao, L. Raja, S. Sharma, and S. Vyas, Smart farming technologies for sustainable agricultural development. IGI Global., 2019.

[3] J. I. L. Morison, N. R. Baker, P. M. Mullineaux, and W. J. Davies, "Improving water use in crop production," Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences, vol. 363, no. 1491. Royal Society, pp. 639–658, 12-Feb-2008.

[4] P. Doungmanee, "The nexus of agricultural water use and economic development level," Kasetsart J. Soc. Sci., vol. 37, no. 1, pp. 38–45, Jan. 2016.

[5] E. L. Johansson, M. Fader, J. W. Seaquist, and K. A. Nicholas, "Green and blue water demand from large-scale land acquisitions in Africa," Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A., vol. 113, no. 41, pp. 11471–11476, Oct. 2016.

[6] J. F. Velasco-Muñoz, J. A. Aznar-Sánchez, L. J. Belmonte-Ureña, and I. M. Román-Sánchez, "Sustainable Water Use in Agriculture : A Review of Worldwide Research," Sustainability, vol. 10, no. 4, 2018.

[7] N. Drouiche, N. Ghaffour, M. W. Naceur, H. Lounici, and M. Drouiche, "Towards sustainable water management in Algeria," Desalin. Water Treat., vol. 50, no. 1–3, pp. 272–284, 2012.

[8] Benblidia M and Thivet G, "Gestion des ressources en eau : les limites d'une politique de l'offre.," Les Notes d'analyse du CIHEAM 58 : 15,Tech. Rep, 2010.

[9] A. Nikzad, M. Chahartaghi, and M. H. Ahmadi, "Technical, economic, and environmental modeling of solar water pump for irrigation of rice in Mazandaran province in Iran : A case study," J. Clean. Prod., vol. 239, p. 118007, Dec. 2019.

[10] F. Zhang, S. Guo, C. Zhang, and P. Guo, "An interval multiobjective approach considering irrigation canal system conditions for managing irrigation water," J. Clean. Prod., vol. 211, pp. 293–302, Feb. 2019.

[11] A. Singh, "Environmental problems of salinization and poor drainage in irrigated areas : Management through the mathematical models," J. Clean. Prod., vol. 206, pp. 572–579, Jan. 2019.

[12] Y. Kim, R. G. Evans, and W. M. Iversen, "Remote sensing and control of an irrigation system using a distributed wireless sensor network," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 57, no. 7, pp. 1379–1387, 2008.

[13] Z. Zhai, J. F. Martínez, V. Beltran, and N. L. Martínez, "Decision support systems for agriculture 4.0 : Survey and challenges," Comput. Electron. Agric., vol. 170, no. January, p. 105256,

2020.

[14] V. Saiz-Rubio and F. Rovira-Más, "From smart farming towards agriculture 5.0 : A review on crop data management," Agronomy, vol. 10, no. 2, 2020.

[15] E. Comission., "Generational Renewal in EU Agriculture : Statistical Background ;DG Agriculture & Rural Development : Economic analysis of EU agriculture unit : Brussels, Belgium," EC, Tech. Rep., 2012.

[16] T. Kutter, S. Tiemann, R. Siebert, and S. Fountas, "The role of communication and co-operation in the adoption of precision farming," Precis. Agric., vol. 12, no. 1, pp. 2–17, Nov. 2011.

[17] "International Society of Precision Agriculture." [Online]. Available : https ://www.ispag.org/. [Accessed : 26-Nov-2020].

[18] Y. Lu, "Industry 4.0 : A survey on technologies, applications and open research issues," Journal of Industrial Information Integration, vol. 6. Elsevier B.V., pp. 1–10, 01-Jun-2017.

[19] K. Thramboulidis, D. C. Vachtsevanou, and I. Kontou, "CPuS-IoT : A cyber-physical microservice and IoT-based framework for manufacturing assembly systems," Annu. Rev. Control, vol. 47, pp. 237–248, Jan. 2019.

[20] Z. Zhao, P. Lin, L. Shen, M. Zhang, and G. Q. Huang, "IoT edge computing-enabled collaborative tracking system for manufacturing resources in industrial park," Adv. Eng. Informatics, vol. 43, p. 101044, Jan. 2020.

[21] M. Bouhedda, H. Benyezza, I. Metali, S. T. Kebir, and S. Rebouh, "Trafic Intersection Fuzzy Control and Supervision System based on IoT," in Proceedings - 2019 3rd International Conference on Applied Automation and Industrial Diagnostics, ICAAID 2019, 2019.

[22] M. Shafiq, Z. Tian, Y. Sun, X. Du, and M. Guizani, "Selection of effective machine learning algorithm and Bot-IoT attacks traffic identification for internet of things in smart city," Futur. Gener. Comput. Syst., vol. 107, pp. 433–442, Jun. 2020.

[23] H. Tahaei, F. Afifi, A. Asemi, F. Zaki, and N. B. Anuar, "The rise of traffic classification in IoT networks : A survey," Journal of Network and Computer Applications, vol. 154. Academic Press, p. 102538, 15-Mar-2020.

[24] P. Rakshit, I. Nath, and S. Pal, "Application of IOT in healthcare," in Intelligent Systems Reference Library, vol. 174, Springer, 2019, pp. 263–277.

[25] P. M. Kumar, S. Lokesh, R. Varatharajan, G. Chandra Babu, and P. Parthasarathy, "Cloud and IoT based disease prediction and diagnosis system for healthcare using Fuzzy neural classifier," Futur. Gener. Comput. Syst., vol. 86, pp. 527–534, Sep. 2018.

[26] L. M. Dang, M. J. Piran, D. Han, K. Min, and H. Moon, "A Survey on Internet of Things and Cloud Computing for Healthcare," Electronics, vol. 8, no. 7, p. 768, Jul. 2019.

[27] R. P. Singh, M. Javaid, A. Haleem, and R. Suman, "Internet of things (IoT) applications to fight against COVID-19 pandemic," Diabetes Metab. Syndr. Clin. Res. Rev., vol. 14, no. 4, pp. 521–524, Jul. 2020.

[28] M. Tao, J. Zuo, Z. Liu, A. Castiglione, and F. Palmieri, "Multi-layer cloud architectural model and ontology-based security service framework for IoT-based smart homes," Futur. Gener. Comput. Syst., vol. 78, pp. 1040–1051, Jan. 2018.

[29] D. Mocrii, Y. Chen, and P. Musilek, "IoT-based smart homes : A review of system architecture, software, communications, privacy and security," Internet of Things, vol. 1–2, pp. 81–98, Sep. 2018.

[30] J. Petnik and J. Vanus, “Design of Smart Home Implementation within IoT with Natural Language Interface,” IFAC-PapersOnLine, vol. 51, no. 6, pp. 174–179, Jan. 2018.

[31] A. Tzounis, N. Katsoulas, T. Bartzanas, and C. Kittas, “Internet of Things in agriculture, recent advances and future challenges,” Biosyst. Eng., vol. 164, pp. 31–48, Dec. 2017.

[32] Mark Mykleby, Patrick Doherty, and Joel Makower, The New Grand Strategy : Restoring America’s Prosperity, Security, and Sustainability in the 21st Century. St. Martin’s Press, 2016.

[33] T. Wark et al., “Transforming Agriculture through Pervasive Wireless Sensor Networks,” IEEE Pervasive Comput., vol. 6, no. 2, pp. 50–57, Apr. 2007.

[34] D. Thakur, Y. Kumar, A. Kumar, and P. K. Singh, “Applicability of Wireless Sensor Networks in Precision Agriculture : A Review,” in Wireless Personal Communications, Springer US, 2019.

