



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Mohamed Khider – BISKRA  
Faculté des Sciences Exactes, des Sciences de la Nature et de la Vie  
**Département d'informatique**

N° d'ordre : RTIC21 /M2/2018

## Mémoire

Présenté pour obtenir le diplôme de master académique en

# Informatique

Parcours : Réseaux et TIC

---

# Une approche IoT pour la mise en œuvre des serres intelligentes connectées

---

Par :

**ZERAIB ALA EDDINE**

Soutenu le 24 / 06 / 2018, devant le jury composé de :

|                                |       |              |
|--------------------------------|-------|--------------|
| M <sup>r</sup> Bellouar Hocine | M A A | Président    |
| M <sup>r</sup> Ayad Soheyb     | M C B | Rapporteur   |
| M <sup>me</sup> Berima Salima  | M A A | Examinatrice |

# Remerciements

*En préambule à ce mémoire je remercie ALLAH qui m'aide et me donne la patience et le courage durant ces longues années d'étude.*

*Je voudrais tout d'abord adresser toute ma gratitude à mon superviseur de ce mémoire, Dr. Soheyb AYAD, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.*

*Je désire aussi remercier Dr. Sadek Labib TERRISSA, qui a eu l'amabilité de répondre à mes questions et de fournir les explications nécessaires.*

*Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers les amis et collègues qui m'ont apporté leur support moral et intellectuel tout au long de ma démarche. Un grand merci à mes parents pour m'avoir encouragé et pour m'avoir épaulé moralement tous les jours dans la construction de ce mémoire. Sans eux, je n'en serais pas là. Et enfin j'exprime mes profonds remerciements à ma tante N. BOUCHABOU pour son aide précieuse, surtout dans cette période éprouvante qu'est la dernière ligne droite.*

*Ala Eddine Zeraib*

# *Table des matières*

|  |    |
|--|----|
| Introduction Générale .....                                      | 1  |
| 1. Généralités sur l'Internet des Objets                         |    |
| 1.1. Introduction .....  | 3  |
| 1.2. Définition de l'IoT .....                                   | 3  |
| 1.3. Fonctionnement de l'IoT .....                               | 4  |
| 1.4. Architectures de l'IoT .....                                | 5  |
| 1.4.1. Couche d'objets .....                                     | 6  |
| 1.4.2. Couche abstraite d'objet (Couche Réseau) .....            | 6  |
| 1.4.3. Couche de gestion de service (Couche Intermédiaire) ..... | 6  |
| 1.4.4. Couche d'application .....                                | 6  |
| 1.4.5. Couche Business .....                                     | 7  |
| 1.5. Les éléments de l'IoT .....                                 | 7  |
| 1.5.1. Identification .....                                      | 8  |
| 1.5.2. Détection .....   | 8  |
| 1.5.3. Communication .....                                       | 9  |
| 1.5.4. Calcul .....  | 10 |
| 1.5.5. Services .....  | 11 |
| 1.5.6. Sémantique .....  | 11 |
| 1.6. Protocoles de l'IoT .....                                   | 11 |
| 1.6.1. Protocoles d'application .....                            | 12 |
| 1.6.1.1. MQTT .....  | 12 |
| 1.6.1.2. CoAP .....  | 13 |
| 1.6.1.3. AMQP .....  | 13 |
| 1.6.1.4. XMPP .....  | 14 |
| 1.6.2. Protocoles de découverte de service .....                 | 15 |
| 1.6.2.1. mDNS .....  | 15 |
| 1.6.2.2. DNS-SD .....  | 16 |
| 1.6.3. Protocoles d'infrastructure .....                         | 17 |
| 1.6.3.1. Bluetooth .....   | 17 |
| 1.6.3.2. 6LowPAN .....   | 17 |
| 1.6.3.3. ZigBee (IEEE 802.15.4) .....                            | 18 |
| 1.6.3.4. LTE-A (Long Term Evolution – Advanced) .....            | 19 |
| 1.6.3.5. Z-Wave .....  | 19 |
| 1.7. Domaines d'application de l'IoT .....                       | 20 |
| 1.8. Les défis de l'IoT .....                                    | 21 |
| 1.9. Conclusion .....  | 22 |
| 2. Agriculture Intelligente et Travaux Connexes                  |    |
| 2.1. Introduction .....  | 23 |
| 2.2. Agriculture intelligente .....                              | 23 |
| 2.2.1. Le concept d'agriculture intelligente .....               | 24 |
| 2.2.2. L'impact des TIC sur l'agriculture .....                  | 25 |

|  |    |
|--|----|
| 2.2.3. Les systèmes de traçabilité des produits .....  | 25 |
| 2.2.4. L'utilisation accrue des TIC dans l'agriculture .....   | 26 |
| 2.2.5. À l'aube d'une agriculture à haute technologie .....  | 27 |
| 2.2.6. Ce que l'IoT permet de faire dans l'agriculture ? .....   | 27 |
| 2.2.7. Des pixels aux tonnes récoltées .....   | 28 |
| 2.2.8. Agriculture de précision et agriculture intelligente .....  | 28 |
| 2.2.9. Quelques données analytiques agricoles .....  | 29 |
| 2.2.10. L'infrastructure agricole intelligente et les besoins de recherche .....   | 30 |
| 2.3. Travaux Connexes .....  | 31 |
| 2.3.1. Imagerie thermique dans l'irrigation intelligente .....   | 31 |
| 2.3.2. Solution IoT pour améliorer la précision des mesures en serre .....   | 33 |
| 2.3.3. Un algorithme génétique pour l'optimisation des coûts énergétiques dans le<br>système d'irrigation de la ferme intelligente ..... | 34 |
| 2.3.4. Système de surveillance environnementale pour une agriculture intelligente .....  | 35 |
| 2.3.5. Gestion optimale de l'énergie des serres dans les Smart Grids .....   | 36 |
| 2.4. Comparaison des travaux connexes .....  | 37 |
| 2.5. Conclusion .....  | 38 |

### 3. Conception du système

|   |    |
|---|----|
| 3.1. Introduction .....   | 39 |
| 3.2. Architecture générale .....  | 39 |
| 3.3. Architecture détaillée .....   | 40 |
| 3.3.1. Principaux composants du côté client .....   | 42 |
| 3.3.2. Schéma électronique .....  | 43 |
| 3.3.3. Coté fournisseur (Composants du système) .....   | 44 |
| 3.4. L'analyse du système .....   | 45 |
| 3.4.1. L'objectif du système .....  | 45 |
| 3.4.2. Les besoins fonctionnels .....   | 45 |
| 3.4.3. Les besoins non fonctionnels .....   | 46 |
| 3.4.4. Diagramme de cas d'utilisation .....   | 46 |
| 3.4.5. Diagramme de séquence .....  | 49 |
| 3.4.5.1. Diagramme de séquence du scénario « Authentification » .....   | 49 |
| 3.4.5.2. Diagramme de séquence du scénario « Collection d'informations » .....                                      | 50 |
| 3.4.5.3. Diagramme de séquence du scénario « Contrôle automatique par le serveur<br>de décision automatique » ..... | 50 |
| 3.4.5.4. Diagramme de séquence de scénario « Commande manuel » .....  | 51 |
| 3.4.5.5. Diagramme de séquence de scénario « Pré-configuration du serveur de<br>décision automatique » .....        | 51 |
| 3.4.5.6. Diagramme de séquence de scénario « Configurations de l'admin » .....                                      | 52 |
| 3.4.6. Modèle conceptuel de notre base de données principale .....  | 53 |
| 3.5. Un système intelligent avec l'optimisation d'énergie .....   | 53 |
| 3.5.1. L'énergie verte .....  | 53 |
| 3.5.2. Algorithmes génétiques et consommation d'énergie .....   | 54 |
| 3.5.3. Etude de cas .....   | 54 |
| 3.6. L'algorithme génétique .....   | 57 |
| 3.6.1. Le fonctionnement des algorithmes génétiques .....   | 57 |
| 3.6.2. L'application de l'algorithme génétique .....  | 58 |
| 3.6.2.1. Le codage d'individus .....  | 59 |

|  |    |
|--|----|
| 3.6.2.2. La sélection .....              | 60 |
| 3.6.2.3. L'opération de croisement ..... | 61 |
| 3.6.2.4. L'opération de mutation .....   | 61 |
| 3.6.2.5. Remplacement .....              | 62 |
| 3.6.2.6. Critère d'arrêt .....           | 62 |
| 3.7. Conclusion .....                    | 62 |

## 4. Implémentation du système

|  |    |
|--|----|
| 4.1. Introduction .....  | 63 |
| 4.2. Langage de programmation .....  | 63 |
| 4.3. Les outils et les frameworks de développement .....                   | 64 |
| 4.3.1. Paho-MQTT .....   | 64 |
| 4.3.2. Broker Mosquitto .....  | 65 |
| 4.3.3. Web.py Python Web Framework .....                                   | 65 |
| 4.3.4. Le framework Django .....   | 65 |
| 4.3.5. Python Dataset .....  | 66 |
| 4.3.6. PyCharm .....   | 66 |
| 4.4. Les équipements électroniques .....                                   | 66 |
| 4.4.1. Raspberry Pi .....  | 66 |
| 4.4.2. Capteur AS-XM1000 802.15.4 Mote .....                               | 68 |
| 4.4.3. Le sink SG1000 .....  | 68 |
| 4.4.4. Relai 8 Canaux .....  | 69 |
| 4.5. Les algorithmes principaux du système .....                           | 70 |
| 4.5.1. Pseudo-algorithmes du côté client .....                             | 70 |
| 4.5.1.1. Pseudo-algorithme du Sink Intermédiaire (Raspberry Pi) .....      | 70 |
| 4.5.1.2. Pseudo-algorithmes du Sink Principal .....                        | 70 |
| 4.5.2. Pseudo-algorithme du côté fournisseur (Composants du système) ..... | 71 |
| 4.5.2.1. Serveur d'abonnement maître (MSub Server) .....                   | 72 |
| 4.5.2.2. Serveur de Contrôle (Ctrl Server) .....                           | 72 |
| 4.5.2.3. Serveur de décision automatique (AD Server) .....                 | 73 |
| 4.5.3. Pseudo-algorithme de l'algorithme génétique .....                   | 74 |
| 4.6. L'interface SaaS .....  | 75 |
| 4.6.1. Page principale (page d'accueil) .....                              | 75 |
| 4.6.2. Page de surveillance .....  | 76 |
| 4.6.3. Profil du client .....  | 77 |
| 4.6.4. Logger .....  | 78 |
| 4.6.5. Commandes .....   | 78 |
| 4.6.6. Décision Automatique .....  | 79 |
| 4.6.7. Statistiques .....  | 79 |
| 4.6.8. Gestion de l'énergie verte .....                                    | 80 |
| 4.6.9. La page web Admin .....   | 81 |
| 4.7. Application Mobile .....  | 83 |
| 4.8. Déploiement de la solution .....                                      | 84 |
| 4.9. Conclusion .....  | 85 |
| Conclusion Générale et perspectives .....                                  | 86 |
| Bibliographie .....  | 87 |

# Listes des figures

|  |    |
|--|----|
| Figure 1.1 : Couches d'architecture IoT adaptées de [12] .....   | 5  |
| Figure 1.2 : Les éléments de l'IoT .....   | 7  |
| Figure 1.3 : Fonctionnement du protocole MQTT .....  | 12 |
| Figure 1.4 : Fonctionnalité CoAP .....   | 13 |
| Figure 1.5 : Mécanisme de publication / abonnement d'AMQP .....  | 14 |
| Figure 1.6 : Communication en XMPP .....   | 14 |
| Figure 1.7 : Structure d'une strophe XMPP .....  | 14 |
| Figure 1.8 : Requête/Réponse dans le protocole mDNS .....  | 16 |
| Figure 1.9 : Découvrir le service d'impression par DNS-SD .....  | 16 |
| Figure 1.10 : Les domaines d'Internet des Objets .....   | 20 |
| Figure 2.1 : Chaîne de valeur illustrant la collecte de données des nœuds de capteurs et de<br>la chaîne d'analyse au système d'aide à la décision basé sur le Web ..... | 24 |
| Figure 2.2 : L'IoT dans l'agriculture .....  | 27 |
| Figure 2.3 : L'appareil de Pix4D .....   | 28 |
| Figure 2.4 : L'identification automatique des maladies des plantes .....   | 29 |
| Figure 2.5 : Exemples d'informations provenant de l'imagerie thermique .....   | 32 |
| Figure 2.6 : Vue d'ensemble du déploiement d'un système d'irrigation automatisé basé sur<br>le Cloud of Things .....   | 32 |
| Figure 2.7 : Représentation schématique d'une production de légumes horticoles en serre<br>utilisant les capacités IoT .....   | 33 |
| Figure 2.8 : Schéma fonctionnel du système d'irrigation intelligent de la ferme .....  | 35 |
| Figure 2.9 : L'architecture du système de surveillance de l'environnement sur le terrain .....   | 35 |
| Figure 2.10 : Système d'énergie de serre .....   | 36 |
| Figure 3.1 : Architecture générale .....   | 40 |
| Figure 3.2 : Architecture détaillée .....  | 41 |
| Figure 3.3 : Schéma électronique .....   | 44 |
| Figure 3.4 : Diagramme de cas d'utilisation .....  | 47 |
| Figure 3.5 : Diagramme de séquence du scénario « Authentification » .....  | 49 |
| Figure 3.6 : Diagramme de séquence du scénario « Collection d'information en serre » .....   | 50 |
| Figure 3.7 : Diagramme de séquence du contrôle automatique par le serveur de décision<br>automatique .....   | 50 |
| Figure 3.8 : Diagramme de séquence de la commande manuel .....   | 51 |
| Figure 3.9 : Diagramme de séquence de la pré-configuration du serveur de décision<br>automatique .....   | 51 |
| Figure 3.10 : Diagramme de séquence des configurations de l'admin .....  | 52 |
| Figure 3.11 : Modèle conceptuel de la base de données principale .....   | 53 |
| Figure 3.12 : Principe général des algorithmes génétiques .....  | 58 |
| Figure 4.1 : Raspberry Pi 3 Model B .....  | 67 |
| Figure 4.2 : Capteur de temperature, humidité et la lumière AS-XM1000 802.15.4 Mote .....  | 68 |
| Figure 4.3 : Le sink SG-1000 .....   | 68 |
| Figure 4.4 : Un relai de 8 canaux .....  | 69 |
| Figure 4.5 : La page principale (page d'accueil) .....   | 75 |
| Figure 4.6 : La page d'accueil de surveillance .....   | 76 |

|  |    |
|--|----|
| Figure 4.7 : Capture d'écran 1 de la page de profile du client .....   | 77 |
| Figure 4.8 : Capture d'écran 2 de la page de profile du client .....   | 77 |
| Figure 4.9 : La page Logger .....  | 78 |
| Figure 4.10 : La page du commandes .....   | 78 |
| Figure 4.11 : La page de décision automatique .....  | 79 |
| Figure 4.12 : La page de statistiques .....  | 79 |
| Figure 4.13 : La page de gestion de l'énergie verte .....  | 80 |
| Figure 4.14 : Capture d'écran 1 de la page de profile de l'admin (Ajouter nouveau client) .....                      | 81 |
| Figure 4.15 : Capture d'écran 2 de la page de profile de l'admin (Ajouter des nouveaux<br>fermes) .....              | 81 |
| Figure 4.16 : Capture d'écran 3 de la page de profile de l'admin (Ajouter des nouveaux<br>serres) .....              | 82 |
| Figure 4.17 : Capture d'écran 4 de la page de profile de l'admin (Ajouter les outils de<br>connexion) .....          | 82 |
| Figure 4.18 : Capture d'écran 5 de la page de profile de l'admin (Ajouter des nouveaux<br>outils de contrôles) ..... | 83 |
| Figure 4.19 : Captures d'écran de l'application mobile .....   | 83 |
| Figure 4.20 : Images pour le déploiement réel de la solution .....   | 84 |

# *Listes des Tableaux*

|  |    |
|--|----|
| Tableau 2.1 : Infrastructure intelligente et besoins de recherche .....  | 30 |
| Tableau 2.2 : Comparaison des travaux connexes .....   | 37 |
| Tableau 3.1 : Les paramètres et les composants .....   | 55 |
| Tableau 3.2 : Les besoins climatiques de la plante de la tomate pendant chaque étape<br>d'évolution .....        | 56 |
| Tableau 3.3 : Les besoins d'eau de la plante de la tomate pendant chaque étape d'évolution ...                   | 56 |
| Tableau 3.4 : L'énergie consommé par les actionneurs .....   | 56 |
| Tableau 3.5 : Typologie des ambiances biothermiques selon l'indice de Thom<br>(Temperature Humidity Index) ..... | 57 |
| Tableau 3.6 : Nouvelle population .....  | 61 |



# *Introduction Générale*

De plus en plus d'objets sont connectés à Internet et les applications sont infinies, allant de la surveillance des machines au transfert de masses énormes d'informations.

Selon le cabinet de recherche américain Gartner, il y aura, fin 2017, 8,4 milliards d'objets connectés à Internet, un chiffre en hausse de 31 % en un an. Ils seront 20,4 milliards en 2020 selon Gartner, voire 80 milliards cette année-là selon le cabinet français Idate, rapporte Le Temps. Toutes sortes de machines comme par exemple des moteurs d'avion peuvent être surveillées en temps réel grâce à des capteurs, ce qui permet d'éviter des techniciens sur place en cas de panne et de les gérer à distance et en direct. Ericsson, qui à présenter le futur réseau 5G pour la téléphonie mobile, estime que ce sera « un formidable accélérateur pour l'Internet des objets, en permettant de faire transiter des masses énormes d'informations ». Les enjeux sont aussi sécuritaires : des voitures communicantes entre elles seraient beaucoup plus sûres, mais à condition aussi qu'elles soient protégées contre les cyberattaques. A terme, ces milliards de données pourraient rendre réel le rêve des smart cities ; les villes intelligentes et connectées où les citoyens auraient ainsi une vie beaucoup plus facile [1].

Les rendements agricoles ont fortement augmenté au cours du 20<sup>ème</sup> siècle grâce aux nouvelles méthodes et à l'application de la science. Cette révolution technologique a été marquée par des percées en nutrition, en génétique, en informatique, en imagerie satellitaire et en météorologie.

Les progrès de la science des plantes ont augmenté les rendements tout en même temps des stratégies d'irrigation modernes aident les agriculteurs à faire une utilisation plus efficace de l'eau et de l'énergie. Cependant, les rendements doivent encore augmenter, car l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) prévoit que la population mondiale atteindra 8 milliards d'ici 2025 et 9,6 milliards d'ici 2050. Pour suivre cette croissance, la production doit augmenter de 70 pour cent d'ici 2050. L'agriculture consomme 70 pour cent de l'approvisionnement en eau douce dans le monde; La gestion de l'eau va donc de pair avec la sécurité alimentaire [27].

La technologie jouera un rôle central dans la réalisation de ces impératifs. Il est déjà établi en agriculture avec l'arrivée d'outils mécanisés comme dans l'industrie laitière. En combinant l'expertise scientifique, la chimie du sol, la gestion des maladies avec des capteurs intelligents et la technologie de l'information, les agriculteurs peuvent augmenter le rendement des cultures et réduire les déchets [27].

Dans notre région de Biskra, les agriculteurs entretiennent physiquement chacune de leurs serres et ne peuvent connaître leur état sans les visiter un par un, et dans le cas d'un grand nombre de serres, l'agriculteur sera incapable de bien remplir son devoir et pourra ignorer certains les tâches importantes comme l'arrosage régulier ou l'aération de certaines plantes dans une serre éloignée, ces problèmes peuvent entraîner une baisse de la qualité des cultures. Il est également considéré dans les serres, l'éclairage artificiel, la production de CO<sub>2</sub> et les systèmes de contrôle du climat consomment beaucoup d'énergie; ainsi, un modèle mathématique de serres appropriées à leur fonctionnement optimal est proposé, de sorte qu'il peut être mis en œuvre en tant que contrôle de surveillance dans les systèmes de contrôle de serre existants.

Notre objectif est d'utiliser l'IoT et le Cloud Computing pour apporter une solution au problème de surveillance, et minimiser les coûts énergétiques totaux et les coûts de la demande tout en tenant compte des paramètres importants des serres; en particulier, la température intérieure et l'humidité et les niveaux d'éclairage doivent être maintenus dans des limites acceptables.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres. Dans le premier chapitre, nous parlerons des généralités et de la définition de l'Internet des objets (IoT). Le deuxième chapitre parle sur l'agriculture intelligente en introduire la technologie de l'information plus quelques-uns des travaux connexes que nous avons étudiés. Le troisième chapitre contient la conception de notre système et un certain nombre de diagrammes expliquant la fonctionnalité de notre système de surveillance des serres. Le quatrième chapitre consiste à présenter la liste des outils de développement et du langage de programmation utilisés pour développer notre projet, le tableau de bord de surveillance et la réalisation de notre solution sur une serre hydroponique réelle.

*Chapitre 01*

***Généralités sur  
l'internet des objets***

# Chapitre 01

## Généralités sur l'Internet des Objets

### 1.1. Introduction

On peut dater de 1988, l'origine de la conceptualisation de l'Internet industriel des Objets (Internet of Things – IoT en anglais) grâce au travail de Mark Weiser du PARC de Xerox (Palo Alto Research Center Incorporated) qui, le premier, a émis l'idée que les ordinateurs « trament le tissu de la vie quotidienne », influençant dès lors l'avenir du secteur (cf. Scientific American, 1991). La base des connaissances dont parle Weiser renvoie au débat de Herbert Simon dans son papier de 1987 intitulé « *The Steam Engine and the Computer: What makes technology revolutionary* » [16].