[35] V. I. Adamchuk, J. W. Hummel, M. T. Morgan, and S. K. Upadhyaya, “On-the-go soil sensors for precision agriculture,” Comput. Electron. Agric., vol. 44, no. 1, pp. 71–91, Jul. 2004.

[36] W. Difallah, K. Benahmed, F. Bounnama, B. Draoui, and A. Saaidi, “Intelligent irrigation management system,” Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl., vol. 9, no. 9, pp. 429–433, 2018.

[37] R. Raut, H. Varma, C. Mulla, and V. R. Pawar, “Soil Monitoring, Fertigation, and Irrigation System Using IoT for Agricultural Application,” in Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 19, Springer, 2018, pp. 67–73.

[38] A. Goap, D. Sharma, A. K. Shukla, and C. Rama Krishna, “An IoT based smart irrigation management system using Machine learning and open source technologies,” Comput. Electron. Agric., vol. 155, pp. 41–49, Dec. 2018.

[39] A. N. Shinghal Kshitij, “Wireless Sensor Networks in Agriculture : for Potato Farming,” Int. J. Eng. Sci. Technol., vol. 2, no. 8, pp. 3955–3963, 2010.

[40] X. Dong, M. C. Vuran, and S. Irmak, “Autonomous precision agriculture through integration of wireless underground sensor networks with center pivot irrigation systems,” Ad Hoc Networks, vol. 11, no. 7, pp. 1975–1987, Sep. 2013.

[41] M. S. Munir, I. S. Bajwa, and S. M. Cheema, “An Intelligent and Secure Smart Watering System using Fuzzy Logic and Blockchain,” Comput. Electr. Eng., vol. 77, pp. 109–119, Jul. 2019.

[42] P. Mannini and R. Genovesi," IRRINET : large scale DSS application for on-farm irrigation scheduling Atmosphere System : Applications and Challenges IRRINET : large scale DSS application for on-farm irrigation scheduling,” Procedia Environ. Sci., vol. 19, pp. 823 – 829, 2013.

[43] S. A. Nikolidakis, D. Kandris, D. D. Vergados, and C. Douligeris, “Energy efficient automated control of irrigation in agriculture by using wireless sensor networks,” Comput. Electron. Agric., vol. 113, pp. 154–163, Apr. 2015.

[44] R. S. Krishnan et al., “Fuzzy Logic based Smart Irrigation System using Internet of Things,” J. Clean. Prod., vol. 252, p. 119902, Apr. 2020.

[45] Y. Shekhar, E. Dagur, S. Mishra, R. J. Tom, M. Veeramanikandan, and S. Sankaranarayanan, “Intelligent IoT based automated irrigation system,” Int. J. Appl. Eng. Res., vol. 12, no. 18, pp. 7306–7320, 2017.

[46] A. Pathak, M. AmazUddin, M. J. Abedin, K. Andersson, R. Mustafa, and M. S. Hossain, “IoT based Smart System to Support Agricultural Parameters : A Case Study,” Procedia Comput. Sci., vol. 155, pp. 648–653, Jan. 2019.

[47] J. A. Jiang et al., "A wireless sensor network-based monitoring system with dynamic convergecast tree algorithm for precision cultivation management in orchid greenhouses," Precis. Agric., vol. 17, no. 6, pp. 766–785, Dec. 2016.

[48] M.-S. Liao et al., "On precisely relating the growth of Phalaenopsis leaves to greenhouse environmental factors by using an IoT-based monitoring system," Comput. Electron. Agric., vol. 136, pp. 125–139, Apr. 2017.

[49] J. V. S. N Seenu,Manju Mohan, "Android Based Intelligent Irrigation System," Int. J. Pure Appl. Math., vol. 119, pp. 67–71, 2018.

[50] H. K. Permale, M. T. Masturah, and A. H. Abdullah, "Automatic Irrigation Monitoring System Using Android Based Application," J. Telecommun. Electron. Comput. Eng., vol. 10, 2017.

[51] S. Lorvanleuang, Y. Zhao, S. Lorvanleuang, and Y. Zhao, "Automatic Irrigation System Using Android," OALib, vol. 05, no. 04, pp. 1–7, Apr. 2018.

[52] S. Rawal, "IOT based Smart Irrigation System," Int. J. Comput. Appl., vol. 159, no. 8, pp. 7–11, Feb. 2017.

[53] S. Cugati ;, WMiller ;, and John Schueller., "Automation concepts for the variable rate fertilizer applicator for tree farming ," Proc. 4th Eur. Conf. Precis. Agric. Berlin, Ger. , pp. 14–19, 2003.

[54] J. He, J. Wang, D. He, J. Dong, and Y. Wang, "The design and implementation of an integrated optimal fertilization decision support system," Math. Comput. Model., vol. 54, no. 3–4, pp. 1167–1174, Aug. 2011.

[55] Rekha Prabha, S. Emrick, F. Passelaigue, and M. V. Ramesh, "Design and Development of an IoT Based Smart Irrigation and Fertilization System for Chilli Farming," Int. Conf. Wirel. Commun. Signal Process. Netw., 2018.

[56] G. Lavanya, C. Rani, and P. Ganeshkumar, "An automated low cost IoT based Fertilizer Intimation System for smart agriculture," Sustain. Comput. Informatics Syst., p. 100300, Jan. 2019.

[57] S. Sankaran, A. Mishra, R. Ehsani, and C. Davis, "A review of advanced techniques for detecting plant diseases," Comput. Electron. Agric., vol. 72, no. 1, pp. 1–13, Jun. 2010.

[58] M. H. Saleem, J. Potgieter, and K. M. Arif, "Plant disease detection and classification by deep learning," Plants, vol. 8, no. 11, pp. 32–34, 2019.

[59] P. Sharma, Y. P. S. Berwal, and W. Ghai, "Performance analysis of deep learning CNN models for disease detection in plants using image segmentation," Inf. Process. Agric., no. xxxx, pp. 1–9, 2019.

[60] S. Mishra, R. Sachan, and D. Rajpal, "Deep Convolutional Neural Network based Detection System for Real-time Corn Plant Disease Recognition," Procedia Comput. Sci., vol. 167, pp. 2003–2010, 2020.

[61] D. E. Kusumandari, M. Adzkia, S. P. Gultom, M. Turnip, and A. Turnip, "Detection of Strawberry Plant Disease Based on Leaf Spot Using Color Segmentation," J. Phys. Conf. Ser., vol. 1230, no. 1, 2019.

[62] M. Nagaraju and P. Chawla, "Systematic review of deep learning techniques in plant disease detection," Int. J. Syst. Assur. Eng. Manag., 2020.

[63] X. E. Pantazi, D. Moshou, and A. A. Tamouridou, "Automated leaf disease detection in different crop species through image features analysis and One Class Classifiers," Comput. Electron. Agric., vol. 156, no. November 2018, pp. 96–104, 2019.

[64] M. A. M. Gobble, “Big data : The next big thing in innovation,” Res. Technol. Manag., vol. 56, no. 1, pp. 64–66, Jan. 2013.

[65] M. Kunisch, “Big Data in agriculture - Perspectives for a service organisation,” Landtechnik, vol. 71, no. 1, pp. 1–3, 2016.

[66] A. Kamilaris, A. Kartakoullis, and F. X. Prenafeta-Boldú, “A review on the practice of big data analysis in agriculture,” Comput. Electron. Agric., vol. 143, pp. 23–37, 2017.

[67] Proagrica, “How big data will change agriculture .” [Online].
Available : https ://proagrica.com/news/how-big-data-will-change-agriculture/. [Accessed : 20-Nov-2020].