Ainsi, contrairement aux idées véhiculées, la vision de l'internet des objets (IoT) et de sa signification même n'est pas le fruit d'une quelconque présentation industrielle. En 2000, l'article fondateur « *The networked physical world* » a donné naissance au concept d'IoT [16].

Dans ce chapitre, nous allons donner quelques définitions sur l'internet des objets et voir les architectures IoT. Nous allons aussi lister les éléments de l'internet des objets, les domaines d'applications dans l'IoT et certains des protocoles d'application, des protocoles de découverte de service et des protocoles d'infrastructure utilisés dans IoT et enfin les défis de l'IoT.

### 1.2. Définition de l'IoT

Généralement il n'y a pas de définition fixée de l'Internet des Objets, nous en énumérerons quelques-unes parmi les plus intéressantes dans cette section:

**Définition 1 :**

L'Internet of Things (IoT) est « un réseau qui relie et combine les objets avec l'Internet, en suivant les protocoles qui assurent leurs communication et échange d'informations à travers une variété de dispositifs. » [2].

**Définition 2 :**

"L'Internet des Objets représente une évolution dans laquelle les objets sont capables d'interagir avec d'autres objets." (IBM)

**Définition 3 :**

"Internet of Things (IoT) est l'Internet et les réseaux qui s'étendent à des endroits tels que les usines de fabrication, les réseaux d'énergie, les établissements de santé et les transports" (Cisco Systems).

Il existe plusieurs définitions sur le concept de l'IoT, mais la définition la plus pertinente à notre travail de recherche est celle proposée par *Weill et Souissi* [3] qui ont défini l'IoT comme Une extension de l'Internet actuel envers tout objet pouvant communiquer de manière directe ou indirecte avec des équipements électroniques eux-mêmes connectés à l'Internet. Cette nouvelle dimension de l'Internet s'accompagne avec de forts enjeux technologiques, économiques et sociaux, notamment avec les économies majeures qui pourraient être réalisées par l'ajout de technologies qui favorisent la standardisation de ce nouveau domaine, surtout en matière de communication, tout en assurant la protection des droits et des libertés individuelles.

### 1.3. Fonctionnement de l'IoT

L'Internet of Things (IoT) permet l'interconnexion des différents objets intelligents via l'Internet. Ainsi, pour son fonctionnement, plusieurs systèmes technologiques sont nécessaires. Citons quelques exemples de ces technologies.

L'IoT désigne diverses solutions techniques (RFID, TCP/IP, technologies mobiles, etc.) qui permettent d'identifier des objets, de capter, stocker, traiter, et transférer des données dans les environnements physiques, mais aussi entre des contextes physiques et des univers virtuels.

En effet, bien qu'il existe plusieurs technologies utilisées dans le fonctionnement de l'IoT, nous mettons l'accent seulement sur quelques-unes qui sont, selon Han et Zhanghang, les technologies clés de l'IoT. Ces technologies sont les suivantes : RFID, WSN et M2M, et sont définies ci-dessous [4].

- **RFID (Radio Frequency Identification) :** le terme RFID englobe toutes les technologies qui utilisent les ondes radio pour identifier automatiquement des objets ou des personnes. C'est une technologie qui permet de mémoriser et de récupérer des informations à distance grâce à une étiquette qui émet des ondes radio [5]. Il s'agit d'une méthode utilisée pour transférer les données des étiquettes à des objets, ou pour identifier les objets à

distance. L'étiquette contient des informations stockées électroniquement pouvant être lues à distance [2].

- **WSN (Wireless Sensor Network)** : c'est un ensemble de nœuds qui communiquent sans fil et qui sont organisés en un réseau coopératif. Chaque nœud possède une capacité de traitement et peut contenir différents types de mémoires, un émetteur-récepteur RF et une source d'alimentation, comme il peut aussi tenir compte des divers capteurs et des actionneurs [6]. Comme son nom l'indique, le WSN constitue alors un réseau de capteurs sans fil qui peut être une technologie nécessaire au fonctionnement de l'IoT.
- **M2M (Machine to Machine)** : c'est « l'association des technologies de l'information et de la communication avec des objets intelligents dans le but de donner à ces derniers les moyens d'interagir sans intervention humaine avec le système d'information d'une organisation ou d'une entreprise » [7].

#### 1.4. Architectures de l'IoT

À partir du pool de modèles proposés dans [13], le modèle de base est une architecture à trois couches comprenant les couches Application, Réseau et Perception. Dans la littérature récente, d'autres modèles ont été proposés qui ajoutent plus d'abstraction à l'architecture IoT. Certaines architectures communes parmi eux est le modèle à 5 couches [12]. L'architecture de l'IoT à 5 couches peut être divisée en cinq couches telles que: couche d'objets ou couche de perception, couche abstraite d'objet ou couche réseau, couche de gestion de service ou couche de middleware, couche d'application et couche de gestion (figure 1.1) [11].

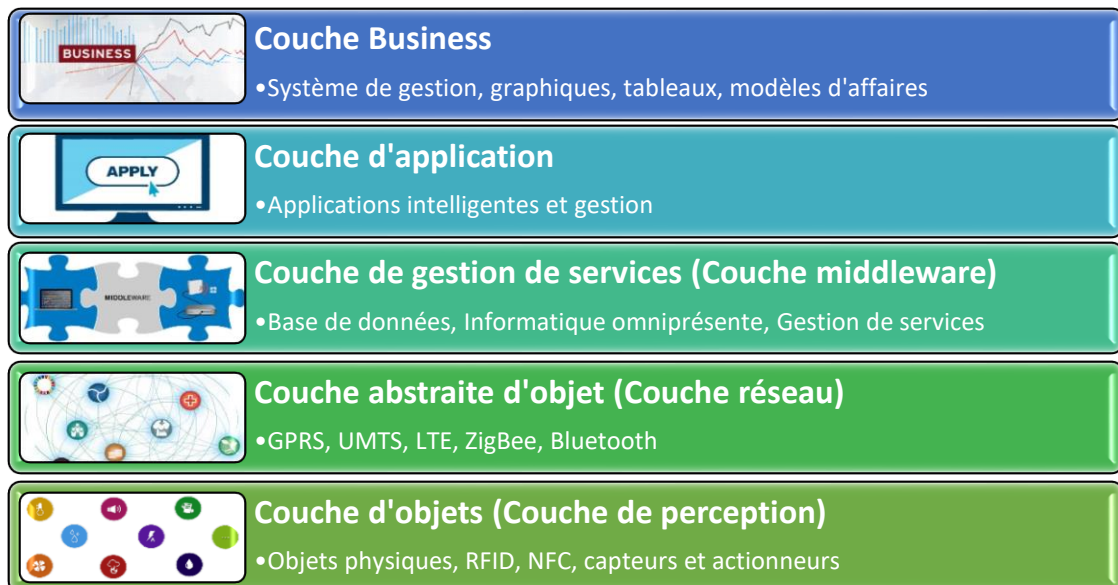


Figure 1.1 : Couches d'architecture IoT adaptées de [12]

### 1.4.1. Couche d'objets

La première couche, les Objets (périphériques) ou la couche de perception, représente les capteurs physiques de l'IoT qui visent à collecter et traiter l'information. Cette couche comprend des capteurs et des actionneurs pour effectuer différentes fonctionnalités telles que l'emplacement, la température, le poids, le mouvement, les vibrations, l'accélération, l'humidité, ... etc. Les mécanismes standard de Plug-And-Play doivent être utilisés par la couche de perception pour configurer des objets hétérogènes. La couche de perception numérise et transfère des données à la couche Abstraction d'objet via des canaux sécurisés. Les grandes données créées par IoT sont lancées sur cette couche [12].

### 1.4.2. Couche abstraite d'objet (Couche Réseau)

L'abstraction d'objet transfère les données produites par la couche Objets à la couche Gestion des services via des canaux sécurisés. Les données peuvent être transférées via diverses technologies telles que 3G, GSM, UMTS, WiFi, Bluetooth Low Energy, infrarouge, ZigBee, etc. En outre, d'autres fonctions telles que le Cloud Computing et les processus de gestion de données sont traitées dans cette couche [12].

### 1.4.3. Couche de gestion de service (Couche Middleware)

La couche de gestion des services ou middleware associe un service avec son demandeur en fonction des adresses et des noms. Cette couche permet aux programmeurs d'applications IoT de travailler avec des objets hétérogènes sans tenir compte d'une plate-forme matérielle spécifique. De plus, cette couche traite les données reçues, prend des décisions et délivre les services requis sur les protocoles de réseau [12].

### 1.4.4. Couche d'application

La couche d'application fournit les services demandés par les clients. Par exemple, la couche d'application peut fournir des mesures de température et d'humidité de l'air au client qui demande ces données. L'importance de cette couche pour l'IoT est qu'elle a la capacité de fournir des services intelligents de haute qualité pour répondre aux besoins des clients. La couche d'application couvre de nombreux marchés verticaux tels que la maison intelligente, la construction intelligente, le transport, l'automatisation industrielle et les soins de santé intelligents [12].

### 1.4.5. Couche Business

Cette couche gère les activités et les services du système IoT. Les responsabilités de cette couche sont de construire un modèle d'entreprise, des graphiques, des organigrammes, etc. en fonction des données reçues du calque Application. Il est également censé concevoir, analyser, mettre en œuvre, évaluer, surveiller et développer des éléments liés au système IoT. Cette couche permet de prendre en charge les processus de prise de décision basés sur une grande analyse des données. En outre, la surveillance et la gestion des quatre couches sous-jacentes sont obtenues à ce niveau. De plus, cette couche compare la sortie de chaque couche avec la sortie attendue pour améliorer les services et maintenir la confidentialité des utilisateurs [12].

### 1.5. Les éléments de l'IoT

La compréhension des blocs de construction IoT permet d'avoir une meilleure idée de la véritable signification et de la fonctionnalité de l'IoT. Dans les sections suivantes, nous discutons de six éléments principaux nécessaires pour fournir la fonctionnalité de l'IoT comme illustré dans la figure 1.2.

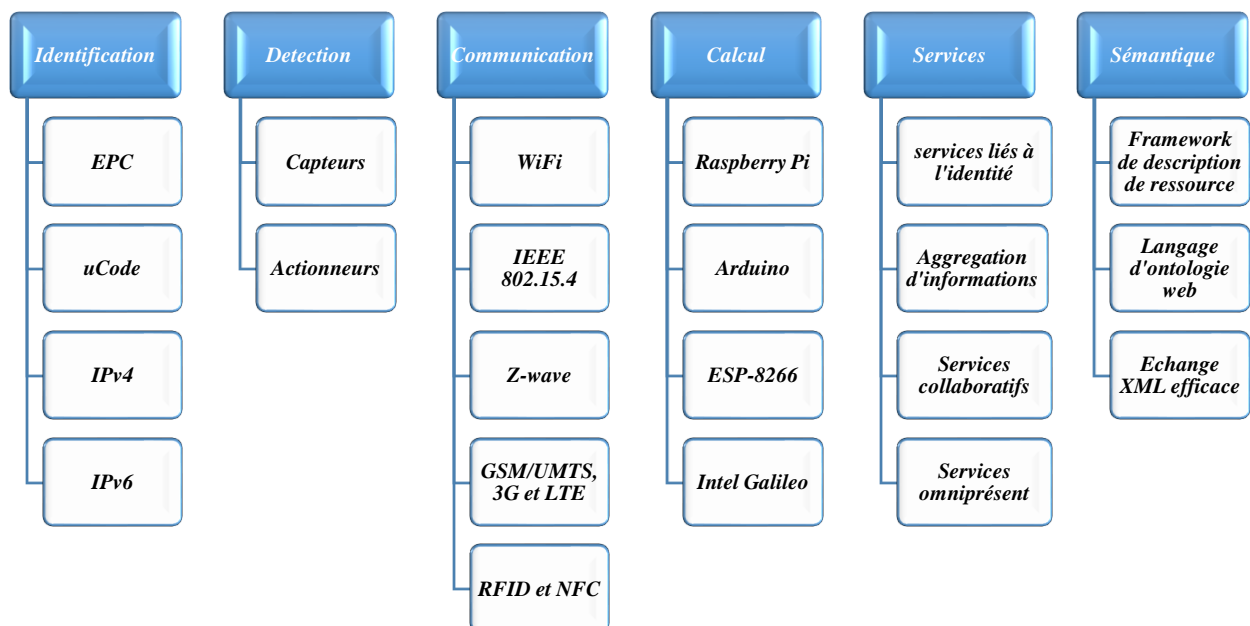


Figure 1.2 : Les éléments de l'IoT [11]

#### 1.5.1. Identification

L'identification est cruciale pour que l'IoT nomme et assortisse les services à leur demande. De nombreuses méthodes d'identification sont disponibles pour l'IoT, telles que les codes de produits électroniques (EPC) et les codes omniprésents (uCode). En outre, l'adressage des objets IoT est essentiel pour différencier l'ID d'objet de son adresse. L'ID d'objet fait



référence à son nom tel que "T1" pour un capteur de température particulier et l'adresse de l'objet se réfère à son adresse dans un réseau de communication. En outre, les méthodes d'adressage des objets IoT incluent IPv6 et IPv4. 6LoWPAN fournit un mécanisme de compression sur les en-têtes IPv6 qui rend l'adressage IPv6 approprié pour les réseaux sans fil de faible puissance. La distinction entre identification et adresse de l'objet est impérative puisque les méthodes d'identification ne sont pas globalement uniques, donc l'adressage aide à identifier les objets de façon unique. En outre, les objets du réseau peuvent utiliser des adresses IP publiques et non privées. Les méthodes d'identification sont utilisées pour fournir une identité claire pour chaque objet dans le réseau [12].

### 1.5.2. Detection

La détection de l'IoT consiste à collecter des données à partir d'objets associés au sein du réseau et à les renvoyer vers un entrepôt de données, une base de données ou un nuage. Les données collectées sont analysées pour prendre des mesures spécifiques basées sur les services requis. Les capteurs IoT peuvent être des capteurs intelligents, des actionneurs ou des dispositifs de détection portables. Par exemple, des entreprises comme Wemo, revolv et SmartThings proposent des hubs intelligents et des applications mobiles qui permettent aux utilisateurs de surveiller et de contrôler des milliers d'appareils et d'appareils intelligents à l'intérieur des bâtiments à l'aide de leurs smartphones.

Des ordinateurs à carte unique (SBC) intégrés avec des capteurs et des fonctionnalités TCP / IP et de sécurité intégrées sont typiquement utilisés pour réaliser des produits IoT (par exemple, Arduino Yun, Raspberry PI, BeagleBone Black, etc.). Ces périphériques se connectent généralement à un portail de gestion central pour fournir les données requises par les clients [12].

### 1.5.3. Communication

Les technologies de communication IoT connectent des objets hétérogènes ensemble pour fournir des services intelligents spécifiques. Typiquement, les nœuds IoT doivent fonctionner en utilisant une faible puissance en présence de liaisons de communication avec perte et bruit. Des exemples de protocoles de communication utilisés pour l'IoT sont WiFi, Bluetooth, IEEE 802.15.4, Z-Wave et LTE-Advanced. Certaines technologies de communication spécifiques sont également utilisées comme la RFID, la communication en champ proche (NFC) et la bande passante ultra-large (UWB). La RFID est la première technologie utilisée pour réaliser le

concept M2M (tag RFID et lecteur). L'étiquette RFID représente une simple puce ou une étiquette attachée pour fournir l'identité de l'objet. Le lecteur RFID transmet un signal de requête à l'étiquette et reçoit le signal réfléchi de l'étiquette, qui à son tour est transmis à la base de données. La base de données se connecte à un centre de traitement pour identifier les objets sur la base des signaux réfléchis dans une plage (de 10 cm à 200 m). Les étiquettes RFID peuvent être actives, passives ou semi-passives / actives. Les tags actifs sont alimentés par batterie tandis que les tags passifs n'ont pas besoin de batterie. Les étiquettes semi-passives / actives utilisent la puissance de la carte lorsque cela est nécessaire.

Le protocole NFC fonctionne à une bande de fréquence élevée à 13,56 MHz et prend en charge un débit de données pouvant atteindre 424 kbps. La portée applicable est jusqu'à 10 cm, où la communication entre les lecteurs actifs et les étiquettes passives ou deux lecteurs actifs peuvent se produire. La technologie de communication UWB est conçue pour prendre en charge les communications dans une zone de couverture à faible portée en utilisant une faible énergie et une bande passante élevée dont les applications pour connecter des capteurs ont été récemment augmentées [12].

Une autre technologie de communication est le WiFi qui utilise les ondes radio pour échanger des données entre des objets dans un rayon de 100 m. Le WiFi permet aux appareils intelligents de communiquer et d'échanger des informations sans utiliser de routeur dans certaines configurations ad hoc. Bluetooth présente une technologie de communication utilisée pour échanger des données entre des appareils sur de courtes distances à l'aide d'une radio à ondes courtes afin de réduire la consommation d'énergie. Récemment, le groupe d'intérêt spécial Bluetooth (SIG) a produit Bluetooth 4.1 qui fournit Bluetooth Low Energy ainsi que la connectivité haute vitesse et IP pour soutenir l'IoT. La norme IEEE 802.15.4 spécifie à la fois une couche physique et un contrôle d'accès au support pour les réseaux sans fil de faible puissance qui ciblent des communications fiables et évolutives.

LTE (Long-Term Evolution) est à l'origine une communication sans fil standard pour le transfert de données à haut débit entre les téléphones mobiles basés sur les technologies de réseau GSM / UMTS. Il peut couvrir les appareils à déplacement rapide et fournir des services de multidiffusion et de diffusion. LTE-A (LTE Advanced) est une version améliorée de LTE incluant une extension de bande passante qui prend en charge jusqu'à 100 MHz, le multiplexage spatial de liaison descendante et montante, une couverture étendue, un débit plus élevé et des latences plus faibles [12].

#### 1.5.4. Calcul

Les unités de traitement (par exemple, microcontrôleurs, microprocesseurs, SOC, FPGA) et les applications logicielles représentent le "cerveau" et la capacité de calcul de l'IoT. Différentes plates-formes matérielles ont été développées pour exécuter des applications IoT telles que Arduino, UDOO, Symantino, Intel Galileo, Raspberry PI, Gadgeteer, BeagleBone, Cubieboard, Z1, WiSense, Mulle et T-Mote Sky.

En outre, de nombreuses plates-formes logicielles sont utilisées pour fournir des fonctionnalités IoT. Parmi ces plates-formes, les systèmes d'exploitation sont essentiels puisqu'ils fonctionnent pendant toute la durée d'activation d'un appareil. Il existe plusieurs systèmes d'exploitation en temps réel (RTOS) qui sont de bons candidats pour le développement d'applications IoT basées sur RTOS. Par exemple, le RTOS Contiki a été largement utilisé dans les scénarios IoT. Contiki a un simulateur appelé Cooja qui permet au chercheur et aux développeurs de simuler et d'émuler des applications IoT et réseau de capteurs sans fil (WSN). TinyOS, LiteOS et Riot OS offrent également un système d'exploitation léger conçu pour les environnements IoT.

Les Cloud Platforms constituent une autre partie importante du calcul de l'IoT. Ces plates-formes permettent aux objets intelligents d'envoyer leurs données vers le cloud, de traiter en temps réel les grandes quantités de données et, éventuellement, de bénéficier des connaissances extraites des données volumineuses collectées. Il existe un grand nombre de plates-formes et de frameworks cloud gratuits et commerciaux disponibles pour héberger des services IoT [12].

- **Cloud Computing**

Cette technologie permet de louer l'infrastructure, les environnements d'exécution et les services en fonction du paiement à l'utilisation. Il peut offrir différents types de solutions en fonction des besoins des utilisateurs, tels que la mise à l'échelle d'une infrastructure d'entreprise à la demande et sa taille en fonction des besoins de l'entreprise. Dans le cas des utilisateurs finaux, avoir leurs données disponibles n'importe quand n'importe où à partir de n'importe quel appareil qui a une connexion à Internet.

Le Cloud Computing est un environnement extrêmement flexible pour construire de nouveaux systèmes et applications et même intégrer des capacités supplémentaires ou de nouvelles fonctionnalités dans les systèmes existants, ce qui le rend extrêmement adapté à une technologie telle que l'Internet des objets [14].

### 1.5.5. Services

Les différents services IoT peuvent être classés en tant que services liés à l'identité, services d'agrégation d'informations, services collaboratifs et services omniprésents. Les services liés à l'identité sont axés sur l'identification des objets, tandis que les services d'agrégation regroupent et résument les données sensorielles et les envoient à l'application principale. De plus, les services collaboratifs sont utilisés pour décider des données obtenues afin de réagir en conséquence, tandis que les services omniprésents ont pour but de fournir des services collaboratifs à tout moment et en tout lieu [11].

### 1.5.6. Sémantique

La sémantique dans l'IoT fait référence à la capacité d'extraire intelligemment des connaissances par différentes machines pour fournir les services requis. L'extraction de connaissances comprend la découverte et l'utilisation de ressources et la modélisation d'informations. En outre, il comprend la reconnaissance et l'analyse des données pour donner un sens à la bonne décision de fournir le service exact. Ainsi, la sémantique représente le cerveau de l'IoT en envoyant des demandes à la bonne ressource. Cette exigence est prise en charge par les technologies Web sémantiques telles que le Resource Description Framework (RDF) et le Web Ontology Language (OWL). En 2011, le consortium World Wide Web (W3C) a adopté le format Efficient XML Interchange (EXI) comme recommandation [14].

EXI est important dans le contexte de l'IoT car il est conçu pour optimiser les applications XML pour les environnements à contraintes de ressources. En outre, il réduit les besoins en bande passante sans affecter les ressources associées telles que l'autonomie de la batterie, la taille du code, l'énergie consommée pour le traitement et la taille de la mémoire. EXI convertit les messages XML en binaire pour réduire la bande passante nécessaire et minimiser la taille de stockage requise [14].

## 1.6. Protocoles de l'IoT

Il existe plusieurs protocoles IoT qui sont largement utilisés dans l'IoT avec des fonctionnalités différentes. Nous voulons décrire les protocoles IoT les plus importants, qui permettent d'échanger des données entre différents appareils IoT et entre les appareils IoT et les plates-formes cloud IoT.

Les protocoles IoT peuvent être regroupés en trois catégories différentes:

- Protocoles d'application
- Protocoles de découverte de services
- Protocoles d'infrastructure

### 1.6.1. Protocoles d'application

Ci-dessous, vous trouverez une liste des protocoles IoT les plus « importants » utilisés dans l'écosystème IoT:

#### 1.6.1.1. MQTT

MQTT signifie Message Queuing Telemetry Transport. MQTT est un protocole léger de publication / abonnement. MQTT est un protocole orienté M2M (Machine to Machine). Maintenant c'est un standard ouvert maintenu par le groupe OASIS. L'architecture de référence est très simple et basée sur le client / serveur. Le client est généralement un capteur qui "publie" l'information au serveur (Broker) qui reçoit l'information et l'envoie aux abonnés comme dans la figure 1.3. La communication sous-jacente est basée sur TCP [15].

De manière générale, le protocole MQTT utilise un paradigme plusieurs-à-plusieurs et le broker découple l'émetteur pour l'abonné et agit comme un routeur de messages. Ce protocole implémente QoS, communication sécurisée, persistance et ainsi de suite. Il existe une autre version de ce protocole MQTT IoT appelée MQTT-SN (ou MQTT-S) qui désigne le réseau de capteurs. Eclipse a publié une implémentation Open Source de MQTT appelée Mosquitto. Peut-être que MQTT est le protocole IoT le plus connu parmi les autres protocoles IoT [15].

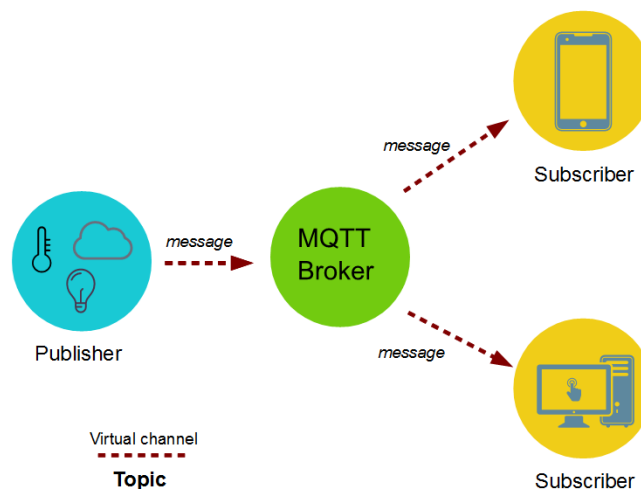


Figure 1.3 : Fonctionnement du protocole MQTT [15]

### 1.6.1.2. CoAP

COAP signifie Constrained Application Protocol. Ce protocole a été conçu par l'IETF. C'est un protocole M2M, défini par RFC7252, et c'est un protocole de transfert web. Ce protocole est très similaire à HTTP et utilise le paradigme de transfert de document. De plus, il utilise un modèle de demande / réponse et prend en charge la découverte de services intégrée. Respect du protocole HTTP, COAP est léger avec des paquets plus petits.

COAP utilise UDP comme protocole réseau sous-jacent. COAP est fondamentalement un protocole IoT client-serveur où le client fait une demande et le serveur renvoie une réponse comme cela arrive dans http comme illustré dans la figure 1.4. Les méthodes utilisées par COAP sont les mêmes que celles utilisées par HTTP [15].

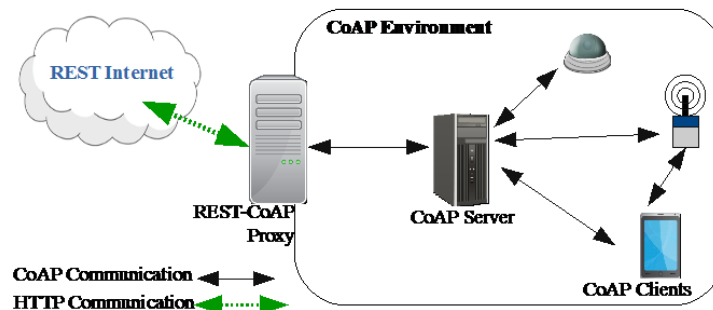


Figure 1.4 : Fonctionnalité CoAP [12]

### 1.6.1.3. AMQP

AMQP signifie Advanced Message Queue Protocol. Il est maintenu par OASIS en tant que MQTT. AMQP est un standard ouvert pour l'échange de messages entre applications (M2M). En d'autres termes, il s'agit d'un protocole orienté message qui fournit des fonctionnalités telles que le routage et la mise en file d'attente [15].

En définissant un protocole de niveau de fil, les implémentations AMQP sont capables d'interagir les uns avec les autres. Les communications sont gérées par deux composants principaux, comme représenté sur la figure 1.5: les échanges et les files d'attente de messages. Les échanges sont utilisés pour acheminer les messages vers les files d'attente appropriées. Le routage entre les échanges et les files d'attente de messages est basé sur certaines règles et conditions prédéfinies. Les messages peuvent être stockés dans des files d'attente de messages, puis envoyés aux destinataires. Au-delà de ce type de communication point à point, AMQP prend également en charge le modèle de communication publication / abonnement [12].

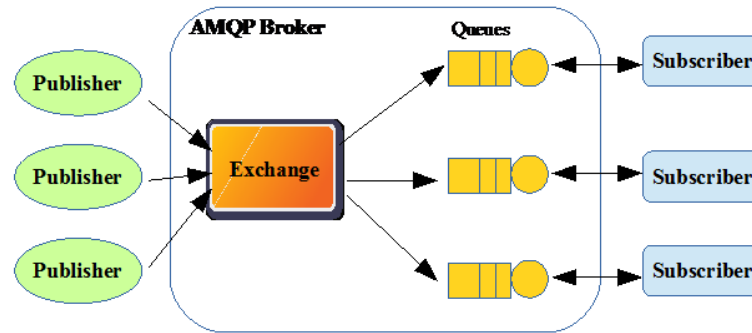


Figure 1.5 : Mécanisme de publication / abonnement d'AMQP [12]

#### 1.6.1.4. XMPP

XMPP (Extensible Messaging et Presence Protocol) est un standard ouvert pour la présence et la messagerie. Ce protocole utilise des messages XML. Le XMPP-IoT est conçu spécifiquement pour l'environnement IoT. Fondamentalement, ce protocole permet aux utilisateurs d'envoyer des messages en temps réel et gère la présence de l'utilisateur (en ligne, hors ligne, occupé). La version IoT permet aux utilisateurs d'envoyer et de recevoir des messages à partir de machines. De plus, c'est extensible facilement [15].

De nombreuses fonctionnalités XMPP en font un protocole privilégié par la plupart des applications de messagerie instantanée et pertinentes dans le cadre de l'IoT. Il fonctionne sur une variété de plates-formes Internet de manière décentralisée. XMPP est sécurisé et permet l'ajout de nouvelles applications en plus des protocoles de base. XMPP connecte un client à un serveur en utilisant un flux de strophes XML. Une strophe XML représente un morceau de code divisé en trois composants: message, présence et iq (info / requête) (voir la figure 1.7 [12]). Les strophes de message identifient les adresses, les types et les ID source (de) et de destination (à) des entités XMPP qui utilisent une méthode push pour extraire des données. Une strophe de message remplit les champs du sujet et du corps avec le titre et le contenu du message. La strophe de présence affiche et informe les clients des mises à jour de statut autorisées. La strophe iq associe les expéditeurs et les destinataires de messages [12].

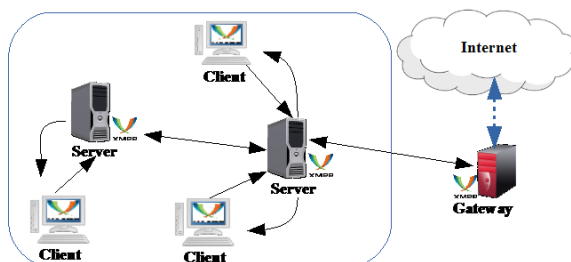


Figure 1.6 : Communication en XMPP

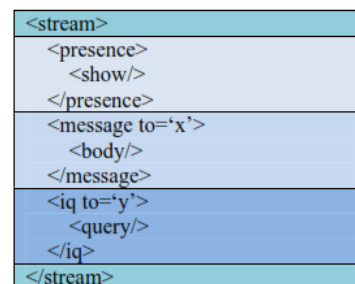


Figure 1.7 : Structure d'une strophe XMPP

Les évaluations par paires et les comparaisons de ces protocoles ont été rapportées dans la littérature. Par exemple, compare les performances de MQTT et CoAP en termes de délai de transmission de bout en bout et d'utilisation de la bande passante. Sur la base de leurs résultats, MQTT délivre des messages avec un retard inférieur à CoAP lorsque le taux de perte de paquet est faible. En revanche, lorsque le taux de perte de paquet est élevé, CoAP surpasse MQTT. Dans le cas de messages de petite taille et d'un taux de perte inférieur à 25%, CoAP surpasse MQTT pour générer moins de trafic supplémentaire. Une autre étude de recherche a comparé ces deux protocoles dans un environnement d'application de smartphone et a montré que l'utilisation de la bande passante de CoAP et le temps aller-retour sont inférieurs à ceux de MQTT [12].

### 1.6.2. Protocoles de découverte de service

L'évolutivité élevée de l'IoT nécessite un mécanisme de gestion des ressources capable d'enregistrer et de découvrir des ressources et des services de manière auto-configurée, efficace et dynamique. Les protocoles les plus répandus dans ce domaine sont le DNS multidiffusion (mDNS) et le DNS Service Discovery (DNSSD) qui permettent de découvrir les ressources et les services offerts par les périphériques IoT. Bien que ces deux protocoles aient été conçus à l'origine pour des dispositifs riches en ressources, il existe des études de recherche qui adaptent leurs versions légères aux environnements IoT [12].

#### 1.6.2.1. mDNS

mDNS signifie Multicast DNS. Un service de base pour certaines applications IoT telles que le chat est la résolution de noms. mDNS est un tel service qui peut effectuer la tâche de serveur DNS monodiffusion. mDNS est flexible en raison du fait que l'espace de noms DNS est utilisé localement sans frais supplémentaires ou configuration. mDNS est un choix approprié pour les périphériques Internet embarqués en raison des faits suivants:

- Il n'y a pas besoin de reconfiguration manuelle ou d'administration supplémentaire pour gérer les périphériques.
- Il est capable de fonctionner sans infrastructure.
- Il est capable de continuer à fonctionner si la défaillance de l'infrastructure se produit.



mDNS interroge les noms en envoyant un message multidiffusion IP à tous les nœuds du domaine local, comme indiqué sur la figure 1.8. Par cette requête, le client demande aux périphériques qui ont le nom donné de répondre. Lorsque la machine cible reçoit son nom, elle diffuse un message de réponse qui contient son adresse IP. Tous les périphériques du réseau qui obtiennent le message de réponse mettent à jour leur cache local en utilisant le nom donné et l'adresse IP [12].

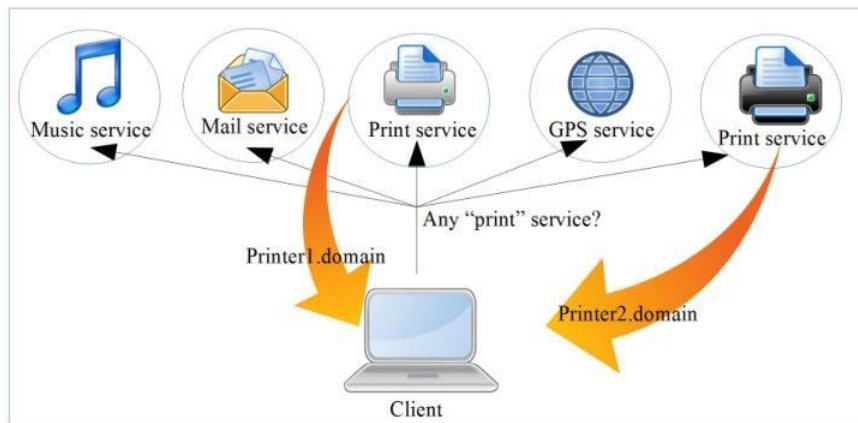


Figure 1.8 : Requête/Réponse dans le protocole mDNS

### 1.6.2.2. DNS-SD

DNS-SD signifie DNS Service Discovery. La fonction d'appariement des services requis par les clients utilisant mDNS est appelée découverte de service DNS (DNS-SD). Grâce à ce protocole, les clients peuvent découvrir un ensemble de services souhaités dans un réseau spécifique en utilisant des messages DNS standard. La figure 1.9 fournit une illustration visuelle du fonctionnement de ce protocole. DNS-SD, comme mDNS, fait partie de la configuration zéro aide à connecter les machines sans administration ou configuration externe [12].

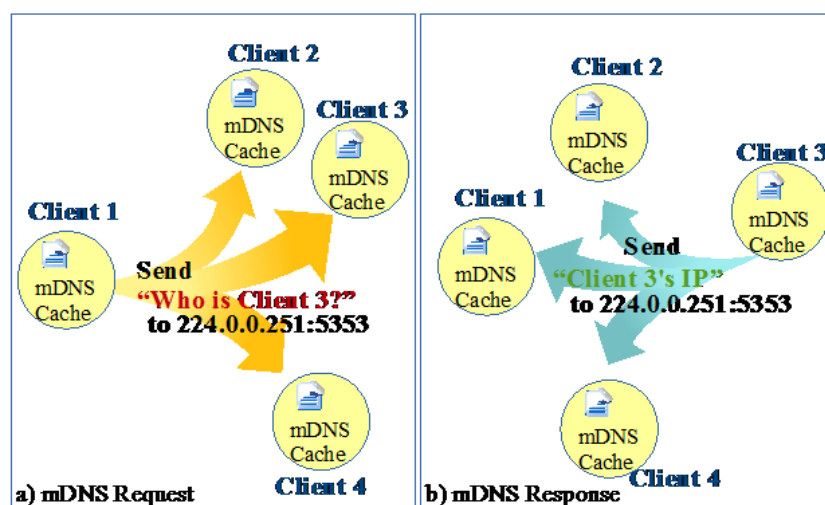


Figure 1.9 : Découvrir le service d'impression par DNS-SD

Essentiellement, DNS-SD utilise mDNS pour envoyer des paquets DNS à des adresses de multidiffusion spécifiques via UDP. Il existe deux étapes principales pour traiter Service Discovery: trouver les noms d'hôte des services requis tels que les imprimantes et associer les adresses IP avec leurs noms d'hôte en utilisant mDNS. La recherche de noms d'hôtes est importante car les adresses IP peuvent changer, contrairement aux noms. La fonction d'appariement diffuse les détails des pièces jointes réseau comme l'adresse IP et le numéro de port de chaque hôte associé. En utilisant DNS-SD, les noms d'instance dans le réseau peuvent être gardés constants le plus longtemps possible pour augmenter la confiance et la fiabilité. Par exemple, si certains clients connaissent et utilisent une imprimante spécifique aujourd'hui, ils pourront l'utiliser par la suite sans problèmes [12].

### 1.6.3. Protocoles d'infrastructure

Alors que les protocoles de données IoT permettent aux dispositifs IoT d'échanger des informations, les protocoles réseau IoT fonctionnent à un niveau inférieur en connectant les périphériques IoT entre eux et avec les plates-formes cloud IoT. Il existe plusieurs protocoles réseau IoT qui fonctionnent dans un intervalle court ou large.

#### 1.6.3.1. Bluetooth

C'est l'un des protocoles les plus largement utilisés dans la communication à courte distance WPAN (Wireless Personal Area Network). C'est une norme pour la transmission de données sans fil. Il joue un rôle important dans la connexion des appareils portables [15].

BLE (Bluetooth Low Energy) permet aux périphériques de fonctionner en tant que maîtres ou esclaves dans une topologie en étoile. Pour le mécanisme de découverte, les esclaves envoient des publicités sur un ou plusieurs canaux de publicité dédiés. Pour être découvert en tant qu'esclave, ces canaux sont scannés par le maître. À l'exception du moment où deux appareils échangent des données, ils sont en mode veille pendant le reste du temps [12]. Le BLE est une version basse consommation du protocole Bluetooth qui réduit la consommation d'énergie et joue un rôle important dans la connexion des périphériques IoT [15].

#### 1.6.3.2. 6LowPAN

Les réseaux personnels sans fil de faible puissance sur lesquels s'appuient de nombreuses communications IoT présentent des caractéristiques spéciales différentes des anciennes technologies de couche liaison telles que la taille limitée des paquets (127 octets maximum pour IEEE 802.15.4), diverses longueurs d'adresses et une faible bande passante. Il

était donc nécessaire de créer une couche d'adaptation adaptée aux paquets IPv6 selon les spécifications IEEE 802.15.4. Le groupe de travail IETF 6LoWPAN a développé une telle norme en 2007. 6LoWPAN est la spécification des services de cartographie requis par les WPAN IPv6 à faible puissance pour maintenir un réseau IPv6. La norme fournit une compression d'en-tête pour réduire le sur débit de transmission, la fragmentation pour répondre aux exigences de l'unité de transmission maximale IPv6 (MTU) et la transmission à la couche liaison pour prendre en charge la livraison multi-sauts [12].

Les datagrammes enveloppés par 6LoWPAN sont suivies d'une combinaison d'en-têtes. Ces en-têtes sont de quatre types qui sont identifiés par deux bits : (00) NO 6LoWPAN Header, (01) Dispatch Header, (10) Mesh Addressing, et (11) Fragmentation. Par l'en-tête NO 6LoWPAN, les paquets qui ne correspondent pas à la spécification 6LoWPAN seront rejetés. La compression des en-têtes IPv6 ou la multidiffusion est effectuée en spécifiant l'en-tête Dispatch. L'en-tête Mesh Addressing identifie les paquets IEEE 802.15.4 qui doivent être transmis à la couche de liaison. Pour les datagrammes dont les longueurs dépassent une seule trame IEEE 802.15.4, l'en-tête Fragmentation doit être utilisé [12].

### 1.6.3.3. ZigBee (IEEE 802.15.4)

Zigbee est un autre protocole sans fil basé sur la norme IEEE 802.15.4 pour les réseaux à dimension personnelle (Wireless Personal Area Networks: WPAN). Zigbee travaille dans la zone RF, et il est couramment utilisé dans la domotique et dans le domaine de l'énergie intelligente. Il est conçu pour réduire la consommation d'énergie et pour le transfert de données à faible débit [15].

Le protocole IEEE 802.15.4 a été créé pour spécifier une sous-couche pour le contrôle d'accès au support (MAC) et une couche physique (PHY) pour les réseaux privés sans fil à faible débit (LRWPAN). En raison de ses spécifications telles que la faible consommation d'énergie, le faible débit de données, le faible coût et le haut débit de messages, il est également utilisé par l'IoT, le M2M et les WSN. Il fournit une communication fiable, une opérabilité sur différentes plates-formes, et peut gérer un grand nombre de nœuds (environ 65k). Il fournit également un haut niveau de sécurité, de cryptage et d'authentification. Cependant, il ne fournit pas de garanties de QoS. Ce protocole est la base du protocole ZigBee car ils se concentrent tous les deux sur l'offre de services à faible débit de données sur les périphériques à contrainte d'alimentation et ils construisent une pile de protocole réseau complète pour les WSN [12].

La norme IEEE 802.15.4 prend en charge trois bandes de canaux de fréquence et utilise une méthode DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum). Sur la base des canaux de fréquence utilisés, la couche physique transmet et reçoit des données sur trois débits de données: 250 kbps à 2,4 GHz, 40 kbps à 915 MHz et 20 kbps à 868 MHz. Les fréquences plus élevées et les bandes plus larges offrent un débit élevé et une faible latence, tandis que les fréquences plus basses offrent une meilleure sensibilité et couvrent de plus grandes distances. Pour réduire les collisions potentielles, MAC IEEE 802.15.4 utilise le protocole CSMA / CA [12].

#### **1.6.3.4. LTE-A (*Long Term Evolution – Advanced*)**

Le LTE-A englobe un ensemble de protocoles de communication cellulaire qui s'intègrent bien aux infrastructures de communication de type machine (MTC) et IoT, en particulier pour les villes intelligentes où une durabilité à long terme de l'infrastructure est attendue. De plus, il surpasse les autres solutions cellulaires en termes de coût de service et d'évolutivité.