[68] S. Wolfert, L. Ge, C. Verdouw, and M. J. Bogaardt, “Big Data in Smart Farming – A review,” Agric. Syst., vol. 153, pp. 69–80, 2017.

[69] Ciat and Ifpri, "CGIAR Big Data Coordination Plateform," CGIAR, Tech. Rep., 2016.

[70] I. Zambon, M. Cecchini, G. Egidi, M. G. Saporito, and A. Colantoni, “Revolution 4.0 : Industry vs. Agriculture in a Future Development for SMEs,” Processes, vol. 7, no. 1, p. 36, Jan. 2019.

[71] Kathleen Walch, “How AI Is Transforming Agriculture.” [Online]. Available : https ://www.forbes.com/sites/cognitiveworld/2019/07/05/how-ai-is-transforming-agriculture/#2f6582094ad1. [Accessed : 20-Oct-2020].

[72] A. Picon, A. Alvarez-Gila, M. Seitz, A. Ortiz-Barredo, J. Echazarra, and A. Johannes, “Deep convolutional neural networks for mobile capture device-based crop disease classification in the wild,” Comput. Electron. Agric., vol. 161, no. April, pp. 280–290, 2019.

[73] A. Bechar and C. Vigneault, “Agricultural robots for field operations : Concepts and components,” Biosyst. Eng., vol. 149, pp. 94–111, Sep. 2016.

[74] M. S. A. Mahmud, M. S. Z. Abidin, Z. Mohamed, M. K. I. A. Rahman, and M. Iida, “Multi-objective path planner for an agricultural mobile robot in a virtual greenhouse environment,” Comput. Electron. Agric., vol. 157, pp. 488–499, Feb. 2019.

[75] Y. Ampatzidis, L. De Bellis, and A. Luvisi, “iPathology : Robotic applications and management of plants and plant diseases,” Sustain., vol. 9, no. 6, pp. 1–14, 2017.

[76] R. R. Shamshiri et al., “Research and development in agricultural robotics : A perspective of digital farming,” Int. J. Agric. Biol. Eng., vol. 11, no. 4, pp. 1–14, Aug. 2018.

[77] M. . Bergerman, J. . Billingsley, J. . Reid, and E. van Henten, “Robotics in Agriculture and Forestry.,” in Springer Handbook of Robotics, Springer International Publishing, 2016, pp. 1463–1492.

[78] N. Shalal, T. Low, C. McCarthy, and N. Hancock, “Orchard mapping and mobile robot localisation using on-board camera and laser scanner data fusion - Part A : Tree detection,” Comput. Electron. Agric., vol. 119, pp. 254–266, 2015.

[79] N. Shalal, T. Low, C. McCarthy, and N. Hancock, “Orchard mapping and mobile robot localisation using on-board camera and laser scanner data fusion - Part B : Mapping and localisation,” Comput. Electron. Agric., vol. 119, pp. 267–278, 2015.

[80] N. . Reddy, A. . Reddy, and J. Kumar, “A critical review on agricultural robots.,” Int. J. Mech. Eng. Technol., vol. 7, no. 6, 2016.

[81] L. Klerkx, E. Jakku, and P. Labarthe, "A review of social science on digital agriculture, smart farming and agriculture 4.0 : New contributions and a future research agenda," NJAS - Wageningen J. Life Sci., vol. 90–91, no. October, p. 100315, 2019.

[82] Aymone Lamborelle and L. F. Álvarez, "Farming 4.0 : The future of agriculture ? EURACTIV.com." [Online]. Available : https ://www.euractiv.com/section/agriculture-food/infographic/farming-4-0-the-future-of-agriculture/. [Accessed : 20-Oct-2020].

[83] S. Sonka, "Big Data and the Ag Sector : More than Lots of Numbers," Int. Food Agribus. Manag. Rev., vol. 17, pp. 1–20, 2014.

[84] G. V. Research, "Precision Farming Market Analysis. Estimates and Trend Analysis ; Grand View Research Inc. : San Francisco, CA, USA," Grand View Research, Tech. Rep., 2019.

[85] DAVID SCHIMMELPFENNIG, "Farm Profits and Adoption of Precision Agriculture," Economic Research Report USDA, Tech. Rep., 2016.

[86] V. M. Intelligence, Global Agriculture Robots. Market Size, Status and Forecast to 2025. Verified Market Intelligence Inc. : Boonton, NJ, USA, 2018.

[87] "Ag Tech Deal Activity More Than Triples." [Online]. Available : https ://www.cbinsights.com/research/agriculture-farm-tech-startup-funding-trends/. [Accessed : 20-Oct-2020].

[88] R. . Murugesan et al., "Artificial Intelligence and Agriculture 5 . 0," AI Agric., vol. 8, no. 2, 2019.

[89] Y Zhang, "The Role of Precision Agriculture," Resour. Mag., 2019.

[90] P. C. Kesavan and M. S. Swaminathan, "Strategies and models for agricultural sustainability in developing Asian countries," Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci., vol. 363, no. 1492, pp. 877–891, Feb. 2008.

[91] . A. K., . G. N. T., . S. K., and . M. P., "Role of Greenhouse Technology in Agricultural Engineering," Int. J. Agric. Res., vol. 1, no. 4, pp. 364–372, Apr. 2006.

[92] K. (Kandukuri) Radha Manohar and C. Igathinathane, Greenhouse technology and management ,2nd ed. BS Publications, 2007.

[93] C. von Zabeltitz, Integrated Greenhouse Systems for Mild Climates : Climate Conditions, Design, Construction, Maintenance, Climate Control. Springer, 2011.

[94] "Big Greenhouse with Glass Walls, Shutterstock." [Online]. Available : https ://www.shutterstock .com/fr/video/clip-31841170-big-greenhouse-glass-walls-foundations-gable-roof. [Accessed : 13-Oct-2020].

[95] "Zettlemoyer Auction." [Online]. Available : https ://zettauction.hibid.com/lot/45594630/greenhouse–b-1–x–s–smith-30-x-96–2880-sq-ft/. [Accessed : 13-Oct-2020].

[96] Y. Mukazhanov, Z. Kamshat, O. Assel, N. Shayhmetov, and C. Alimbaev, "Microclimate control in greenhouses," Int. Multidiscip. Sci. GeoConference Surv. Geol. Min. Ecol. Manag. SGEM, vol. 17, no. 62, pp. 699–704, 2017.

[97] J. P. Coelho, P. B. De Moura Oliveira, and J. B. Cunha, "Greenhouse air temperature predictive control using the particle swarm optimisation algorithm," in Computers and Electronics in Agriculture, 2005, vol. 49, no. 3, pp. 330–344.

[98] J. L. Hatfield and J. H. Prueger, "Temperature extremes : Effect on plant growth and

development," Weather Clim. Extrem., vol. 10, pp. 4–10, Dec. 2015.

[99] J. Garnier, D. Guyon, and A. Moyse., "L'action de la température sur la photosynthèse réalisée par aphanocapsa (cyanophycée) en présence de radiations rouges ou orangées.," Physiol Vég 3, vol. 10, pp. 155–166, 1965.

[100] C. D. Ahrens, "An introduction to weather, climate, and the environment," Meteorology today, 2003.

[101] S. C. Mukhopadhyay, O. A. Postolache, K. P. Jayasundera, and A. K. Swain, Sensors for Everyday Life : Environmental and Food Engineering. Springer, 2017.

[102] T. Ahonen, R. Virrankoski, and M. Elmusrati, "Greenhouse monitoring with wireless sensor network," 2008 IEEE/ASME Int. Conf. Mechatronics Embed. Syst. Appl. MESA 2008, pp. 403–408, 2008.