Au niveau de la couche physique, le LTE-A utilise un accès multiple par répartition en fréquence orthogonale (OFDMA) par lequel la bande passante du canal est partitionnée en bandes plus petites appelées blocs de ressources physiques (PRB). Le LTE-A utilise également une technique d'étalement du spectre à coefficient de multiplicité (CC) qui permet d'avoir jusqu'à cinq bandes de 20 MHz. L'architecture du réseau LTE-A repose sur deux parties essentielles. Le premier est le Core Network (CN) qui contrôle les appareils mobiles et traite les flux de paquets IP. L'autre partie est le réseau d'accès radio (RAN) qui gère la communication sans fil et l'accès radio et établit des protocoles de plan utilisateur et de plan de contrôle. RAN se compose principalement de stations de base (également appelées NodeBs évoluées) qui sont connectées entre elles par l'interface X2. Le RAN et le CN sont connectés via l'interface S1. Les appareils mobiles ou MTC peuvent se connecter directement aux stations de base ou via la passerelle MTC (MTCG). Ils peuvent également avoir une communication directe avec d'autres appareils MTC [12].

#### **1.6.3.5. Z-Wave**

Z-Wave en tant que protocole de communication sans fil de faible puissance pour les réseaux domotiques (HAN) a été largement utilisé dans les applications de contrôle à distance dans les maisons intelligentes ainsi que les domaines commerciaux de petite taille. Ce protocole a été initialement développé par ZenSys (actuellement Sigma Designs) et a ensuite été utilisé

et amélioré par Z-Wave Alliance. ZWave couvre environ 30 mètres de communication point à point et est spécifié pour les applications nécessitant une minuscule transmission de données comme le contrôle de l'éclairage, le contrôle des appareils électroménagers, l'énergie intelligente et le HVAC, le contrôle d'accès. Z-Wave fonctionne dans les bandes ISM (environ 900 MHz) et permet un taux de transmission de 40 kbps. Les versions récentes prennent également en charge jusqu'à 200 kbps. Sa couche MAC bénéficie d'un mécanisme d'évitement de collision. Une transmission fiable est possible dans ce protocole par des messages ACK optionnels. Dans son architecture, il y a des nœuds de contrôleur et d'esclave. Les contrôleurs gèrent les esclaves en leur envoyant des commandes. À des fins de routage, un contrôleur conserve une table de la topologie du réseau entier. Le routage dans ce protocole est effectué par une méthode de routage source dans laquelle un automate soumet le chemin à l'intérieur d'un paquet [12].

### 1.7. Domaines d'application de l'IoT

Nous constatons que le concept de l'Internet of Things (IoT) est en pleine explosion vu que nous avons de plus en plus besoin dans la vie quotidienne d'objets intelligents capables de rendre nos objectifs plus facile d'atteindre. Ainsi, les domaines d'applications de l'IoT peuvent être variés.

Comme illustré dans la figure 1.10 plusieurs domaines d'application sont touchés par l'IoT. On trouve alors l'IoT dans notre vie personnelle quotidienne et également dans les services publics offerts par le gouvernement.

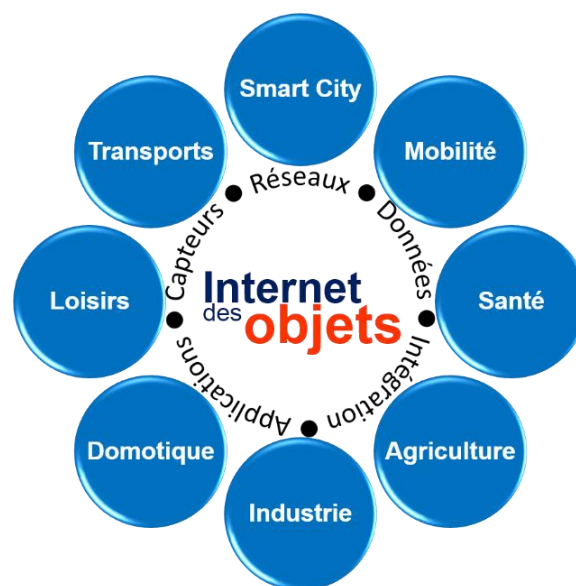


Figure 1.10 : Les domaines d'Internet des Objets [10]

Nous pouvons affirmer que l'Internet peut être connecté à n'importe quel objet. Ainsi, les domaines d'applications de l'IoT sont multiples. On cite, à titre d'exemples, l'industrie, la santé, l'agriculture, l'éducation et la recherche. Cependant, il sera possible dans le futur de trouver le concept de l'IoT n'importe où, n'importe quand et à la disposition de tout le monde.

Dans l'article [9] J.D Pessemier a argumenté que « L'IoT consiste en un monde de données (énormes), qui, si elles sont exploitées correctement, contribueront à répondre aux problèmes d'aujourd'hui, notamment dans les domaines suivants : aérospatial, aviation, automobile, télécommunications, construction, médical, autonomie des personnes handicapées, pharmaceutiques, logistiques, gestion des chaînes d'approvisionnements, fabrication et gestion du cycle de vie des produits, sécurité, sûreté, surveillance de l'environnement, traçabilité alimentaire, agriculture et élevage. »

### 1.8. Les défis de l'IoT

Plusieurs défis de recherche et de technologie doivent être adressés à la mise en œuvre des applications IoT ainsi que la réalisation potentielle de plates-formes IoT horizontales. Les défis les plus importants, sont énumérés ci-dessous : [18]

- 1) **Interopérabilité technologique:** L'interopérabilité est nettement plus difficile pour l'Internet des objets, car il ne s'agit pas seulement de connecter les personnes à des personnes, mais aussi d'assurer une interaction transparente entre les appareils et les personnes disposant d'appareils. Ces appareils peuvent différer quant à leurs capacités technologiques.
- 2) **Interopérabilité sémantique:** Pour une interopérabilité totale, il est nécessaire que les dispositifs interprètent correctement les informations partagées et agissent en conséquence, ce qui est couvert par l'aspect sémantique de l'interopérabilité, généralement appelé modèle d'information. Par conséquent, des améliorations doivent être apportées concernant les ontologies distribuées, le web sémantique ou la découverte de dispositifs sémantiques.
- 3) **Sécurité et confidentialité:** L'intégrité des données, l'identification unique et le cryptage sont considérés comme des défis majeurs pour l'IoT, car la plupart des données acquises et communiquées contiennent des informations personnelles. En outre, la propriété des données, les questions juridiques et de responsabilité doivent être traitées en conséquence.

Enfin, les technologies de chiffrement efficace et de protection des données doivent être considérées.

- 4) **Les objets intelligents:** Des circuits de très faible puissance et des dispositifs capables de tolérer des environnements difficiles doivent être développés. De plus, le traitement parallèle dans les systèmes multiprocesseurs basse consommation, l'adaptation, le comportement autonome tout en garantissant la confiance, la confidentialité et la sécurité, ainsi que les technologies de batterie, de récupération d'énergie et de stockage figurent parmi les principaux défis des IoT.
- 5) **Résilience et fiabilité:** Dans les environnements industriels ou dans les cas d'utilisation d'urgence, les interruptions temporaires ne peuvent pas être acceptées. Par conséquent, les problèmes de résilience et de fiabilité dans l'IoT doivent être étudiés à partir d'une vue globale des systèmes et comprendre des aspects tels que la disponibilité, la robustesse et la flexibilité de la communication et du matériel aux conditions environnementales changeantes, ou la robustesse du traitement des données à des informations incertaines.

## 1.9. Conclusion

Tout au long de ce chapitre, nous avons délibérément choisi des définitions simples et variées pour chaque outil et concept sur l'internet des objets, dans le but d'enlever l'ambiguïté et de démystifier certaines confusions. Nous avons également présenté le fonctionnement de l'IoT et les architectures de l'IoT et nous avons noté qu'il y a deux types d'architecture les plus utilisés. Nous avons parlé sur les différents éléments de l'IoT, et on a classifié les protocoles de cette technologie en trois classes, de plus on a présenté les différents domaines d'application de l'IoT, et finalement nous avons parlé sur les défis de l'IoT.

Dans le chapitre suivant, nous exposerons l'agriculture intelligente et quelques travaux qui sont liés à notre sujet de recherche.

*Chapitre 02*

***Agriculture Intelligente  
Et Travaux Connexes***



## Chapitre 02

# Agriculture Intelligente et Travaux Connexes

### 2.1. Introduction

Le développement des TIC (Technologies de l'Information et des Communications) a une influence croissante sur la façon dont l'information est divulguée et obtenue dans le secteur agricole. Au départ, la radiophonie était utilisée pour fournir aux agriculteurs une information de type agricole. Ensuite, la télévision s'est transformée en un important outil de divulgation de l'information, et récemment, les TIC dont l'application holistique au développement agricole suscite une attention croissante [25]. Et pour assurer la qualité, la quantité et la sécurité alimentaire à long terme, il est impératif que nous construisions des infrastructures physiques et informatiques durables pour permettre une agriculture autogérée et durable [17].

Dans ce deuxième chapitre nous allons présenterons tout d'abord l'utilisation de la technologie de l'information dans le secteur agricole, afin d'illustrer l'impact des technologies de l'information et des communication et l'IoT sur l'agriculture intelligente. Ensuite, nous présentons quelques travaux et études liés à la surveillance de l'Internet des Objets dans le domaine d'agriculture. Enfin, nous aborderons une comparaison entre ces travaux et extrairons les point clé que devrait avoir une IoT en agriculture intelligente.

### 2.2. Agriculture intelligente

Le secteur agricole sera amené à relever d'énormes défis pour nourrir une population mondiale qui, selon l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), devrait atteindre 9,6 milliards d'individus d'ici 2050. Alors, quelle est la solution ?

Ce numéro examine comment les techniques et les technologies agricoles high-tech peuvent contribuer à accroître les rendements tout en limitant les coûts et en préservant nos ressources [25].

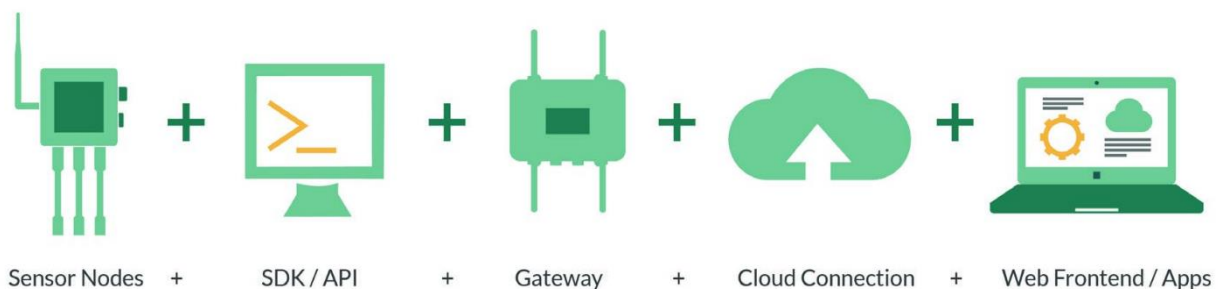
### 2.2.1. Le concept d'agriculture intelligente

L'approche de la science sur le terrain est une nouvelle tendance émergeant des nouvelles générations d'agriculteurs. La tradition cède la place à la modernisation pour planifier des activités telles que la plantation, la planification de l'irrigation, la pulvérisation et la récolte.

Le concept d'amélioration continue, bien connu dans les industries manufacturières et de services, peut être utilement appliqué à l'agriculture de précision. Le cycle d'amélioration est rendu possible par l'ajout de nouvelles connaissances, à partir des données collectées dans les fermes et des données publiquement disponibles provenant de diverses sources, qui affectent tous les résultats des diverses activités agricoles. Les données collectées par le M2M, bien analysées, permettent de mieux comprendre les activités agricoles, ce qui permet d'améliorer les processus dans ces activités. Des données complémentaires précieuses peuvent être ajoutées au processus analytique, par exemple: [27]

- Conditions météorologiques et prévisions
- Formation de culture scientifique
- Maladies végétales et animales et leurs symptômes
- Les règles et les règlements qui s'appliquent au pays où la ferme est située.

Toutes les données recueillies ont une valeur, dont certaines peuvent s'avérer utiles au-delà de son utilisation actuelle. D'autres parties voudront utiliser ces données. Ces idées peuvent être partagées avec d'autres parties intéressées, par exemple, les fabricants de l'équipement agricole utilisé par l'agriculteur ou les fournisseurs d'engrais ou de produits chimiques appliqués [27].



**Figure 2.1 : Chaîne de valeur illustrant la collecte de données des nœuds de capteurs et de la chaîne d'analyse au système d'aide à la décision basé sur le Web [27]**

### 2.2.2. L'impact des TIC sur l'agriculture

Les TIC peuvent constituer un soutien pour les agriculteurs en leur permettant d'accéder à une information relevant des catégories suivantes qui couvrent l'ensemble du processus de production agricole: [25]

- ***Achat d'intrants et commercialisation de produits agricoles***

Les TIC permettent d'avoir un accès à l'information commerciale en temps réel et facilitent le contact avec d'autres parties prenantes de la chaîne de valeur; les agriculteurs peuvent ainsi acquérir des intrants agricoles de qualité à des prix compétitifs, promouvoir leurs produits sur différents marchés virtuels, et négocier les prix. D'une manière générale, cette technologie permet également aux agriculteurs de mieux répondre aux demandes du marché.

- ***Information stratégique***

Les TIC peuvent fournir une information relative aux pratiques culturales, servir à l'aménagement et à la préparation des terres, aider à déterminer la quantité adéquate d'intrants, fournir l'information climatique, permettre la détection précoce et le traitement des ravageurs et des maladies, et faciliter les prévisions de récolte

- ***Tendances antérieures***

Les TIC peuvent jouer un rôle déterminant dans la prise de décision relative à la production agricole en apportant des informations sur les tendances antérieures en matière de productivité, d'attaques de ravageurs et de conditions climatiques, entre autres éléments. L'information relative aux conditions climatiques peut, par exemple, aider les cultivateurs à programmer les activités culturales afin d'optimiser la production et de contrôler les facteurs de stress.

- ***Décisions de politique gouvernementale***

Divers outils liés aux TIC permettent d'accéder à une information relative aux politiques gouvernementales en matière d'agriculture (tels que la commercialisation, les lois sur l'emploi et les propriétés foncières), qui peut s'avérer déterminante pour les agriculteurs au moment d'adopter une décision.

### 2.2.3. Les systèmes de traçabilité des produits

Les TIC jouent un rôle essentiel pour faciliter la traçabilité des produits, ce qui permet, entre autres, d'aider les agriculteurs à améliorer le contrôle des maladies, l'assurance qualité,

et de leur présenter de nouveaux marchés pour écouler leurs produits. Un exemple concret mentionné par l'un des participants concerne l'application des TIC pour aider les agriculteurs à acheter des intrants de qualité. Par exemple, tous les intrants pourraient porter un numéro d'identification correspondant à un numéro de téléphone que les agriculteurs pourraient appeler pour obtenir le produit en question. Après l'appel téléphonique, l'agriculteur recevrait un SMS contenant l'information pertinente, par exemple, sur le fabricant du produit, le processus de fabrication et la date d'expiration. Ce système de traçabilité des produits pourrait ainsi contribuer à contrecarrer la vente d'intrants falsifiés aux agriculteurs [25].

#### 2.2.4. L'utilisation accrue des TIC dans l'agriculture

L'importance des TIC pour le développement agricole et leur rôle en tant qu'outils de choix pour le « partage » et la « collaboration » considérés comme des éléments clés pour aborder le problème de l'insécurité alimentaire qui est un problème de nature mondiale et interconnectée. Les facteurs ci-après ont fait obstacle à l'utilisation accrue des TIC dans l'agriculture: [25]

- **Les divergences entre la recherche et les réalités locales :** Les études ne répondent pas toujours aux besoins et aux capacités des agriculteurs pour qui les technologies proposées peuvent, par exemple, ne pas être disponibles ou s'avérer trop coûteuses. Il est indispensable d'appliquer des innovations adaptées au contexte, ce qui requiert une participation plus étroite des petits exploitants afin d'aborder leurs difficultés de façon adéquate, tout en tenant compte des outils dont ils peuvent disposer.
- **Réticence des responsables de la formulation de politiques :** Par exemple, les drones pourraient être très utiles pour collecter de façon efficace des données portant sur de grandes distances, mais leur utilisation a fait l'objet de réticences pour des raisons de sécurité. Il faut donc convaincre les décideurs que les drones ne seront utilisés que pour la collecte de données relatives à l'agriculture, et que ces données seront traitées de façon confidentielle.
- **Manque de formation :** Rares sont les experts agricoles formés à l'utilisation efficace des TIC.
- **Des coûts financiers élevés :** À la fois pour le matériel et le logiciel. D'une manière générale, les petits exploitants n'ont pas les moyens financiers nécessaires pour accéder aux outils des TIC.

### 2.2.5. À l'aube d'une agriculture à haute technologie

Il va sans dire que les industriels doivent participer à la réflexion autour de l'agriculture intelligente. À travers le monde, nombre d'entreprises ont redoublé d'efforts pour intégrer l'IoT dans l'agriculture. AGCO, fabricant et distributeur mondial d'équipements et d'infrastructures agricoles, est l'un des acteurs du secteur [24].

Il y a quelques années, l'entreprise a dévoilé une nouvelle stratégie mondiale destinée à gérer tous les aspects d'une technologie agricole de précision, à savoir une approche de la gestion des exploitations agricoles s'appuyant sur les technologies de l'information (TI) afin de s'assurer que les cultures et le sol reçoivent exactement ce dont ils ont besoin pour une santé et une productivité maximales. Cette nouvelle solution agrotechnologique, baptisée « Fuse Technologies », intègre la télématique, des systèmes de gestion de données et des solutions d'autoguidage qui, lorsqu'ils sont associés, sont susceptibles de rendre l'agriculture beaucoup plus productive et rentable [24].

### 2.2.6. Ce que l'IoT permet de faire dans l'agriculture ?

L'IoT jouera un rôle très important pour l'agriculture de demain et permettra aux exploitants d'être beaucoup plus précis, au centimètre près » estime M. Buitkamp. « Ainsi, la vieille approche fragmentée devient irrémédiablement un vestige du passé. » Cette évolution présente des avantages considérables, tant d'un point de vue économique qu'écologique. M. Coallier prévoit que l'IoT, le big data et d'autres technologies, parfois appelées « TIC intelligentes », susciteront sous peu une forte demande. « L'agriculture est une activité cruciale dans notre société » ajoute-t-il, d'où l'importance des apports de l'IoT dans ce secteur [24].

Les capteurs placés dans les champs permettent par exemple aux agriculteurs d'établir des cartes détaillées de la topographie et des ressources d'une zone donnée, ainsi que des paramètres tels que l'acidité et la température du sol. Ils peuvent aussi avoir accès aux prévisions météorologiques, ce qui permet d'anticiper les tendances pour les jours et semaines à venir [24].



Figure 2.2 : L'IoT dans l'agriculture

### 2.2.7. Des pixels aux tonnes récoltées

Si l'agriculteur pouvait établir une carte précise avec toutes ces informations, il pourrait être en mesure de pulvériser de l'engrais là où le sol est le plus pauvre, irriguer seulement les zones les plus sèches et traiter uniquement les plantes qui doivent être protégées contre les nuisibles. Au-delà des économies potentielles considérables, des plantes en meilleure santé sont également synonymes de rendements accrus [24].

Jorge Fernandez, expert en traitement de l'image et responsable des solutions pour l'agriculture dans une société de logiciels, Pix4D. L'entreprise, basée en Suisse, créée à Lausanne en 2011 (La figure 2.3), développe des logiciels de pointe qui convertissent les images capturées par un drone en ce que Jorge Fernandez appelle « des cartes de réflectance en 2D de qualité topographique, radiométriquement et géométriquement précises, des orthomosaïques, ainsi que des nuages de points tridimensionnels et des modèles de surface ». Cette solution spécifie généralement le niveau d'intrants pour chaque partie du champ [24].

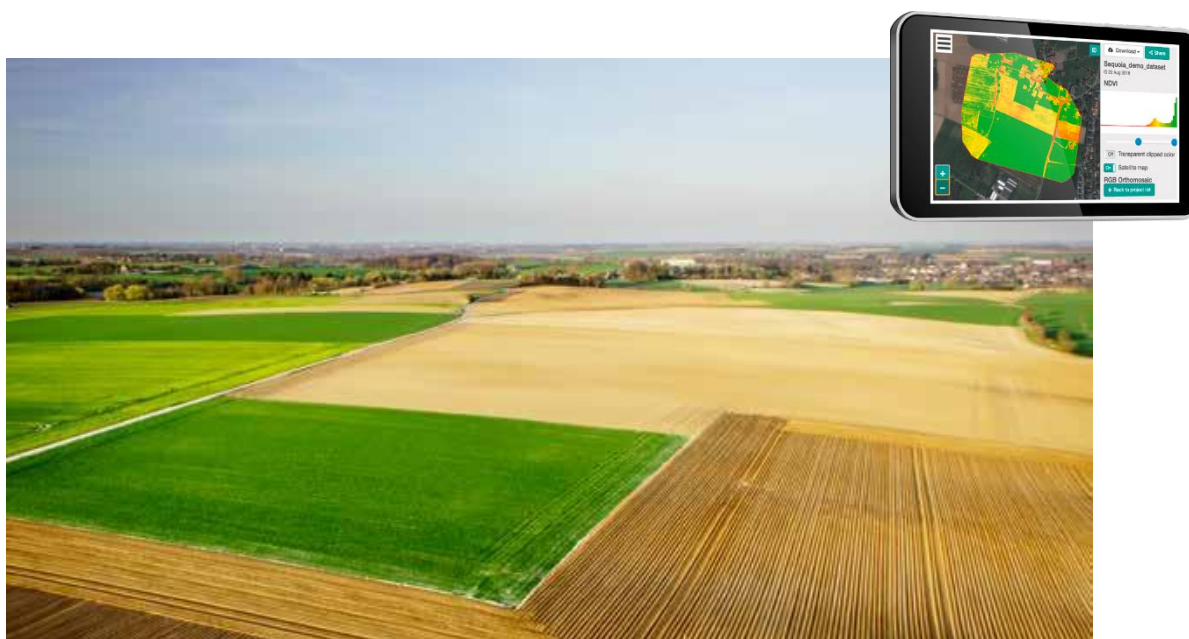


Figure 2.3 : L'appareil de Pix4D

### 2.2.8. Agriculture de précision et agriculture intelligente

De nombreux agriculteurs ont commencé déjà à intégrer de nouvelles techniques agricoles basées sur les hautes technologies afin d'améliorer l'efficacité de leur travail au quotidien. Par exemple, les capteurs placés dans les champs permettent aux agriculteurs d'obtenir des cartes détaillées de la topographie et des propriétés de cultures d'un terroir, notamment des variables telles que l'acidité, la température, les teneurs en azote, le biogaz qui

sont des éléments qui définissent l'état d'une production. Ils peuvent également accéder aux prévisions climatiques pour contrôler les conditions météorologiques favorables à la sûreté et la qualité de leurs récoltes [26].

### 2.2.9. Quelques données analytiques agricoles

L'agriculture intelligente et l'agriculture de précision décollent, mais elles pourraient simplement être les précurseurs d'une utilisation encore plus grande de la technologie dans le monde agricole [26].

BI Intelligence, le service de recherche premium de Business Insider, prédit que les installations de périphériques IoT dans le monde de l'agriculture passeront de 30 millions en 2015 à 75 millions en 2020, pour un taux de croissance annuel composé de 20%.

Les États-Unis mènent actuellement le monde dans l'agriculture intelligente d'IoT, puisqu'ils produisent 7 340 kg de céréales par hectare (2,5 acres) de terres agricoles (par exemple, le blé, le riz, le maïs, l'orge, etc.), par rapport à la moyenne mondiale de 3 851 kg de céréales Par hectare [26].



Figure 2.4 : L'identification automatique des maladies des plantes

Et cette efficacité devrait s'améliorer au cours des prochaines décennies à mesure que les fermes seront plus connectées.

OnFarm, qui fait une plate-forme IoT de la batterie connectée, s'attend à ce que la ferme moyenne génère en moyenne en moyenne 4,1 millions de points de données en 2050, contre 190 000 en 2014. En outre, OnFarm a réalisé plusieurs études et a découvert que pour la ferme moyenne, le rendement a augmenté de 1,75%, les coûts de l'énergie ont chuté de 7 \$ à 13 \$ l'acre, et l'utilisation de l'eau pour l'irrigation a diminué de 8%.

Compte tenu de tous les avantages potentiels de ces applications IOT dans l'agriculture intelligente, il est évident que les agriculteurs se tournent de plus en plus vers les outils de référence, drones et satellites pour l'avenir de l'agriculture [26].

### 2.2.10. L'infrastructure agricole intelligente et les besoins de recherche

La recherche intelligente sur l'infrastructure et l'informatique qui accroît simultanément la compétitivité économique, intensifie la production alimentaire, réduit l'utilisation des ressources (terre, eau et main-d'œuvre) et assure la viabilité à long terme de l'environnement et la salubrité des aliments. Le tableau 2.1 (page suivante) énumère de nombreux exemples de besoins et d'opportunités d'investissement dans l'infrastructure : [17]

- La télétransmission peut remédier à l'inadéquation structurelle entre les zones agricoles confrontées à une pénurie de main-d'œuvre et d'autres zones (par exemple, les anciennes villes minières et manufacturières) avec un surplus de travailleurs.
- La télé-opération nécessitera également des investissements dans l'infrastructure Internet à large bande pour les zones rurales afin de favoriser une interaction rapide entre les travailleurs à distance et le matériel agricole. En outre, l'investissement dans une infrastructure de réalité augmentée (ou virtuelle) peut aider la prochaine génération à tirer parti des zones urbaines dans les carrières agricoles.

Tableau 2.1 : Infrastructure intelligente et besoins de recherche [17]

| Zones  | Infrastructure intelligente et besoins de recherche   |
|--|---|
| <b>Développement de la main-d'œuvre</b>                              | <p><i>Réalité augmentée:</i> des jeux-vidéo sur l'agriculture de précision pour engager la jeunesse urbaine.</p> <p><i>Téléopération:</i> créer des emplois dans les régions excédentaires et remédier à la pénurie de main-d'œuvre agricole.</p>   |
| <b>Systèmes Cyber-physiques &amp; Robotique</b>                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Positionnement robuste de haute précision pour contrer l'indisponibilité, le brouillage et l'usurpation du GPS.</li> <li>- Capteurs intégrés à travers les satellites, les UAV, l'équipement agricole et le sous-sol.</li> <li>- Automatisation pour les tâches à forte intensité de main-d'œuvre, Ex. Cueillette de baies, taille de vignes.</li> <li>- Robotique abeilles pour la pollinisation dans les zones de déclin de la population d'abeilles.</li> </ul> |
| <b>Apprentissage automatique spatio-temporel, Analyse de données</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tirer parti des nouvelles données satellitaires à haute résolution (par exemple, tous les jours, 1 mètre) pour surveiller les récoltes.</li> <li>- Détection spatio-temporelle des points chauds des ravageurs, des maladies et des stress agricoles.</li> <li>- Modéliser les ressources disponibles, prévoir les besoins alimentaires, hydriques et énergétiques</li> </ul>  |



|  |   |
|--|---|
|  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Gestion active des capteurs et des actionneurs pour optimiser l'allocation des ressources.</li> </ul>  |
| <b>Sécurité, confidentialité, Sûreté</b>         | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Espaces de transmission et de partage de données sécurisés et protégés par la vie privée pour les exploitations agricoles.</li> <li>- Notions spécifiques de l'application de la vie privée pour les données de données agricoles spatio-temporelles.</li> <li>- Modèles économiques pour promouvoir le partage de données entre les parties prenantes</li> </ul>  |
| <b>Mise en réseau, Internet des objets Ferme</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Améliorer l'accès au réseau à large bande dans les zones agricoles rurales.</li> <li>- Edge Cloud Computing pour réduire le besoin de transférer de grandes quantités de données.</li> </ul>   |
| <b>Aide à la décision</b>                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Image spatiotemporelle avancée et techniques d'analyse vidéo.</li> <li>- Automatisez les tâches, par exemple, identifiez le stress des cultures, les fruits / légumes prêts à être récoltés.</li> </ul>  |
| <b>Engagement citoyen</b>                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Médias sociaux, applications, aide à la décision facile à utiliser pour les producteurs et les éleveurs.</li> <li>- Modification du comportement en aval via les applications (par exemple, réduction du gaspillage alimentaire).</li> <li>- La science cognitive et comportementale appliquée pour améliorer la rétroaction pour la technologie.</li> <li>- Amélioration, avancement scientifique et innovation.</li> </ul> |

## 2.3. Travaux Connexes

Les travaux suivants implémentent l'IoT dans différents domaines tels que l'agriculture et la gestion de l'énergie ou essaient d'améliorer certaines fonctionnalités comme le coût, la consommation d'énergie, etc.

### 2.3.1. Imagerie thermique dans l'irrigation intelligente

M. Roopaei et al. dans l'article [19] ont proposé un système d'irrigation intelligent. Ils ont utilisé des capteurs de sol pour collecter des informations sur la façon dont l'eau circule dans le sol, suivre les changements dans l'humidité du sol, la température et les niveaux d'azote et de carbone. Ces capteurs peuvent fonctionner en conjonction avec des méthodes d'irrigation goutte à goutte et fertigation pour éviter le gaspillage inutile d'eau et d'engrais, augmentant ainsi la qualité des fruits et des feuilles.

Alors que les cultures peuvent être capables de gérer le stress hydrique dans une certaine mesure, il est important que les agriculteurs et les administrateurs de l'irrigation surveillent les variations de stress afin d'éviter d'atteindre un niveau dangereusement élevé.

L'imagerie thermique combinée à d'autres techniques de traitement d'images et d'analyse de données tente de réduire le stress hydrique des cultures et de planifier l'irrigation (voire la figure 2.5). Donc ils ont utilisé cette technique pour déterminer la relation entre l'état de l'eau de la plante / du champ et l'émission de rayonnement, et peuvent donc être utilisée comme mesure du stress hydrique et de la distribution de l'irrigation.

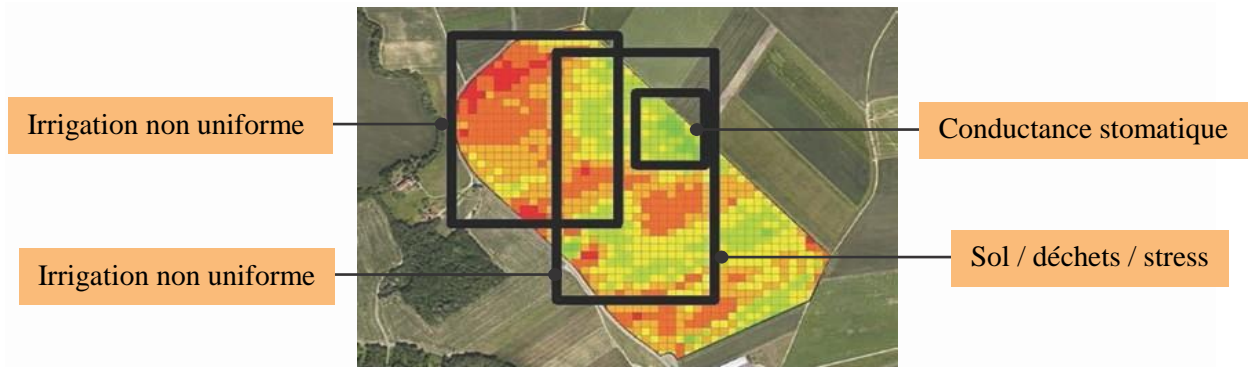


Figure 2.5 : Exemples d'informations provenant de l'imagerie thermique

Les auteurs ont déployé un réseau Cloud of Things (CoT), qui peut inclure l'Internet des Objets et le système cyber-physique, dans une agriculture intelligente pour rendre l'utilisation de l'énergie plus efficace et moins coûteuse. Par exemple, l'analyse des données recueillies à partir du réseau CoT (p. Ex., Situation météorologique, état du sol) peut fournir des renseignements pratiques en combinaison avec des données capturées par des capteurs mesurant la température, l'humidité, et cela permet aux agriculteurs d'utiliser l'eau, les engrais et les pesticides dans des quantités et des positions plus précises et avec un meilleur calendrier pour augmenter les rendements.

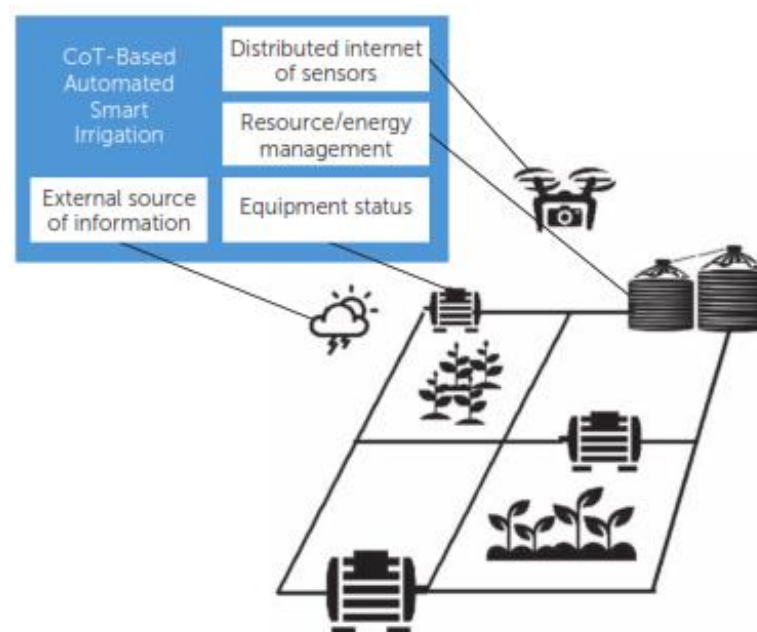


Figure 2.6 : Vue d'ensemble du déploiement d'un système d'irrigation automatisé basé sur le Cloud of Things

### 2.3.2. Solution IoT pour améliorer la précision des mesures en serre

Les auteurs de ce travail [20] ont intégrés les capacités de l'Internet des Objets (IoT) dans une serre pour améliorer la compréhension de la croissance des plantes dans les cultures protégées. Le système conçu est constitué d'un circuit électronique, les capteurs, les communications mobiles, des actionneurs et un logiciel fonctionnant dans le nuage. La fonctionnalité du système a été testée dans une production de légumes de concombre dans une serre, où les données acquises à partir de variables environnementales, les conditions de substrat et les mesures overdrain sont envoyées sur Internet pour leur analyse à distance par les chercheurs.

Dans le cas particulier des mesures de surdrainage, la méthode traditionnelle de collecte de données utilisant des procédures manuelles avec sondes de pH et de conductivité a été améliorée par l'introduction de jauges de vidange, vannes et sondes avec acquisition automatique de données et application du filtre de Kalman en ligne pour améliorer la précision d'un débitmètre à liquide de basse précision. Les résultats préliminaires sont encourageants et semblent indiquer la poursuite du développement d'outils efficaces pour la prise de décision concernant la production de légumes dans l'horticulture en serre.

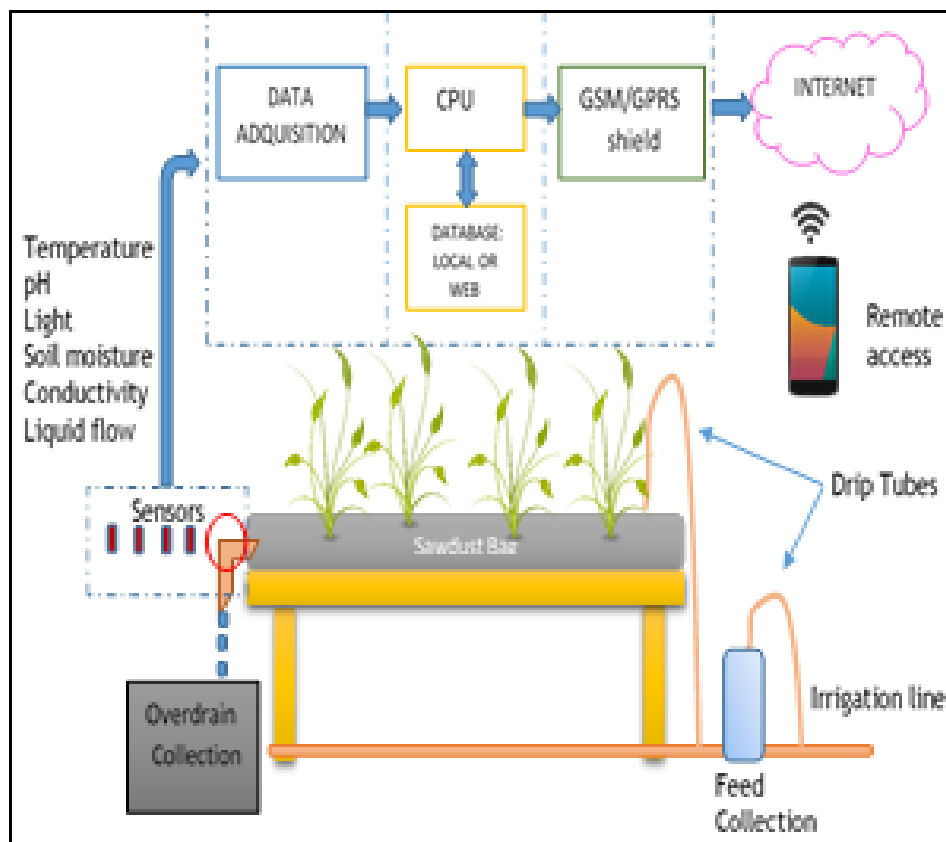


Figure 2.7: Représentation schématique d'une production de légumes horticoles en serre utilisant les capacités IoT

### 2.3.3. Un algorithme génétique pour l'optimisation des coûts énergétiques dans le système d'irrigation de la ferme intelligente

Le problème posé par A. Louise et al. dans leur travail [21] est le fonctionnement des pompes à eau dans le système d'irrigation, limité par la quantité d'énergie disponible de la centrale solaire, est simulé et optimisé pour minimiser le coût de l'énergie. Et donc pour réduire le coût de l'énergie pour faire fonctionner deux pompes, tout en maintenant la quantité d'eau nécessaire à la ferme, ils ont proposé un algorithme génétique qui s'exécute plusieurs fois sous différents paramètres d'optimisation pour obtenir les solutions les plus optimales.

Les solutions obtenues à partir des processus d'optimisation ont donné de très bons résultats en minimisant les coûts énergétiques des deux pompes dans le système d'irrigation de la ferme intelligente.

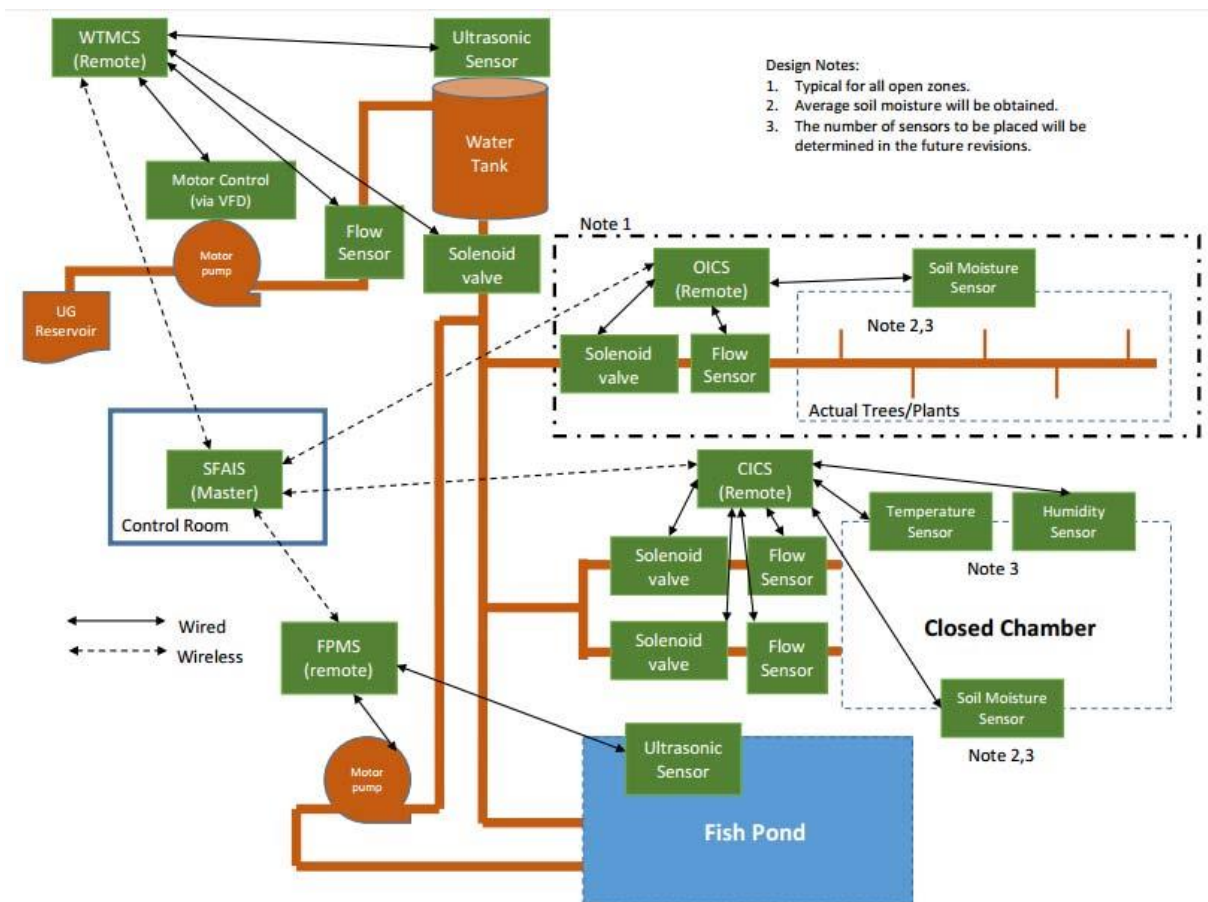


Figure 2.8: Schéma fonctionnel du système d'irrigation intelligent de la ferme

### 2.3.4. Système de surveillance environnementale pour une agriculture intelligente

Les auteurs dans ce travail [22] voient que l'information environnementale sur le terrain et l'état de croissance des plantes sont des éléments très importants non seulement pour évaluer les conditions environnementales sur le terrain, mais aussi pour améliorer le système de production agricole. Donc ils ont présenté des exemples de surveillance de l'environnement de terrain abordable et de système de mesure de la croissance des plantes dans l'agriculture intelligente. Ce système est utile aussi pour capter les caractéristiques de croissance des plantes.