[103] L. Ting, Z. Man, J. Yuhan, S. Sha, J. Yiqiong, and L. Minzan, "Management of CO2 in a tomato greenhouse using WSN and BPNN techniques.," Int. J. Agric. Biol. Eng., vol. 8, no. 4, pp. 43–51, 2015.

[104] B. A. Kimball and B. Acock, "Effects of Carbon Dioxide on Photosynthesis, Plant Growth, and Other Processes," in Impact of Carbon Dioxide, Trace Gases, and Climate Change on Global Agriculture, American Society of Agronomy, pp. 45–60. 1990.

[105] B. D. Duval et al., "Predicting Greenhouse Gas Emissions and Soil Carbon from Changing Pasture to an Energy Crop," PLoS One, vol. 8, no. 8, p. e72019, Aug. 2013.

[106] P. Vance and M. H. Spalding, "Growth, photosynthesis, and gene expression in Chlamydomonas over a range of CO 2 concentrations and CO 2 /O 2 ratios : CO 2 regulates multiple acclimation states," Can. J. Bot., vol. 83, no. 7, pp. 796–809, Jul. 2005.

[107] X. Bai and Z. Wang, "Collaborative fusion estimation over wireless sensor networks for monitoring CO 2 concentration in a greenhouse ," Inf. Fusion, vol. 42, no. October 2017, pp. 119–126, 2018.

[108] Y. EL AFOU, "Contribution au contrôle des paramètres climatiques sous serre," Thèse de doctorat, Université Lille 1 & Université Moulay Ismail, 2014.

[109] Hans Lambers, F Stuart Chapin III, and Thijs L. Pons, Plant Physiological Ecology, Springer. 2008.

[110] J. C. Bakker, Greenhouse climate control : an integrated approach. Wageningen Academic, 1995.

[111] P. G. H. Kamp and G. J. Timmerman, Computerized Environmental Control in Greenhouses : A Step by Step Approach. PTC, 2003.

[112] P. V. Shinde, M. Saxena, and M. K. Singh, "Recent Developments in Graphene-Based Two-Dimensional Heterostructures for Sensing Applications," in Fundamentals and Sensing Applications of 2D Materials, Elsevier, 2019, pp. 407–436.

[113] David J. Sample, James S. Owen, and Stefani Barlow, "Understanding Soil Moisture Sensors : A Fact Sheet for Irrigation Professionals in Virginia," Virginia Tech, 2016.

[114] Giuseppe Mininni and Amelia Manuti, Applied Psycholinguistics. Positive effects and ethical perspectives : Volume 1. FrancoAngeli,2012.

[115] Nahid Akhtar, Mechatronic Systems. Prowess, 2019.

[116] P. Ponce, A. Molina, P. Cepeda, E. Lugo, and B. Maccleery, Greenhouse Design and Control. CRC Press, 2014.

[117] NGMA, "Greenhouse Heating Efficiency Design Considerations.COPYRIGHT PENDING NGMA.", Tech. Rep., 1998.

[118] "Reznor UDAP Heater." [Online]. Available : https ://store.rimolgreenhouses.com/Reznor_UDAP_Heater_p/rezudap.htm. [Accessed : 09-Nov-2020].

[119] "ULMA-Agricola." [Online]. Available : https ://www.ulmaagricola.com/fr/serres/equipements/. [Accessed : 04-Nov-2020].

[120] "Heating Systems | Paul Boers Manufacturing." [Online]. Available : http ://paulboers.com/products/heating-systems/. [Accessed : 06-Dec-2020].

[121] T. Boulard and A. Baille, "A simple greenhouse climate control model incorporating effects of ventilation and evaporative cooling," Agric. For. Meteorol., vol. 65, no. 3–4, pp. 145–157, Aug. 1993.

[122] "indiamart :Greenhouse Air Circulation Fan." [Online]. Available : https ://www.indiamart.com /proddetail/greenhouse-air-circulation-fan-15216518955.html. [Accessed : 11-Nov-2020].

[123] "FOGSIS." [Online]. Available : http ://www.fogsis.com/haber-fogging-system-and-efficient-greenhouse-79.html. [Accessed : 09-Nov-2020].

[124] E. M. Nederhoff, Effects of CO2 concentration on photosynthesis, transpiration and production of greenhouse fruit vegetable crops. Landbouwuniversiteit te Wagenginen, 1994.

[125] G. N. Tiwari, Greenhouse Technology for a Controlled Environment . Alpha Science, 2003.

[126] "Water Resources Engineering." [Online]. Available : https ://www.aboutcivil.org/canal-irrigation-uses-effects.html. [Accessed : 10-Nov-2020].

[127] "PERDREAU." [Online]. Available : http ://www.perdreau.net/arrosage/arrosage-de-cultures-maraicheres-et-pepinieres/. [Accessed : 10-Nov-2020].

[128] "AGRIEXPO." [Online]. Available : https ://www.agriexpo.online/fr/prod/visser-horti-systems/
product-177311-31552.html. [Accessed : 07-Nov-2020].

[129] E. Bresler, B. L. McNeal, and D. L. Carter, Saline and Sodic Soils, vol. 10. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1982.

[130] "123RF." [Online]. Available : https ://www.123rf.com/photo_62431337_drip-irrigation-of-pepper-seedlings-in-the-greenhouse-several-rows-of-pepper-seedings-from-which-the.html. [Accessed : 10-Nov-2020].

[131] "Green and Vibrant." [Online]. Available : https ://www.greenandvibrant.com/ebb-and-flow-hydroponics. [Accessed : 07-Nov-2020].

[132] "NoSoilSolutions." [Online]. Available : https ://www.nosoilsolutions.com/ebb-flow-hydroponics/. [Accessed : 10-Nov-2020].

[133] J. A. L. Hage, "Fusion de données tolérante aux défaillances : Application à la surveillance de l'intégrité d'un système de localisation," Thèse de doctorat,université de Lille, 2016.

[134] G. Djaouher, "Comparatif de méthodes avancées pour la fusion d'images satellites," Thèse doctorat, université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2015.

[135] F. E. White, "Data Fusion Lexicon," Data Fusion Subpanel Jt. Dir. Lab. Tech. Panel C3, vol. 15, no. 0704, p. 15, 1991.

[136] D. L. Hall and J. Llinas, "An introduction to multisensor data fusion," Proc. IEEE, vol. 85, no. 1, pp. 6–23, 1997.

[137] H. Boström et al., "On the Definition of Information Fusion as a Field of Research," IKI Tech. Reports, no. HS-IKI-TR-07-006, pp. 1–8, 2007.

[138] J. Q. Gan and H. Hu, "Sensors and Data Fusion Algorithms in Mobile Robotics," Report CSM-422, Department of Computer Science, University of Essex, Tech. Rep. CSM-422, 2005.

[139] E. L.Walts, "'Data fusion for C3I : a tutorial,'" Command. Control. Commun. Intell. Handbook, EW Commun. Inc., Palo Alto, CA, pp. 217–226, 1986.

[140] H. B. Mitchell, Multi-sensor data fusion : an introduction. Springer, 2007.

[141] R. C. Luo and M. G. Kay, "multi–sensor integration and fusion in intelligent systems," IEEE Trans. Syst. Man Cybern., vol. 19, pp. 901–931, 1981.

[142] H. F. Duttant-Whyte, "'Sensor models and multi–sensor integration,'" Inter. J. Robot. Res., vol. 7, no. 6, pp. 97–113, 1989.

[143] Y. J. Zhao, R. Govindan, and D. Estrin, "'Residual energy scan for monitoring sensor networks,'" IEEE Wirel. Commun. Netw. Conf. Orlando, Florida, USA, pp. 356–362, 2002.