Ce système commun de surveillance de l'environnement sur le terrain consiste en un dispositif de surveillance de l'environnement sur le terrain, un serveur de base de données fourni en tant qu'application en nuage et un système de fourniture et de visualisation de données via internet. Le dispositif de surveillance est composé d'une carte microcontrôleur avec plusieurs broches d'E/S, de capteurs tels que la température et l'humidité de l'air, le rayonnement solaire, le CO<sub>2</sub> et la teneur en humidité du sol.

Toutes les données mesurées sont stockées dans la base de données en utilisant un programme API. La figure 2.9 montre un dispositif de surveillance de terrain typique (nœud). Le dispositif de surveillance est développé par le Particle Photon. Le panneau de développement a une fonction de mise à jour du firmware en ligne et logiciel appelé OTA (Over The Air Update), qui facilite la flexibilité et la maintenance du firmware lors des opérations.

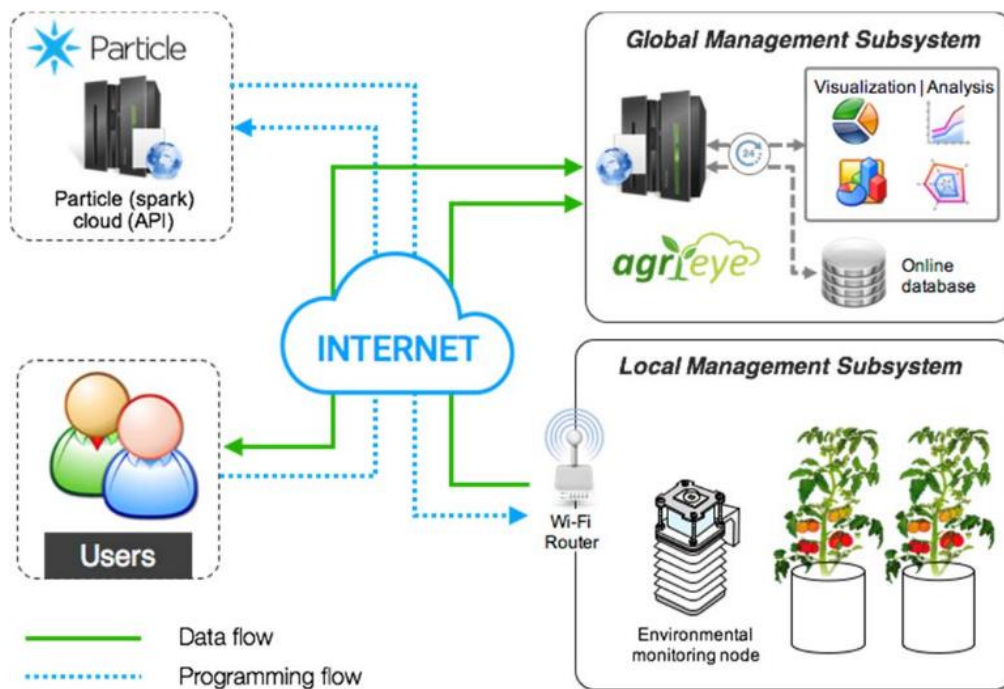


Figure 2.9 : L'architecture du système de surveillance de l'environnement sur le terrain

### 2.3.5. Gestion optimale de l'énergie des serres dans les Smart Grids

Les auteurs dans [23] voient que dans les serres, l'éclairage artificiel, la production de CO<sub>2</sub> et les systèmes de contrôle du climat consomment une énergie considérable. C'est pour cela ils ont expliqué la nécessité de réduire la consommation pendant les périodes de conditions de réseau critiques ou les périodes de coûts énergétiques élevés. Et pour minimiser les coûts énergétiques totaux et les coûts de la demande tout en tenant compte des paramètres importants des serres ; en particulier, la température intérieure et l'humidité, la concentration de CO<sub>2</sub> et les niveaux d'éclairage doivent être maintenus dans des limites acceptables.

Les auteurs ont proposé une nouvelle approche de contrôle hiérarchique et de nouveaux modèles d'optimisation mathématique des serres, qui peuvent être facilement intégrés dans des systèmes de gestion de concentrateurs énergétiques.

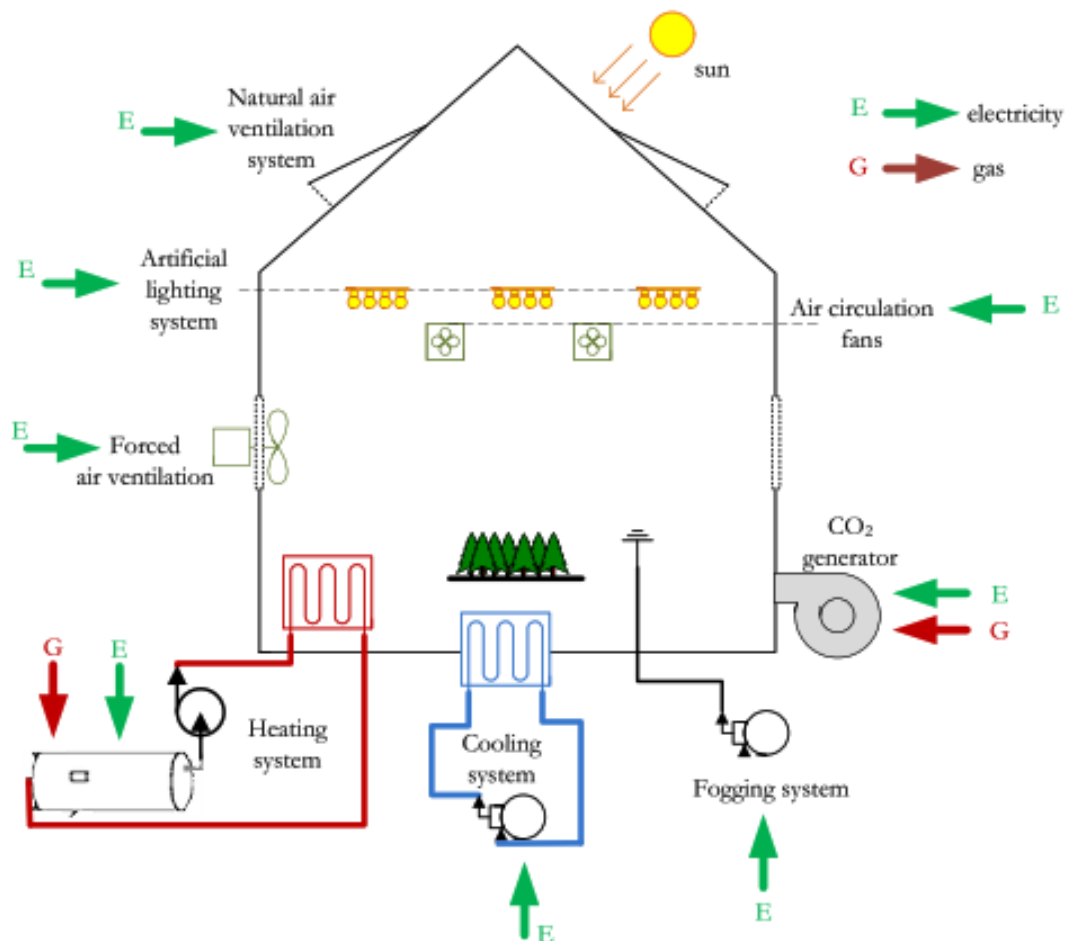


Figure 2.10: Système d'énergie de serre

## 2.4. Comparaison des travaux connexes

Après notre étude des travaux connexes présentés, nous avons remarqué que pour avoir une solution IoT, nous devrions d'abord assurer ces points:

- La sélection du protocole approprié pour notre architecture.
- Surveiller notre environnement et en avoir une idée générale afin de choisir quelle décision prendre dans notre système.
- Le choix du capteurs et actionneurs spécifiques.
- La sécurité des informations pour les protéger contre le piratage (vol, corruption de données ...)

Et pour atteindre une agriculture intelligent, nous devrions d'abord assurer ces points:

- Irrigation intelligente et utilisation efficace des ressources en eau.
- Optimiser les redondances et les erreurs dans les données collectées à travers le réseau de capteurs sans fil.
- Optimiser et minimiser le coût énergétique.

Le tableau 2.2 montre la comparaison entre les travaux connexes précédents par rapport les métriques tels que les types de capteurs, l'accès Internet . . . etc

**Tableau 2.2 : Comparaison des travaux connexes**

| Papier | Sujet                        | Type de capteurs   | Accès Internet      | Téchnologies / Méthode                       | Solution Cloud |
|--------|------------------------------|--|---------------------|--|----------------|
| [19]   | Surveillance de l'irrigation | Sol<br>Lumière<br>Humidité<br>Temperature                                | Wi-Fi<br>LTE<br>GSM | Imagerie Thermique<br>Cloud of Things<br>IoT | IaaS           |
| [20]   | Fusion de données            | Lumière<br>Humidité<br>Temperature                                       | Wi-Fi               | Filtre de Kalman                             | PaaS           |
| [21]   | Optimisation de l'irrigation | Sol<br>Humidité<br>Temperature   | /                   | Les algorithmes génétiques                   | /              |
| [22]   | Surveillance                 | Sol<br>Humidité<br>Temperature<br>Rayonnement solaire<br>CO <sub>2</sub> | Wi-Fi               | IoT<br>ToF (Time of Flight)                  | PaaS           |
| [23]   | Gestion d'énergie            | Sol<br>Lumière<br>Humidité<br>Temperature                                | /                   | Les algorithmes génétiques                   | /              |

## 2.5. Conclusion

L'utilisation des technologies de l'information et des communications (TIC) dans le secteur agricole pouvait contribuer à réduire la pauvreté et à améliorer la sécurité alimentaire. L'agriculture intelligente va développer la main-d'œuvre par la création des emplois dans les régions excédentaires et remédier à la pénurie de main-d'œuvre agricole.

Dans ce chapitre, nous avons vu l'utilisation des technologies de l'information et des communications dans le secteur agricole et l'application de l'IoT pour atteindre une agriculture intelligente, et nous avons vu aussi un certain nombre de travaux connexes, certains d'entre eux ont parlé de la surveillance en utilisant les technologies IoT dans différents domaines comme la surveillance de l'irrigation, les unités de conditionnement de l'énergie ... etc. À partir de ces travaux nous avons pu sélectionner quelques points clés tels que le types de capteurs, et la technologie ou la méthode utilisée, ces points sont essentiels pour donner une bonne solution IoT.



*Chapitre 03*

***Conception du système***

# Chapitre 03

## Conception du système

### 3.1. Introduction

Dans le cycle de vie d'un projet, l'analyse et la conception constituent deux phases primordiales et importantes pour la réalisation de l'application. Dans ce chapitre, nous allons présenter la spécification et l'analyse des besoins ainsi que la conception du système. Nous avons choisi le langage standard UML (Unified Modeling Language) pour modéliser notre système. Il offre des notations standard qui permettent de simplifier la réalité pour comprendre le système à développer. Ensuite, nous allons clarifier une vue globale de notre projet, en décrivant l'architecture générale que nous allons suivre dans la partie réalisation. Puis nous allons construire un algorithme génétique qui optimise la consommation des ressources énergétiques et prend une décision intelligente à condition que l'évolution naturelle de la plante soit maintenue.

### 3.2. Architecture générale

Afin de clarifier notre travail, nous avons fait deux architectures : une architecture générale simplifiée et une architecture détaillée qui explique en détail tous les composants, la figure 3.1 représente l'architecture générale, nous voyons que nous disposons d'une serre équipée de plusieurs capteurs qui recueillent des informations telles que la température et l'humidité, ainsi qu'un certain nombre d'actionneurs tels que ventilateur et système d'irrigation. . . etc. Ces actionneurs et capteurs sont connectés à un micro-contrôleur Raspberry Pi, le micro-contrôleur est responsable de deux fonctionnalités :

- ✓ Collecter des données à partir de capteurs et les envoyer au système (système GHs) via un modem 4G.
- ✓ Recevoir des commandes de GHs System, dans ce cas le micro-contrôleur agit en contrôlant l'actionneur installé dans la serre.

Le système des serres (Système GHs) dans notre architecture représente tout le système de surveillance IoT. Le Cloud Environment (CE) héberge les différentes composantes du système GHs, le CE est fourni par un tiers.

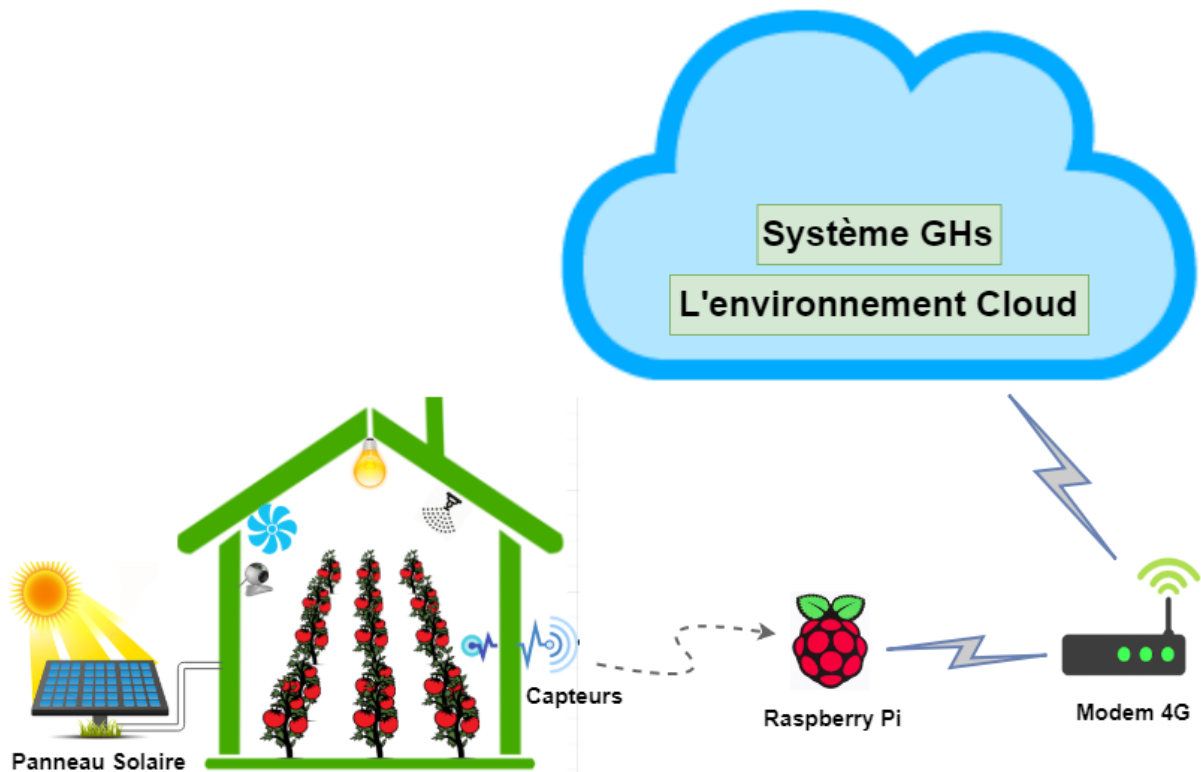


Figure 3.1 : Architecture générale

### 3.3. Architecture détaillée

Dans notre architecture il y a 2 cotés qui sont :

- **Coté Client** : Ce côté représente les serres surveillées (qui sont situées soit dans un domaine agricole soit dans un champ de serres) + équipements utilisés pour les connecter au système GHs.
- **Coté fournisseur** : représente les six composants qui sont situés dans le cloud et sont responsables de la récupération des données reçues du côté client pour montrer les statistiques et contrôler les ressources des serres, nous expliquerons plus tard la fonctionnalité et les composants de ce système.

L'environnement cloud (CE): c'est l'infrastructure de cloud computing dans laquelle le système GHs est hébergé cet environnement peut être soit en utilisant les technologies cloud Openstack ou VMware ou en obtenant un fournisseur de cloud tiers.

Voir la figure 3.2 qui représente notre architecture détaillée de la solution de surveillance d'une serre intelligente.

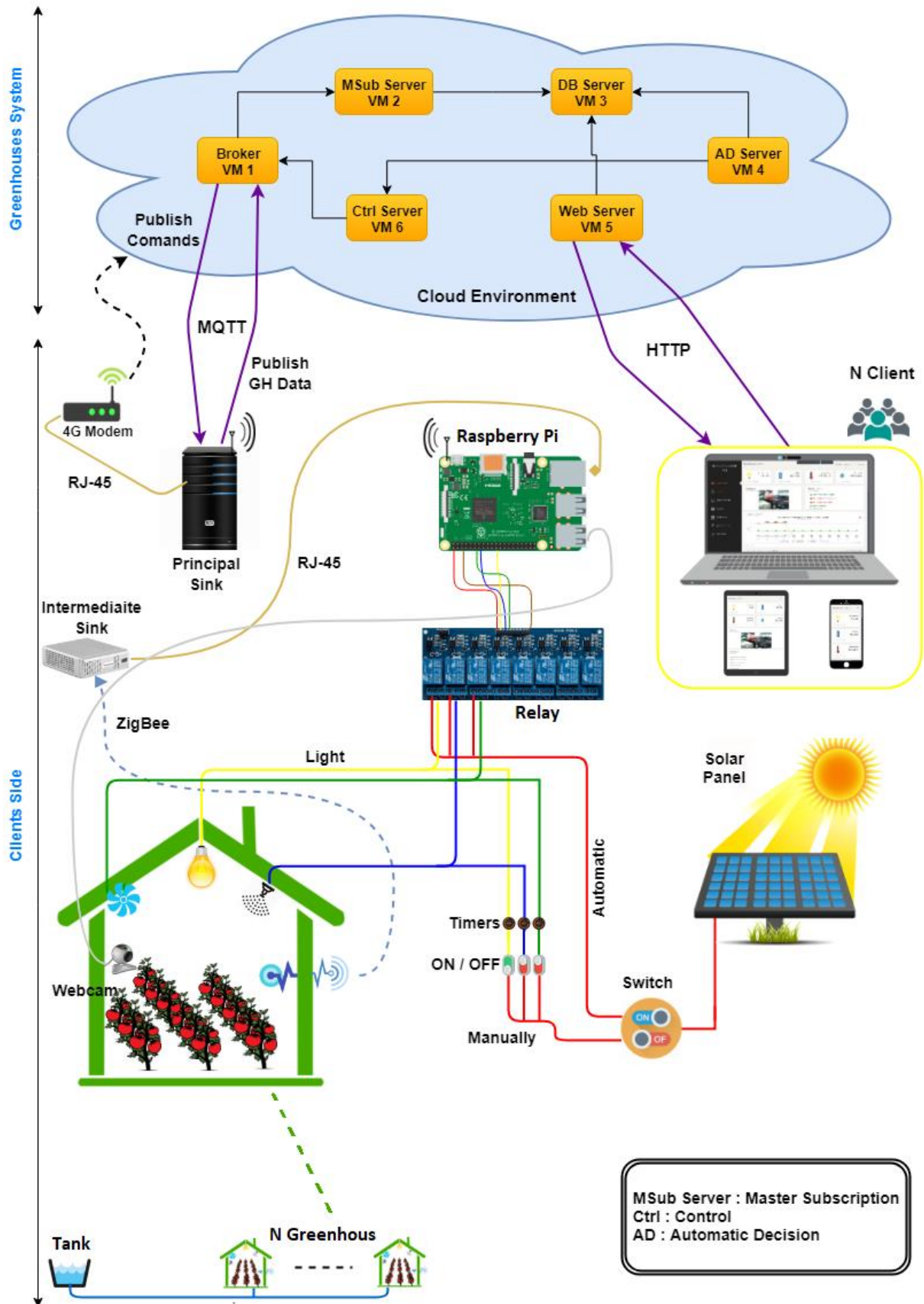


Figure 3.2 : Architecture détaillée

### 3.3.1. Principaux composants du côté client

Pour connecter une serre, nous avons besoin d'un ensemble de composants électroniques qui sont : Capteurs, Sink principal, Sink intermédiaire, passerelle, actionneurs et source d'énergie.

#### *Déploiement et fonctionnalité :*

- ✓ Nous mettons les capteurs sans fil à l'intérieur de la serre (capteur de température, capteur d'humidité, capteur de lumière, etc.) qui détectent et recueillons des informations sur l'environnement et les envoient au Microcontrôleur (Raspberry Pi dans notre cas).
- ✓ Nous mettons nos actionneurs dans la serre (lumière, ventilateur, ouvre-fenêtre, pompe ... etc.) à l'endroit approprié, par exemple, l'ouvre-fenêtre doit être placé à côté de la fenêtre, ces actionneurs sont commandés par le microcontrôleur.
- ✓ Le Raspberry Pi joue deux rôles, le premier est la récupération des données des capteurs sans fil avant de les envoyer à le Sink principal et puisque les capteurs sans fil utilisent la communication ZigBee, nous équipons notre Raspberry avec un module ZigBee pour lui permettre de communiquer avec les capteurs sans fil, le deuxième rôle est de contrôler les actionneurs avec la carte GPIO (General Purpose Input Output) et le module relais. En récupérant des données à partir de différents capteurs sans fil, Raspberry Pi agit ici comme un Sink intermédiaire.
- ✓ Nous plaçons le Sink principal (Sink Server) au milieu du champ des serres (un champ qui a plus d'une serre) pour une meilleure accessibilité, Le Sink principal a également 2 rôle de réception et de collecte d'informations provenant de chaque Sink intermédiaire (chaque serre dans le champ a son Raspberry Pi) avant d'envoyer ces informations au système GHs via la passerelle réseau. Le deuxième rôle est la réception des commandes de contrôle de système GHs et la retransmission de ces commandes à le Sink intermédiaire destiné à la serre correspondante.
- ✓ La passerelle (3G / 4G..etc) devrait être accessible par le Sink principal pour lui fournir un accès réseau.
- ✓ Source d'énergie: l'utilisation d'un panneau solaire serait un bon choix dans une région riche en énergie solaire.