[144] R. Willett, A. Martin, and R. Nowak, "'Backcasting : Adaptive sampling for sensor networks,'" 3rd Int. Symp. Inf. Process. Sens. Networks, pp. 124–133, 2004.

[145] R. Nowak, U. Mitra, and R.Willett, "'Estimating inhomogeneous fields using wireless sensor networks,'" IEEE J. Sel. Areas Comm., vol. 22, n, pp. 999–1006, 2004.

[146] A. Singh, R. Nowak, and P. Ramanathan, "'Active learning for adaptive mobile sensing networks,' Proc. , pp.," 5th Int. Conf. Inf. Process. Sens. Networks, pp. 60–68, 2006.

[147] A. Hoover and B. D. Olsen, "'A real-time occupancy map from multiple video streams,'" IEEE Int. Conf. Robot. Autom. Detroit, MI, USA, pp. 2261–2266, 1999.

[148] A. Abdelgawad and M. Bayoumi, "Data Fusion in WSN," in Resource-Aware Data Fusion Algorithms for Wireless Sensor Networks, 2012, pp. 17–34.

[149] B. V. Dasarathy, "Sensor fusion potential exploitation-innovative architectures and illustrative applications," IEEE, vol. 85, pp. 24–38, 1997.

[150] F. Castanedo, "A Review of Data Fusion Techniques," Sci. J., p. 19, 2013.

[151] X. Luo, M. Dong, and Y. Huang, "On distributed fault-tolerant detection in wireless sensor networks," IEEE Trans. Comput., vol. 55, pp. 58–70, 2006.

[152] A. Abdelgawad and M. A. Bayoumi, Resource-Aware Data Fusion Algorithms for Wireless Sensor Networks. Springer, 2012.

[153] J. Polastre, J. Hill, and D. Culler, "Versatile low power media access for wireless sensor networks," 2nd ACM Int. Conf. Embed. Networked Sens. Syst. Balt. USA, Novemb. pp. 95–107,

2004.

[154] B. Krishnamachari and S. Iyengar, "Distributed Bayesian algorithms for fault-tolerant event region detection in wireless sensor networks,'" IEEE Trans. Comput., vol. 53, pp. 241–250, 2004.

[155] F. Nakamura, A. F. Loureiro, and C. Frery, "Data Fusion for Wireless Sensor Networks : Methods, Models, and Classifications," ACM Comput. Surv., vol. 39, 2007.

[156] R. Reynaud and S. Bouaziz, "Architecture de systèmes multicapteurs Multisensors Systems Architectur," Trait. du Signal, vol. 22, no. 4, pp. 393–405, 2005.

[157] J. R. Boyd, "A discourse on winning and losing. Unpublished set of briefing slides available at Air," University Library, Maxwell AFB, Alabama., 1987.

[158] A. N. Shulsky and G. J. Schmitt, Silent Warfare : Understanding the World of Intelligence,Potomac book, 2002.

[159] M. Bedworth and J. O'Brien, "Omnibus model : a new model of data fusion ?," IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag., vol. 15, no. 4, pp. 30–36, 2000.

[160] C. B. Frankel and M. D. Bedworth, "Control, estimation and abstraction in fusion architectures : Lessons from human information processing," in Proceedings of the 3rd International Conference on Information Fusion (FUSION 2000),Vol. 1. IEEE, Paris, France, MoC5/3–MoC5/10., 2000.

[161] M. M. Kokar, M. D. Bedworth, and C. B. Frankel, "A reference model for data fusion systems.," Sens. Fusion Archit. Algorithms Appl. IV. SPIE, Orlando, FL, pp. 191–202, 2000.

[162] H. Durrant-Whyte, "A Beginners Guide to Decentralised Data Fusion," Australian Centre for Field Robotics, The University of Sydney, Australia., 2000.

[163] H. S. Carvalho, W. B. Heinzelman, A. L. Murphy, and C. J. N. Coelho, "A general data fusion architecture," Proc. 6th Int. Conf. Inf. Fusion, FUSION 2003, vol. 2, pp. 1465–1472, 2003.

[164] J. Neira, J. D. Tardos, J. Horn, and G. Schmidt, "Fusing range and intensity images for mobile robot localisation.," IEEE Trans Rob Autom, pp. 76–83., 1999.

[165] J. R. Raol, Multi-Sensor Data Fusion with MATLAB. Taylor & Francis Group, 2009.

[166] L. Atallah, B. Lo, R. King, and G. Z. Yang, "Sensor positioning for activity recognition using wearable accelerometers," IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst., vol. 5, no. 4, pp. 320–329, Aug. 2011.

[167] L. S, G. RX, J. D, and F. P. . Staudenmayer JW, "Multisensor data fusion for physical activity assessment.," IEEE Trans Biomed Eng, vol. 59, pp. 687–96 , 2012.

[168] S. Thiemjarus, "A device-orientation independent method for activity recognition," Int. Conf. Body Sens. Networks, BSN 2010, pp. 19–23, 2010.

[169] H. Ghassemzadeh, E. Guenterberg, S. Ostadabbas, and R. Jafari, "A motion sequence fusion technique based on PCA for activity analysis in body sensor networks," Proc. 31st Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. Eng. Futur. Biomed. EMBC 2009, pp. 3146–3149, 2009.

[170] U. Maurer, A. Smailagic, D. Siewiorek, and M. Deisher, "Activity recognition and monitoring using multiple sensors on different body positions.," Proceed- ings BSN'06. IEEE ;, pp. 113–16 ., 2006.

[171] L. C. Jatobá, U. Großmann, C. Kunze, J. Ottenbacher, and W. Stork, "Context-aware mobile health monitoring : Evaluation of different pattern recognition methods for classification of

physical activity," Proc. 30th Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. EMBS'08 - "Personalized Healthc. through Technol., pp. 5250–5253, 2008.

[172] K. Altun, B. Barshan, and O. Tunçel, "Comparative study on classifying human activities with miniature inertial and magnetic sensors," Pattern Recognit., vol. 43, no. 10, pp. 3605–3620, Oct. 2010.

[173] N. Bicocchi, M. Mamei, and F. Zambonelli, "Detecting activities from body-worn accelerometers via instance-based algorithms," Pervasive Mob. Comput., vol. 6, no. 4, pp. 482–495, Aug. 2010.

[174] S. P. Lloyd, "Least Squares Quantization in PCM," IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 28, no. 2, pp. 129–137, 1982.

[175] S. Patel, C. Mancinelli, P. Bonato, J. Healey, and M. Moy, "Using wearable sensors to monitor physical activities of patients with COPD : A comparison of classifier performance proceedings," 6th Int. Work. Wearable Implant. Body Sens. Networks, BSN 2009, pp. 234–239, 2009.

[176] O. Banos, M. Damas, H. Pomares, A. Prieto, and I. Rojas, "Daily living activity recognition based on statistical feature quality group selection," Expert Syst. Appl., vol. 39, no. 9, pp. 8013–8021, Jul. 2012.

[177] A. Mannini and A. M. Sabatini, "On-line classification of human activity and estimation of walk-run speed from acceleration data using support vector machines," Proc. Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. EMBS, pp. 3302–3305, 2011.

[178] D. Rodriguez-Martin, A. Samà, C. Perez-Lopez, A. Català, J. Cabestany, and A. Rodriguez-Molinero, "SVM-based posture identification with a single waist-located triaxial accelerometer," Expert Syst. Appl., vol. 40, no. 18, pp. 7203–7211, Dec. 2013.