### 3.3.2. Coté fournisseur (Composants du système)

- ✓ **Broker** : MQTT Broker est responsable de distribuer les messages des éditeurs aux abonnés ayant le même sujet dans notre architecture que le Broker distribue deux types de messages (messages de données et messages de contrôle). Les messages de données proviennent de le Sink principal et à la fin du broker au serveur d'abonnement principal. Les messages de contrôle proviennent du serveur de contrôle et à l'aide de la fin du broker à le Sink principal qui les envoie à le Sink intermédiaire à effet de serre destiné.
- ✓ **Serveur d'abonnement maître** : est un client d'abonné MQTT qui s'abonne à tous les messages de données publiés par le Sink principal et distribué par le Broker, chaque fois que le serveur d'abonnement maître a reçu des données, il les stocke au serveur de bases de données.
- ✓ **Serveur de décision automatique** : Ce composant est responsable de prendre une décision automatique régulièrement sans avoir besoin de l'intervention de l'utilisateur. Son rôle est de minimiser le besoin d'action répétitive par l'utilisateur et peut être configuré pour satisfaire les meilleures conditions pour les cultures en gardant le meilleur degré de température ou de donner la bonne quantité d'eau.
- ✓ **Serveur Web** : C'est le serveur responsable d'accorder l'accès à l'utilisateur pour voir les informations de surveillance sur ses serres et leurs statistiques sous la forme d'un tableau de bord Web, l'utilisateur peut également contrôler par cette interface (Tableau de bord) ses recours en serres soit manuellement, soit en configurant une action automatique périodique (configuration de Serveur de décision automatique).
- ✓ **Serveur de contrôle** : Ce serveur reçoit les deux commandes envoyées par l'utilisateur via le Serveur Web (Contrôle manuel) et les commandes automatiques sont envoyées à partir du serveur de décision automatique (préconfiguré par l'utilisateur) Après cela, le serveur de contrôle publie les commandes à travers le Broker vers le Sink principal ce dernier les renvoie à le Sink intermédiaire destiné (qui est en même temps le Microcontrôleur).
- ✓ **L'environnement cloud** : c'est l'infrastructure de cloud Computing dans laquelle GHs System est hébergé dans cet environnement, soit en utilisant les technologies Cloud Openstack ou Vmware, soit en obtenant un fournisseur de cloud tiers.

### 3.3.3. Schéma électronique

Le schéma suivant représente le circuit électronique de notre projet qui contient un micro-contrôleur, un relai de 8 canaux, les actionneurs (la lampe, le ventilateur et la pompe) et un switch pour passer entre deux mode comme nous voyons dans la figure 3.3, le mode manuel et le mode automatique.

- **Le mode manuel :** ce mode permettez-nous de contrôler les actionneurs manuellement, ce mode est utilisé dans le cas où le système tomber en panne, ou le client est oublier son smart phone dans un endroit loin, ou pour les gens qui ne maitrise pas l'utilisation de la technologie ...etc. Et dans ce mode, nous avons utilisé minuterie à chaque actionneur pour l'ajuster manuellement lorsqu'il est allumé et que la durée de l'opération est en cours.
- **Le mode automatique :** dans ce mode on a utilisé le micro-contrôleur Raspberry pi comme un contrôleur des actionneurs en envoyons un signal (0 pour allumer / 1 pour éteint) à traverse le relai qui permet l'ouverture et la fermeture d'un circuit électrique par un second circuit complètement isolé.

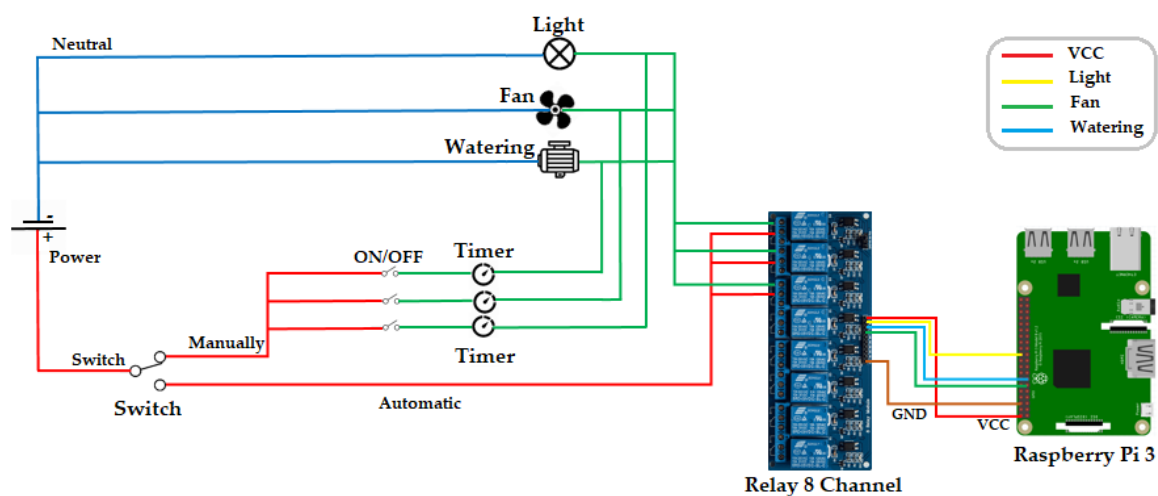


Figure 3.3 : Schéma électronique

### 3.4. L'analyse du système

Dans cette section, nous allons expliquer le fonctionnement du système de surveillance IoT pour la mise en œuvre des serres intelligentes connectées, afin de mieux comprendre son fonctionnement, nous avons illustré la relation et le fonctionnement des différentes composantes du système dans les diagrammes, et on a proposé un modèle conceptuel pour notre système base de données principale.

#### 3.4.1. L'objectif du système

L'Internet des Objets ainsi que le Cloud Computing représentent les grandes tendances informatiques du moment. L'objectif de ce travail consiste à étudier ces technologies afin de proposer et d'implémenter une nouvelle solution pour la mise en œuvre des serres intelligentes et connectées (cela inclut : La supervision des serres, prise de décision automatique et intelligentes, commande à distance : irrigation aération ...etc).

#### 3.4.2. Les besoins fonctionnels

Cette phase consiste à comprendre le contexte du système. Il s'agit de déterminer les différentes fonctionnalités et les acteurs les plus pertinent. L'acteur est une personne, un matériel ou un logiciel en tant que service (SaaS), qui est un modèle de distribution de logiciel à travers le Cloud où les applications sont hébergées par le fournisseur de service. Donc nous avons identifié pour notre application l'ensembles des besoins métiers qui représentent les actions que le système doit exécuter :

- ✓ **La page d'accueil** : c'est la page principale de notre application, elle se distingue des autres pages par le fait qu'elle est censée représenter, à l'internaute visiteur, le site sur lequel il se trouve de manière claire et forte.
- ✓ **Authentication** : le système doit permettre à l'utilisateur (Le client ou bien l'administrateur dans notre application) de saisir son email et le mot de passe pour accéder au système. Cette opération assure la sécurité du système.
- ✓ **La page de surveillance** : c'est la page qui visualisé les informations de la serre, les notifications, une webcam et des graphes représentent les informations sur la serre.
- ✓ **La page client** : c'est la page qu'affiche les informations personnelles du client où il peut les modifier, plus les informations générales concernant son ferme tels que le nombre des serres, la localisation ... etc.



- ✓ **La page commandes** : cette page permet aux client d'applique les commandes dans la serres comme allumé et éteint la lampe, la ventilateur ... etc, et aussi configuré les paramètres pour les notifications.
- ✓ **La page enregistreuse** : cette page affiche au client l'historique enregistré des dernières informations de la serre, comme il peut l'extraire dans un fichier PDF.
- ✓ **La page de décision automatique** : c'est la page où le client peut activer la décision automatique plus les informations concernent les paramètres de la décision.
- ✓ **La page statistique** : cette page permet eu client de visualisé les derniers états de son serre dans des graphes, comme il peut les enregistrer comme (JPEG, PNG, JPG ou PDF).
- ✓ **La page gestion d'énergie** : c'est la page qui va gérer l'énergie verte et afficher les décisions intelligentes pour les appliques sur la serres en optimise les ressources.

### 3.4.3. Les besoins non fonctionnels

Sont indispensable et permettent l'amélioration de la qualité logiciel de notre système. Parmi ces besoins on site :

- **Utilisabilité** : l'application doit être facile à utiliser et adaptées à l'utilisateur.
- **Performance** : un logiciel doit être avant tout performant, et répond à tous les besoins d'une manière optimal.

### 3.4.4. Diagramme de cas d'utilisation

Le diagramme de cas d'utilisation est une représentation graphique qui est utilisés pour donner une vision globale du comportement fonctionnel d'un système. Il permet de décrire l'interaction entre l'acteur et le système. Pour cela on doit identifier les cas d'utilisation effectués par les l'utilisateurs (Le client et L'admin), comme illustré dans la figure 3.4 dans la page suivante.

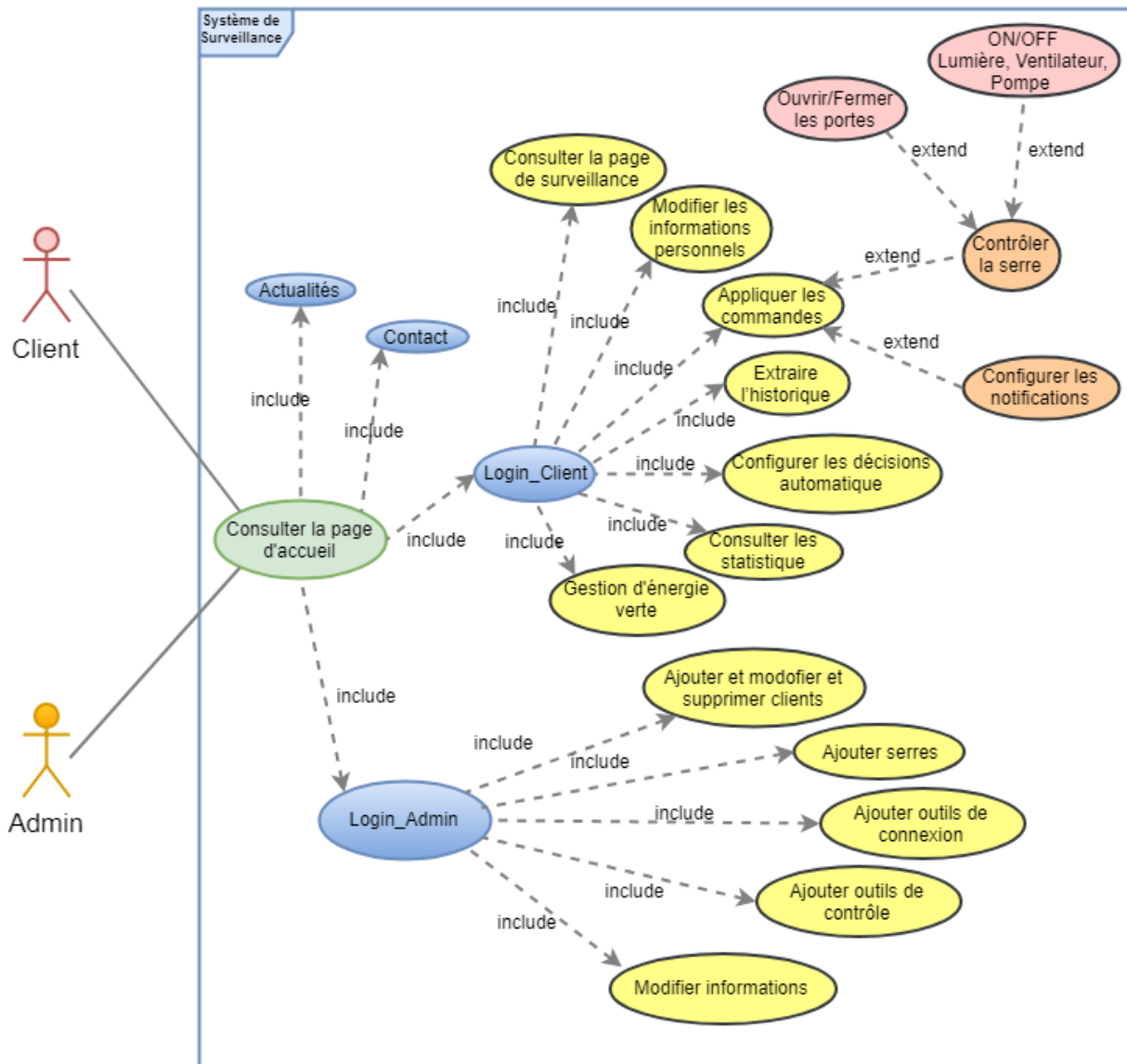


Figure 3.4 : Diagramme de cas d'utilisation

### ✓ Les opérations effectuées par les utilisateurs

#### ○ Par le client

- **Consulter la pages d'accueil** : le client sur cette page peut voir les dernières actualités sur la technologie des serres intelligentes comme il peut contacter l'administrateur s'il y a un problème ou une ambiguïté. Et c'est là où le client peut accéder à son compte.
- **Authentification** : saisir le mail et le mot de passe pour accéder à l'application.
- **Consulter la page de surveillance** : le client peut surveiller ses serres afin de voir les valeurs de temperature, l'humidité, ... etc, et les notifications s'il y a des alertes

plus la webcam pour la sécurité de la serre et enfin des graphes statistiques des derniers valeurs (Temperature, Humidité, Lumière et la batterie).

- **Modifier les informations personnelles** : modifier ses informations personnelles tels que le nom d'utilisateur, l'email, le mot de passe ...etc.
  - **Appliquer les commandes** : le client peut contrôler ses serres en appliquant des commandes comme par exemple allumer ou éteindre la lumière, la pompe, le ventilateur ou ouvrier ou bien fermer les portes. Comme il peut aussi configurer les paramètres des notifications pour le système lance une alerte en cas de dépassement des valeurs préconfigurer.
  - **Extraire l'historique** : extraire l'historique des dernières valeurs enregistrer sous forme d'un fichier PDF.
  - **Configurer les décisions automatiques** : après un contrôle manuel, le client peut contrôler automatiquement le système dans la serre en configurant des paramètres comme lorsque l'irrigation commence ou lorsque les portes sont ouvertes, etc.
  - **Consulter les statistiques** : visualiser les statistiques des derniers états climatiques de la serre sous forme des graphes. Plus la possibilité d'exporter ces graphes sous forme JPEG, PNG, JPG ou PDF.
  - **Gestion d'énergie verte** : le client peut consulter les décisions intelligentes qui devraient être appliquées sur la serre pour optimiser l'énergie et les ressources en eau ...etc.
- **Par l'admin**
- **Consulter la pages d'accueil** : à partir de cette page l'admin peut accéder à son compte pour afin d'avoir accès à ses fonctionnalités.
  - **Ajouter, modifier et supprimer un client** : afficher la liste de client enregistrer et saisir tous les informations requis pour un nouveau compte d'un nouveau client.
  - **Ajouter et affecter**
    - ✓ **Des serres** : ajouter des nouvelles serres en saisissant toutes les informations de la serre tels que la surface, le type de culture ...etc, et les affecter au client spécifique.
    - ✓ **Des outils de connexion** : ajouter les outils nécessaires pour la connexion tels que le modem 4G, le sink ...etc, et les affecter au client spécifique.

- ✓ **Des outils de contrôle** : ajouter les outils de contrôle qui sont les microcontrôleurs (Raspberry Pi, Arduino, ...), les actionneurs (les lampes, les pompes, les ventilateurs, ...) et les capteurs (Temperature, Humidité, Lumière, Sol, ...).

### 3.4.5. Diagramme de séquence

Le diagramme de séquence est utilisé pour montrer l'échange de messages entre le système et les acteurs externes ou entre différentes parties du système, et pour obtenir ainsi une vue des étapes dans un cas d'usage qui montre très clairement la séquence d'interactions. Et pour cela nous avons exploité les diagrammes de séquences d'UML, qui permet de représenter les échanges et les interactions entre l'utilisateur et les objets du système. Nous allons présenter par la suite l'ensemble des diagrammes de séquences dans notre système.

#### 3.4.5.1. Diagramme de séquence du scénario « Authentification »

L'utilisateur saisie son email et le mot de passe, et le système vérifie l'authentification ; si l'email ou le mot de passe incorrecte, alors le système affiche un message d'échec et demande de rentrer les informations correctes. Sinon il passe à la page spécifique. Le scénario est illustré dans la figure 3.5.

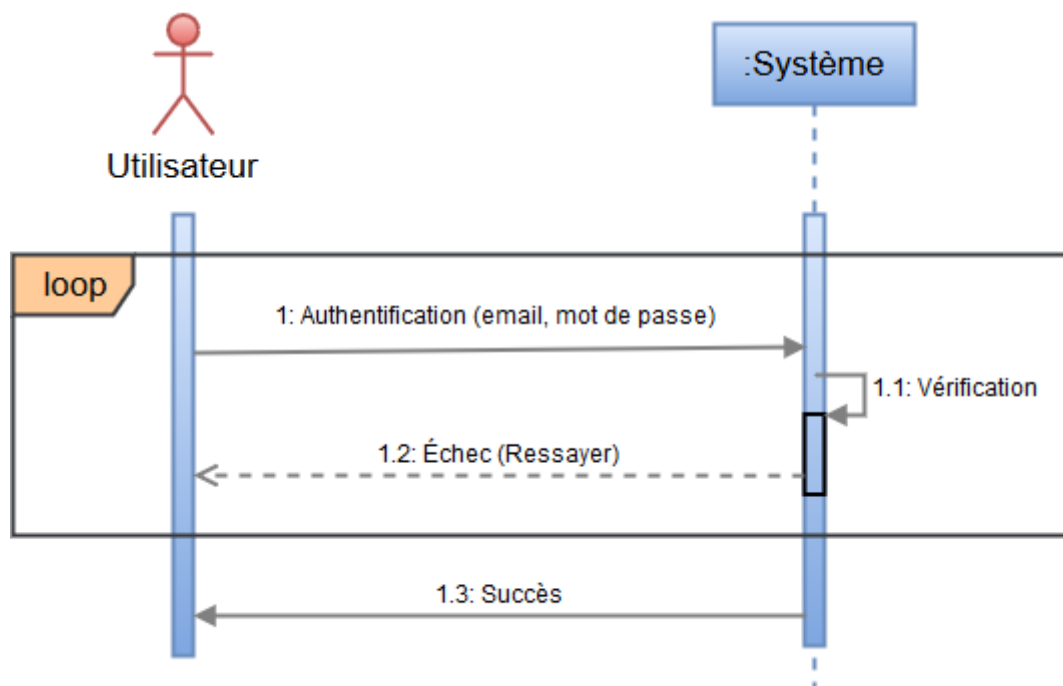


Figure 3.5 : Diagramme de séquence du scénario « Authentification »

### 3.4.5.2. Diagramme de séquence du scénario « Collection d'informations »

La figure 3.6 représente le diagramme qui montre la collection des informations de la serre qui distribue par des capteurs sans fil situés dans la serre, et les envoyés au sink intermédiaire qui lui-même les envoyait au sink principale, et après ce dernier publie ces informations dans le broker où l'abonné va les récupérer et les stocker dans le serveur de bases de données.

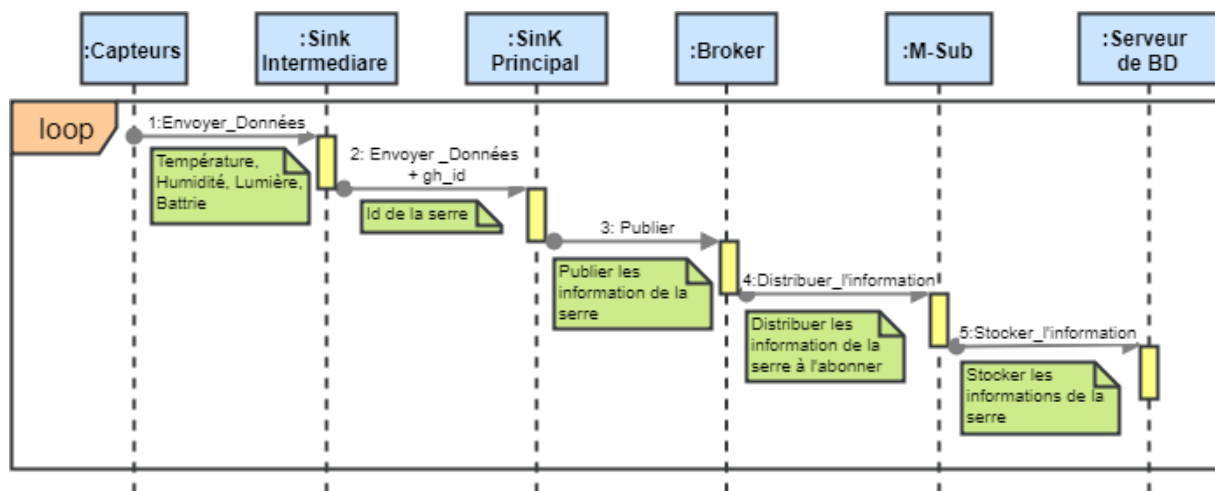


Figure 3.6 : Diagramme de séquence du scénario « Collection d'information en serre »

### 3.4.5.3. Diagramme de séquence du scénario « Contrôle automatique par le serveur de décision automatique »

La figure 3.7 représente le diagramme qui montre la séquence de commande automatique de l'actionneur de la serre par le serveur de décision automatique sans l'intervention du client.