[179] D. Seo, E. Kang, Y. mi Kim, S. Y. Kim, I. S. Oh, and M. G. Kim, "SVM-based waist circumference estimation using Kinect," Comput. Methods Programs Biomed., vol. 191, p. 105418, Jul. 2020.

[180] J. Žemgulys, V. Raudonis, R. Maskeliunas, and R. Damaševičius, "Recognition of basketball referee signals from videos using Histogram of Oriented Gradients (HOG) and Support Vector Machine (SVM)," Procedia Comput. Sci., vol. 130, pp. 953–960, Jan. 2018.

[181] Bar-Shalomand and Y. T. E., "'Tracking in a cluttered environment with probabilistic data association,'" Automatica, vol. 11, no. 5, pp. 451–460, 1975.

[182] R. Esmzad and R. Mahboobi Esfanjani, "Modified likelihood probabilistic data association filter for tracking systems with delayed and lost measurements," Digit. Signal Process. A Rev. J., vol. 76, pp. 66–74, May 2018.

[183] X. U. Zhan-wei and W. A. N. G. Xin, "Probabilistic Data Association Method for Space Object Tracking," Chinese Astronomy and Astrophysics, vol. 42, no. 2. Elsevier Ltd, pp. 303–312, 01-Apr-2018.

[184] Y. Xie, Y. Huang, and T. L. Song, "Iterative joint integrated probabilistic data association filter for multiple-detection multiple-target tracking," Digit. Signal Process. A Rev. J., vol. 72, pp. 232–243, Jan. 2018.

[185] B. R. Bracio, W. Horn, and D. P. F. Moeller, "Sensor fusion in biomedical systems," Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. - Proc., vol. 3, pp. 1387–1390, 1997.

[186] R. E. Kalman, "A new approach to linear filtering and prediction problems,"," Trans. ASME-Journal Basic Eng., vol. 82, pp. 35–45, 1960.

[187] R. C. Luo and M. G. Kay, "Data fusion and sensor integration : State-of-the-art 1990s.," Data Fusion Robot. Mach. Intell., pp. 7–135., 1992.

[188] O. L. R. Jacobs, Introduction to control theory. Oxford University Press, 1993.

[189] R. G. Brown and P. Y. C. Hwang, Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering,3rd ed. John Wiley & Sons, New York, NY., 1996.

[190] D. Zhu, B. Zhao, and S. Wang, "Mobile target indoor tracking based on Multi-Direction Weight Position Kalman Filter," Comput. Networks, vol. 141, pp. 115–127, Aug. 2018.

[191] D. Y. Kim and M. Jeon, "Data fusion of radar and image measurements for multi-object tracking via Kalman filtering," Inf. Sci. (Ny)., vol. 278, pp. 641–652, Sep. 2014.

[192] C. Liang, F. Wen, and Z. Wang, "Trust-based distributed Kalman filtering for target tracking under malicious cyber attacks," Information Fusion, vol. 46. Elsevier B.V., pp. 44–50, 01-Mar-2019.

[193] S. E. Li et al., "Kalman filter-based tracking of moving objects using linear ultrasonic sensor array for road vehicles," Mech. Syst. Signal Process., vol. 98, pp. 173–189, Jan. 2018.

[194] B. Allotta et al., "An unscented Kalman filter based navigation algorithm for autonomous underwater vehicles," Mechatronics, vol. 39, pp. 185–195, Nov. 2016.

[195] G. Wang et al., "A GNSS/INS Integrated Navigation Algorithm Based on Kalman Filter," IFAC-PapersOnLine, vol. 51, no. 17, pp. 232–237, Jan. 2018.

[196] P. M. Blok, K. van Boheemen, F. K. van Evert, J. IJsselmuiden, and G. H. Kim, "Robot navigation in orchards with localization based on Particle filter and Kalman filter," Comput. Electron. Agric., vol. 157, pp. 261–269, Feb. 2019.

[197] Y. Xu, Y. S. Shmaliy, X. Chen, Y. Li, and W. Ma, "Robust inertial navigation system/ultra wide band integrated indoor quadrotor localization employing adaptive interacting multiple model-unbiased finite impulse response/Kalman filter estimator," Aerosp. Sci. Technol., vol. 98, p. 105683, Mar. 2020.

[198] C. Brown, Durrant-Whyte, L. H., B. J., Rao, and B. Steer, Distributed data fusion using Kalman filtering : A robotics application. M. A. Abidi and R. C. Gonzalez, Eds. Academic Press, Inc., 1992.

[199] N. Patwari, A. O. Hero, M. Perkins, N. S. Correal, and R. J. O'Dea, "Relative location estimation in wireless sensor networks," IEEE Trans. Signal Process., vol. 51, no. 8, pp. 2137–2148, Aug. 2003.

[200] Lei Fang, Wenliang Du, and Peng Ning, "A beacon-less location discovery scheme for wireless sensor networks," Proc. IEEE 24th Annu. Jt. Conf. IEEE Comput. Commun. Soc., vol. 1, pp. 161–171, 2005.

[201] R. Niu and P. K. Varshney, "Target location estimation in sensor networks with quantized data," IEEE Trans. Signal Process., vol. 54, no. 12, pp. 4519–4528, Dec. 2006.

[202] T. Li, A. Ekpenyong, and Y. F. Huang, "Source localization and tracking using distributed asynchronous sensors," IEEE Trans. Signal Process., vol. 54, no. 10, pp. 3991–4003, Oct. 2006.

[203] C. E. Chen, A. M. Ali, and H. Wang, "Design and testing of robust acoustic arrays for localization and enhancement of several bird sources," Proc. Fifth Int. Conf. Inf. Process. Sens. Networks, IPSN 2006, pp. 268–275, 2006.

[204] X. Sheng and Y. H. Hu, "Maximum likelihood multiple-source localization using acoustic energy measurements with wireless sensor networks," IEEE Trans. Signal Process., vol. 53, no. 1, pp. 44–53, Jan. 2005.

[205] T. Schmitt, R. Hanek, M. Beetz, S. Buck, and B. Radig, "Cooperative probabilistic state estimation for vision-based autonomous mobile robots," IEEE Trans. Robot. Autom., vol. 18, no. 5, pp. 670–684, Oct. 2002.

[206] Y. Yuan and M. Kam, "Distributed decision fusion with a random-access channel for sensor network applications," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 53, no. 4, pp. 1339–1344, Aug. 2004.

[207] S. Santini, S. Santini, and K. Römer, "An Adaptive Strategy for Quality-Based Data Reduction in Wireless Sensor Networks," Proc. 3RD Int. Conf. NETWORKED Sens. Syst. (INSS'06), pp. 29–36, 2006.

[208] C. L. Yang, S. Bagchi, and W. J. Chappell, "Location tracking with directional antennas in wireless sensor networks," IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig., vol. 2005, pp. 131–134, Dec. 2005.

[209] S. W. Smith, The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing, 2nd ed. California Technical Publishing, San Diego, CA., 1999.

[210] E. F. Nakamura, F. G. Nakamura, C. M. S. Figueiredo, and A. A. F. Loureiro, "Using information fusion to assist data dissemination in wireless sensor networks," Telecommun. Syst., vol. 30, no. 1–3, pp. 237–254, Nov. 2005.

[211] P. Chavali and A. Nehorai, "Hierarchical particle filtering for multi-modal data fusion with application to multiple-target tracking," Signal Processing, vol. 97, pp. 207–220, Apr. 2014.

[212] M. Isard and A. Blake, "Contour tracking by stochastic propagation of conditional density," Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics), vol. 1064, pp. 343–356, 1996.

[213] A. Doucet, B. N. Vo, C. Andrieu, and M. Davy, "Particle filtering for multi-target tracking and sensor management," Proc. 5th Int. Conf. Inf. Fusion, FUSION 2002, vol. 1, pp. 474–481, 2002.

[214] F. Gustafsson and F. Gunnarsson, "Positioning using time-difference of arrival measurements," ICASSP, IEEE Int. Conf. Acoust. Speech Signal Process. - Proc., vol. 6, pp. 553–556, 2003.

[215] T. R. Bayes, "An essay towards solving a problem in the doctrine of chances.," Philos. Trans. R. Soc. 53, pp. 370–418., 1763.

[216] D. L. Hall and J. Llinas, Handbook of Multisensor Data Fusion. CRC Press, Boca Raton, Fla, USA, 2001.

[217] A. P. Dempster, "A generalization of Bayesian inference," J. R. Stat. Soc., pp. 205–247, 2008. [218] G. Shafer, A Mathematical Theory of Evidence. Princeton University Press, 1976.

[219] G. M. Provan, "The validity of Dempster-Shafer belief functions.," Int. J. Approx. Reason., vol. 6, pp. 389–399., 1992.

[220] T. D. Garvey, J. D. Lowrance, and M. A. Fischler, "An Inference Technique for Integrating Knowledge from Disparate Sources," SRI International , Menlo Park, California, Tech. Rep., 1981.

[221] G. Banon, "Distinction between several subsets of fuzzy measures," Fuzzy Sets Syst., vol. 5, no. 3, pp. 291–305, May 1981.

[222] V. Novák, I. Perfilieva, and J. Močkoř, Mathematical Principles of Fuzzy Logic. Springer

US, 1999.

[223] P. P. Bonissone, “Soft computing : the convergence of emerging reasoning technologies,” Soft Comput. - A Fusion Found. Methodol. Appl., vol. 1, no. 1, pp. 6–18, Apr. 1997.

[224] F. Rosenblatt, “Two theorems of statistical separability in the perceptron,” Mechanization of Thought Processes. National Physical Laboratory, London, UK, 1959.

[225] B. Widrow and M. Hoff, “Adaptive switching circuits.,” IRE West. Electr. Show Conv. Rec. 4, pp. 96–104, 1960.

[226] M. R. Roth, “Survey of neural network technology for automatic target recognition.,” IEEE Trans. Neural Netw., vol. 1, pp. 28–33, 1990.

[227] A. Filippidis, L. C. Jain, and N. Martin, “Fusion of intelligent agents for the detection of aircraft in SAR images.,” IEEE Trans. Patt. Anal. Mach. Intell., pp. 378–384., 2000.

[228] K. Kolanowski, A. Swietlicka, R. Kapela, and J. Pochmara, “Multisensor data fusion using Elman neural networks,” Appl. Math. Comput. 244, vol. 319, no. 15, pp. 236–244, 2017.

[229] V. L. Popov, S. A. Ahmed, A. V. Topalov, and N. G. Shakev, “Development of Mobile Robot Target Recognition and Following Behaviour Using Deep Convolutional Neural Network and 2D Range Data,” IFAC-PapersOnLine, vol. 51, no. 30, pp. 210–215, Jan. 2018.

[230] T. W. Lewis and D. M. W. Powers, “Audio-visual speech recognition using red exclusion and neural networks.,” Proc. 25th Australas. Conf. Comput. Sci. Aust. Comput. Soc. Inc., Melbourne, Victoria, Aust., pp. 149–156., 2002.

[231] C. Cimander, M. Carlsson, and C. Mandenuis, “Sensor fusion for on-line monitoring of yoghurt fermentation.,” J. Biotech., vol. 99, pp. 237–248., 2002.

[232] L. Yiyao, Y. V. Venkatesh, and C. C. Ko, “A knowledge-based neural network for fusing edge maps of multi-sensor images.,” Inform. Fusion, no. 2, pp. 121–133., 2001.

[233] L. Jing, T. Wang, M. Zhao, and P. Wang, “An adaptive multi-sensor data fusion method based on deep convolutional neural networks for fault diagnosis of planetary gearbox,” Sensors (Switzerland), vol. 17, no. 2, 2017.

[234] M. Blessing, B. Jebaseeli, and S. N, “Study on Raspberry Pi-architecture,” Int. J. Contemp. Res. Comput. Sci. Technol., vol. 4, no. 1, Jan. 2018.

[235] “raspberrypi.org.” [Online]. Available : https ://www.raspberrypi.org/. [Accessed : 29-Nov-2020].

[236] D. S. Hooda and V. Raich, Fuzzy Logic Models and Fuzzy Control : an Introduction. Alpha Science International, 2016.

[237] L. A. Zadeh, “Fuzzy sets,” Inf. Control, vol. 8, no. 3, pp. 338–353, Jun. 1965.

[238] T. Nesrine, “Conception des Systèmes d’Inférence Floue par des Approches Hybrides : Application pour la Commande et la Modélisation des Systèmes Nonlinéaires,” Thèse Doctorat ,Université de Constantine 1, 2014.

[239] C. C. Lee, “Fuzzy Logic in Control Systems : Fuzzy Logic Controller—Part I,” IEEE Trans. Syst. Man Cybern., vol. 20, no. 2, pp. 404–418, 1990.

[240] C. C. Lee, “Fuzzy Logic in Control Systems : Fuzzy Logic Controller, Part II,” IEEE Trans. Syst. Man Cybern., vol. 20, no. 2, pp. 419–435, 1990.

[241] E. P. Dadios, Fuzzy Logic - Algorithms, Techniques and Implementations.IntechOpen, 2012.

[242] P. Albertos, Antonio Sala, and Manuel Olivares, "Fuzzy Logic Controllers. Methodology, Advantages and Drawbacks," Conf. X Congr. Español sobre Tecnol. y Lógica Fuzzy, ESTYLF 2000At Sevilla, España, 2000.

[243] F. Behrooz, N. Mariun, M. H. Marhaban, M. A. M. Radzi, and A. R. Ramli, "Review of control techniques for HVAC systems-nonlinearity approaches based on fuzzy cognitive maps," Energies, vol. 11, no. 3, Feb. 2018.

[244] A. Čolaković and M. Hadžialić, "Internet of Things (IoT) : A review of enabling technologies, challenges, and open research issues," Computer Networks, vol. 144. Elsevier B.V., pp. 17–39, 24-Oct-2018.

[245] D. Miorandi, S. Sicari, F. De Pellegrini, and I. Chlamtac, "Internet of things : Vision, applications and research challenges," Ad Hoc Networks, vol. 10, no. 7. Elsevier B.V., pp. 1497–1516, 01-Sep-2012.

[246] I. D. . N. E. & RFID, I. G. . M. & Nanosystems, and in co-operation with W. G. R. O. T. E. E. The, "Internet of Things in 2020 : Roadmap for the future,"Tech. Rep, 2008.

[247] L. Atzori, A. Iera, and G. Morabito, "The internet of things : A survey," Comput. networks, vol. 54, no. 15, 2010.

[248] M. Weiser, "The Computer for the 21st Century," Sci. Am., vol. 256, no. 3, 1991.

[249] K. Rose, S. Eldridge, and L. Chapin, "The Internet of Things : An Overview,"Internet Society, Tech. Rep., 2015.

[250] K. Lakhwani, H. Gianey, N. Agarwal, and S. Gupta, "Development of IoT for Smart Agriculture a Review," in Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 841, pp. 425–432, 2019.

[251] "Node-RED." [Online]. Available : https ://nodered.org/. [Accessed : 26-Nov-2020].

[252] "Node-RED in DITAS - Ditas Project." [Online]. Available : https ://www.ditas-project.eu/node-red-ditas/. [Accessed : 27-Nov-2020].

[253] Clement Fortin, Product Lifecycle Management in the Digital Twin Era. Springer, 2019.

[254] F. U. Dowla, Handbook of RF and wireless technologies. Newnes, 2004.

[255] Z. E. H. Kamal and M. A. Salahuddin, "Introduction to wireless sensor networks," in Wireless Sensor and Mobile Ad-Hoc Networks Vehicular and Space Applications, Springer New York, 2015, pp. 3–32.

[256] Z. Zhu and S. H. Yang, "A possible hardware architecture of wireless sensor nodes," in Conference Proceedings - IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 2006, pp. 3377–3381.

[257] D. Sharma, S. Verma, and K. Sharma, "Network Topologies in Wireless Sensor Networks : A Review 1," Int. J. Electron. Commun. Technol., vol. 4, no. 3, 2013.

[258] D. G. Reina, S. L. Toral, F. Barrero, N. Bessis, and E. Asimakopoulou, "The role of ad hoc networks in the Internet of Things : A case scenario for smart environments," in Studies in Computational Intelligence, vol. 460, Springer Verlag, 2013, pp. 89–113.

[259] N. Semiconductor, "nRF24L01+ Datasheet," NORDIC SEMICONDUCTOR, Tech. Rep., 2008.

[260] H. Saha, S. Mandal, S. Mitra, S. Banerjee, and U. Saha, "Comparative Performance Analysis between nRF24L01+ and XBEE ZB Module Based Wireless Ad-hoc Networks," Int. J. Comput. Netw. Inf. Secur., vol. 9, no. 7, pp. 36–44, Jul. 2017.

[261] "nRF24L01+ - AliExpress." [Online]. Available : https ://fr.aliexpress.com/item/1859126831.html. [Accessed : 06-Dec-2020].

[262] "last minute engineers.com." [Online]. Available : https ://static.cinay.xyz/2019/07/Module-sans-fil-nRF24L01-et-interface-avec-Arduino.html. [Accessed : 07-Dec-2020].

[263] H. Garcia-Molina, J. D. Ullman, and J. Widom, Database Systems : The Complete Book (Second Edition). Pearson Education, 2002.

[264] G. Gardari, Bases de données. EYROLLES, 2003.

[265] Dominique Awara, "Conception et réalisation d'une base de donnée pour la gestion des formateurs. Cas de l'institut national de préparation professionnelle (INPP/Kisangani RD Congo)," Ph.D. dissertation, INPP/Kisangani RD Congo, 2014.

[266] J. L.Harrington, "Installing and Running MySQL," in SQL Clearly Explained (Second edition), Morgan Kaufmann, 2003, pp. 3–8.

[267] Ss. Kumar, D. Rao, Jr. Prasad, Lr. Kumar, and Ks. Rani, "Agricity-An Agricultural Information System," Int. J. Eng. Res. Appl. www.ijera.com, vol. 7, pp. 62–65, 2017.

[268] Poornima Naik and Girish Naik, Exploring Object Oriented and Database Programming Concepts of PHP - Harnessing the Power of XAMPP. Evincepub Publishing, 2019.

[269] L. A. Zadeh, "Fuzzy Logic," Computer (Long. Beach. Calif)., vol. 21, no. 4, pp. 83–93, Apr. 1988.

[270] F. Mei, Z. Man, and T. Nguyen, "Fuzzy modelling and tracking control of nonlinear systems," Math. Comput. Model., vol. 33, no. 6–7, pp. 759–770, Mar. 2001.

[271] M. Azaza, C. Tanougast, E. Fabrizio, and A. Mami, "Smart greenhouse fuzzy logic based control system enhanced with wireless data monitoring," ISA Trans., vol. 61, pp. 297–307, 2016.

[272] Z. Liu, F. Wang, Y. Zhang, X. Chen, and C. L. P. Chen, "Adaptive fuzzy output-feedback controller design for nonlinear systems via backstepping and small-gain approach," IEEE Trans. Cybern., vol. 44, no. 10, pp. 1714–1725, Oct. 2014.

[273] E. Danish and M. Onder, "Application of Fuzzy Logic for Predicting of Mine Fire in Underground Coal Mine," Safety and Health at Work, vol. 11, no. 3, pp. 322-334, jun 2020.

[274] P. Fedor and D. Perduková, "Use of Fuzzy Logic for Design and Control of Nonlinear MIMO Systems," in Modern Fuzzy Control Systems and Its Applications, InTech, 2017.

[275] P. Cepeda, P. Ponce, D. Romero, and A. Molina, "Fuzzy C-Means Clustering Technique Applied for Modeling Parameters of an Intelligent Greenhouse Open Control System," in 2011 IEEE Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference, 2011, pp. 283–288.

[276] "OpenWeatherMap."[Online]. Available : https ://openweathermap.org/. [Accessed : 05-Dec-2020].

[277] "No-IP.com." [Online]. Available : https ://www.noip.com/. [Accessed : 11-Dec-2020].

[278] "RF24 - Arduino Libraries." [Online]. Available : https ://www.arduinolibraries.info/libraries /rf24. [Accessed : 26-Nov-2020].

[279] L. Gao, M. Zhang, and G. Chen, "An intelligent irrigation system based on wireless sensor network and fuzzy control," J. Networks, vol. 8, no. 5, pp. 1080–1087, 2013.

[280] B. Harish Kumar, "WSN based Automatic Irrigation and Security System using Raspberry Pi Board," in 2017 International Conference on Current Trends in Computer, Electrical, Electronics and Communication (CTCEEC), 2017, pp. 1097–1103.

[281] "ADE : Algérienne Des Eaux," 2020. [Online]. Available : http ://www.ade.dz/. [Accessed : 05-Jun-2021].

[282] "Sonelgaz," 2020. [Online]. Available : https ://www.sonelgaz.dz/fr. [Accessed : 09-Dec-2020].

[283] "Dzduino Online Store." [Online]. Available : https ://www.dzduino.com/. [Accessed : 19-Nov-2020].

[284] M. S. Munir, I. S. Bajwa, M. A. Naeem, and B. Ramzan, "Design and implementation of an IoT system for smart energy consumption and smart irrigation in tunnel farming," Energies, vol. 11, no. 12, 2018.

[285] G. Bonanomi et al., "Assessing soil quality under intensive cultivation and tree orchards in Southern Italy," Appl. Soil Ecol., vol. 47, no. 3, pp. 184–194, 2011.

[286] D. Yavuz, M. Kara, and S. Suheri, "Comparison of different irrigation methods in terms of water use and yield in potato farming," J. Selcuk Univ. Nat. Appl. Sci., vol. 1, no. 2, pp. 1–12, 2012.

[287] A. J. Clemmens and A. R. Dedrick, "Irrigation Techniques and Evaluations," Springer, Berlin, Heidelberg, 1994, pp. 64–103.

[288] G. Villarrubia, J. F. De Paz, D. H. De La Iglesia, and J. Bajo, "Combining multi-agent systems and wireless sensor networks for monitoring crop irrigation," Sensors (Switzerland), vol. 17, no. 8, 2017.

[289] F. Touati, M. Al-Hitmi, K. Benhmed, and R. Tabish, "A fuzzy logic based irrigation system enhanced with wireless data logging applied to the state of Qatar," Comput. Electron. Agric., vol. 98, pp. 233–241, Oct. 2013.

[290] A. Goap, D. Sharma, A. K. Shukla, and C. R. Krishna, "An IoT based smart irrigation management system using Machine learning and open source technologies," Comput. Electron. Agric., vol. 155, no. September, pp. 41–49, 2018.