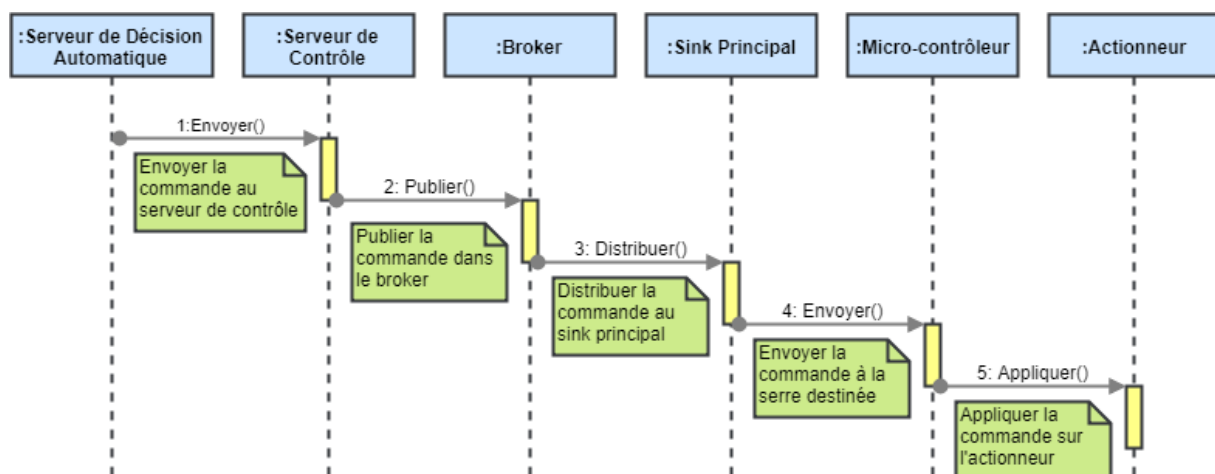


Figure 3.7 : Diagramme de séquence du contrôle automatique par le serveur de décision automatique

### 3.4.5.4. Diagramme de séquence de scénario « Commande manuel »

La figure 3.8 représente le diagramme qui montre la séquence de commande manuelle de l'actionneur de serre qui est faite personnellement par le client.

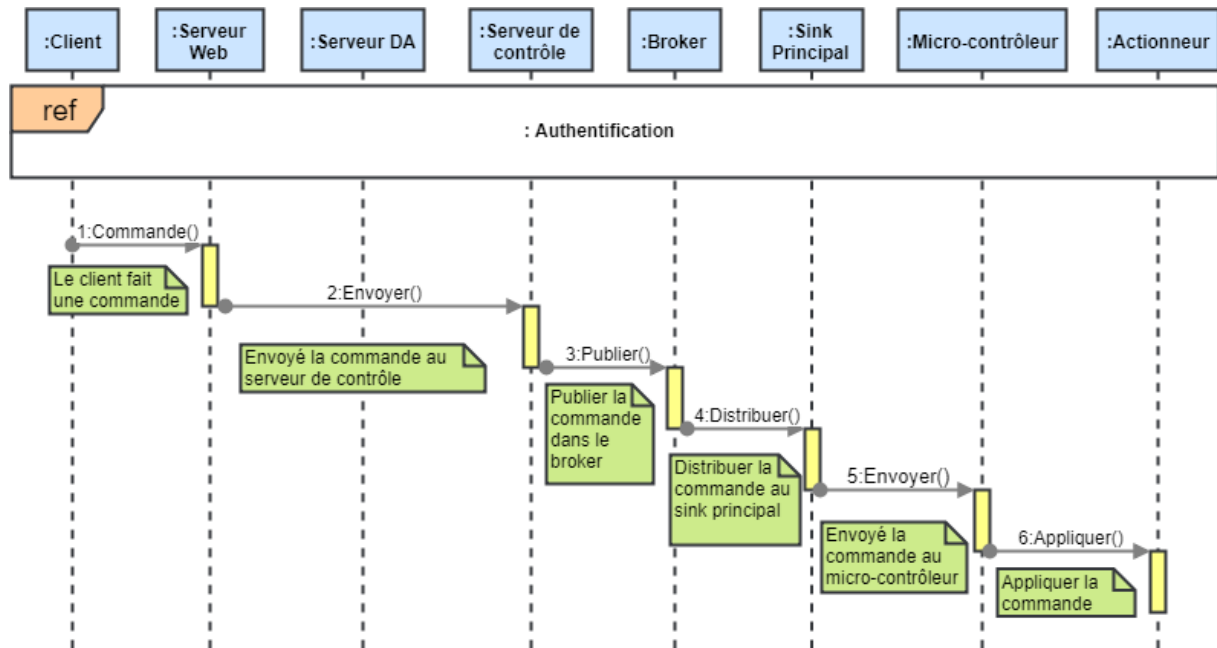


Figure 3.8 : Diagramme de séquence de la commande manuel

### 3.4.5.5. Diagramme de séquence de scénario « Pré-configuration du serveur de décision automatique »

La figure 3.9 représente le diagramme qui montre la pré-configuration du serveur de décision automatique par l'utilisateur via le SaaS.

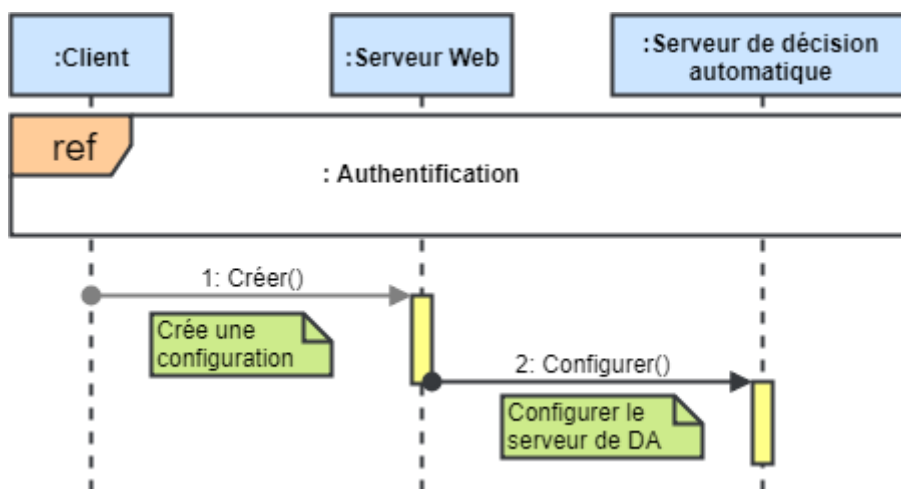


Figure 3.9 : Diagramme de séquence de la pré-configuration du serveur de décision automatique

### 3.4.5.6. Diagramme de séquence de scénario « Configurations de l'admin »

La figure 3.10 représente le diagramme qui montre la séquence d'ajouter les clients, les serres, les outils de connexion et de contrôle, plus une partie de simulation dans laquelle le client saisie les paramètres (Nombre de serres) requis pour l'algorithme génétique qui va faire des calculer et afficher les résultats dans un tableau qui contient les informations des serres, et un autre tableau qui clarifier les décisions intelligentes qui doivent être appliquer pour chaque serre.

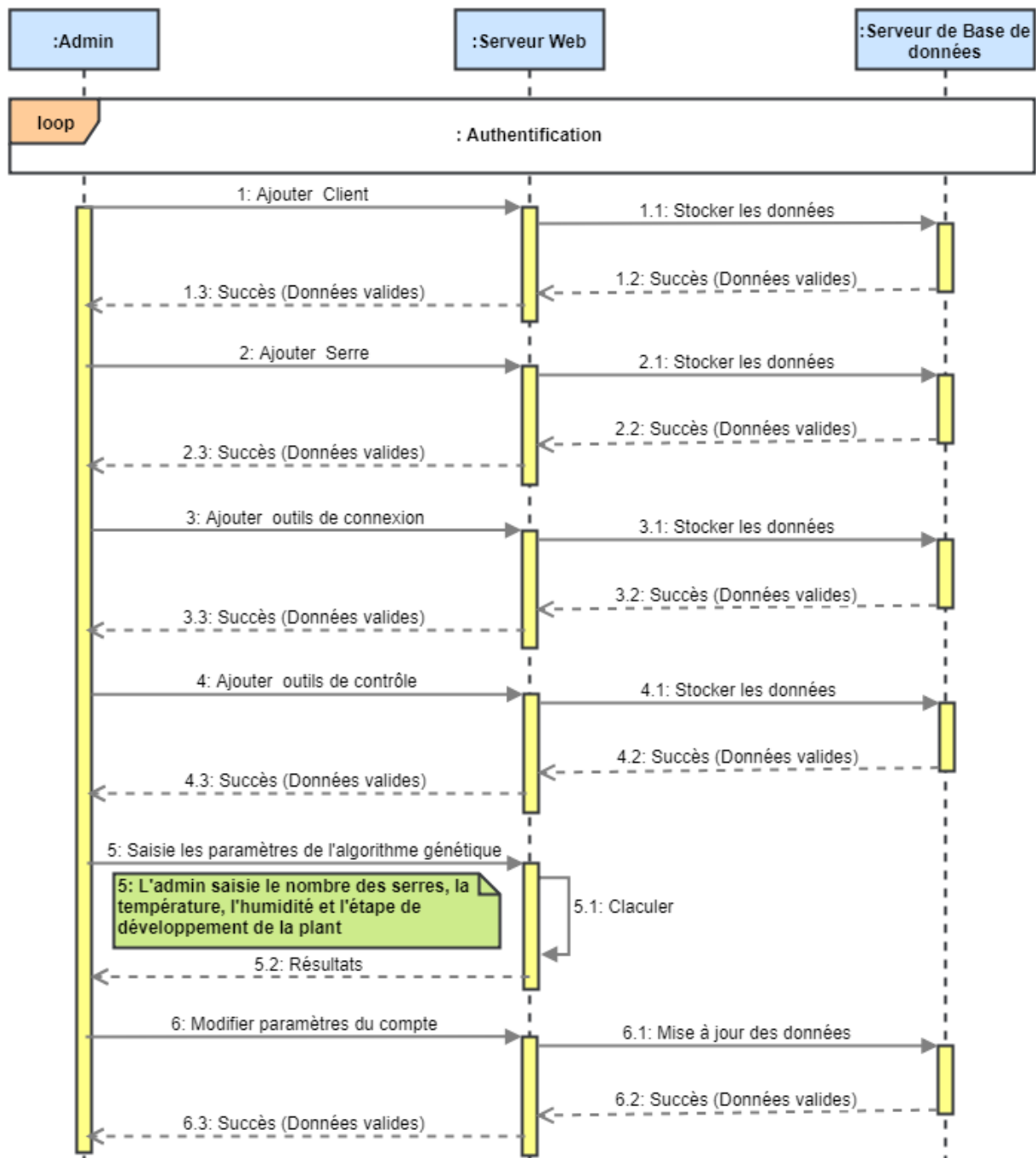


Figure 3.10 : Diagramme de séquence des configurations de l'admin

### 3.4.6. Modèle conceptuel de notre base de données principale

La figure suivante montre le modèle conceptuel de notre base de données principale.

- ✓ Un client peut avoir une ou plusieurs fermes.
- ✓ La ferme peut contenir une ou plusieurs serres, un sink principale et un routeur.
- ✓ Une serre peut avoir plusieurs composants, ceux composant sont soit des entrées (capteurs) ou des sorties (actionneurs), plus les microcontrôleurs.

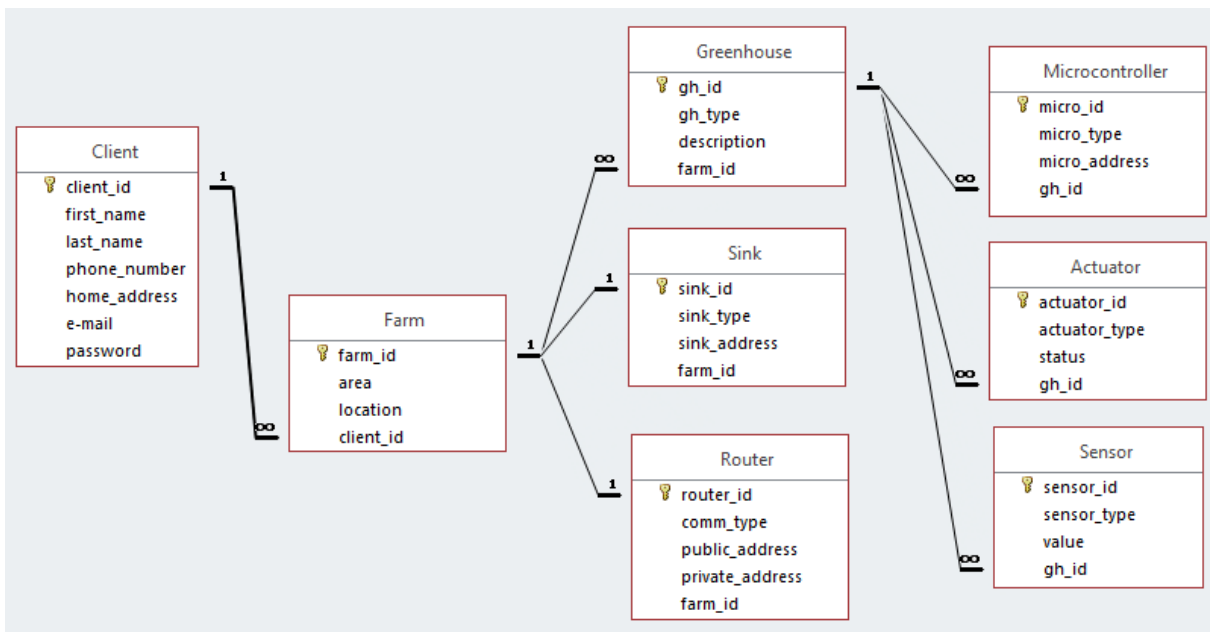


Figure 3.11 : Modèle conceptuel de la base de données principale

## 3.5. Un système intelligent avec l'optimisation d'énergie

### 3.5.1. L'énergie verte

On parle d'énergie verte pour désigner les systèmes de production d'énergie qui rejettent très peu ou pas du tout de gaz à effet de serre, comme le CO<sub>2</sub>. A ce titre, on parle aussi d'énergie « propre ». Il peut s'agir de sources d'énergie renouvelable, autrement dit qui se reconstituent plus vite qu'elles ne sont utilisées : c'est le cas, par exemple, du rayonnement solaire ou de l'énergie éolienne, inépuisables. Mais qui dit propre ne dit pas forcément renouvelable.

Parce qu'elle est plus efficace que les installations traditionnelles, la cogénération produit aussi de l'énergie verte. Mais elle ne peut être considérée comme renouvelable que si le combustible utilisé est lui-même renouvelable. [43]

Panneaux solaires photovoltaïques, chauffe-eau solaire, pompe à chaleur, cogénération ... Les solutions technologiques sont nombreuses pour produire de l'électricité, avoir de l'eau chaude et chauffer ou refroidir une serre à partir de sources d'énergie verte.



### 3.5.2. Algorithmes génétiques et consommation d'énergie

Dans la dernière décennie, les ressources énergétiques distribuées gagnent une grande importance dans le schéma de la production et de la distribution d'énergie à l'échelle mondiale pour des raisons environnementales. Ceci se manifeste à travers la réduction des émissions de gaz à effet de serre, l'amélioration de la qualité d'énergie, la meilleure efficacité du système et la fiabilité du service [44].

La stratégie de gestion d'énergie se résume en une utilisation judicieuse et efficace de l'énergie afin de maximiser les profits (minimiser les coûts) et d'améliorer la position concurrentielle. La gestion de l'énergie nécessite un algorithme précis pour identifier la fonction coût d'exploitation et d'émission en tenant compte de la demande d'énergie du consommateur.

L'algorithme d'optimisation consiste à trouver les entrées adéquates d'une fonction qui minimise ou maximise sa valeur sous contraintes. L'algorithme d'optimisation ne signifie pas nécessairement trouver la solution la mieux adaptée à un problème spécifique, mais également cette solution doit être possible et répondre aux caractéristiques du problème. L'un des algorithmes les plus efficaces est l'algorithme génétique (GA); Ce dernier résout différents types de programmation comme la programmation linéaire et les problèmes quadratiques sous contraintes [44].

L'objectif principal de cette étude est d'optimiser et répartir les puissances dans chaque serre du champ en considérant simultanément le développement naturel de la plante. Le modèle d'optimisation proposé pour la gestion d'énergie est formulé en utilisant les algorithmes génétiques. L'exécution efficace de la méthode proposée et son comportement est illustré et analysé en détail dans la section suivante.

### 3.5.3. Etude de cas

Il y a beaucoup de cultures qui sont cultivées dans les serres et dans cette étude, nous avons choisi le type de tomate. Plus de 90% des tomates sont cultivées sous serre qui assure une croissance idéale à la plante en la préservant des agressions extérieures (intempéries, pollution...). Nous avons collecté les informations nécessaires telles que la température, l'humidité et la quantité d'eau nécessaire à chaque étape du développement de cette plante. Et autres informations sont présentées dans les tableaux ci-dessous.

Comme point de départ le tableau 3.1 à présenter tous les paramètres utilisés tels que les entrées, les actionneurs ... etc. et la sortie ça va être des décisions intelligentes.

**Tableau 3.1 : Les paramètres et les composants**

| Objectifs   | Donnée<br>(Les entrées) | Actionneurs   | Ressources      |
|---|-------------------------|---|-----------------|
| <b>Optimisation<br/>d'irrigation<br/>et d'énergie</b> | T : Temperature         | P : Pompe   | L'énergie verte |
|   | H : Humidité            | V : Ventilateur   | L'eau           |
|   | L : Lumière             | L <sub>p</sub> : Lampe  |                 |
|   | E : Energy totale       | R : Système de refroidissement<br>Ch : Système d'échauffement |                 |

- ***L'influence du climat sur le développement des plantes***

**Remarque :** toutes ces informations sont liées au type de tomate dans une région sèche et aride (Biskra).

- L'humidité élevée (+80%) aide la croissance des feuilles de la plante et réduit la photosynthèse et le taux de transpiration.
- La lumière active le processus d'ouverture des trous et augmente le taux de transpiration [33].
- La température élevée (+25 C°) augmente la vitesse d'ouverture de trous.
- Le tôt matin l'humidité est basse alors que la temperature est élevée, donc l'air est incapable de transporter la vapeur d'eau, mais en après-midi la temperature est élevée et l'humidité basse. Autrement dit, la relation entre eux est inversée.
- L'aération matinal permet de réduire l'humidité de l'aire, et en cas de temperature sec, l'irrigation peut augmenter l'humidité [33].
- Augmenter l'humidité de l'air de 18 % à 30 % permet de diminuer la temperature de 23 C° à 19 C°.
- Si la temperature dépasse 25 C° la serre besoins d'aération de 2 heures jusqu'à 3 heures dans la matinée ou dans la soirée 2 heures avant le coucher du soleil pour éviter les insectes maladies [34].
- La plante de la tomate nécessite 10 heures jusqu'à 14 heures d'éclairage solaire [32].

Les 3 tableaux suivants présenter les conditions et les besoins climatiques et énergétiques pour le bon développement de la plante de la tomate.

**Tableau 3.2 : Les besoins climatiques de la plante de la tomate pendant chaque étape d'évolution [32]**

| Les phases d'évolution             | Température   | Humidité  |
|------------------------------------|---------------|-----------|
| Germination de graines (6-8 jours) | 11 °C – 34 °C | 75% - 85% |
| Croissance des semis               | 18 °C – 32 °C | 75% - 85% |
| Mise à fruits                      | 18 °C – 30 °C | 75% - 85% |
| Développement de la couleur rouge  | 10 °C – 30 °C | 75% - 85% |

**Tableau 3.3 : Les besoins d'eau de la plante de la tomate pendant chaque étape d'évolution [33]**

| Les phases d'évolution             | Eau (chaque 24h)       | Eau (chaque 6h)         |
|------------------------------------|------------------------|-------------------------|
| Germination de graines (6-8 jours) | 500 ml / p / j         | 0.08 l / p / j          |
| Croissance des semis               | 3.3 l / m <sup>2</sup> | 0.55 l / m <sup>2</sup> |
| Mise à fruits                      | 3.3 l / m <sup>2</sup> | 0.55 l / m <sup>2</sup> |
| Développement de la couleur rouge  | 3.3 l / m <sup>2</sup> | 0.55 l / m <sup>2</sup> |

**Tableau 3.4 : L'énergie consommé par les actionneurs**

| Composants    | L'énergie              | Source |
|---------------|------------------------|--------|
| Pompe         | 38.91 kW               | [35]   |
| Ventilateur   | 10.24 kW               | [36]   |
| Lumière       | 0.075 KW               | [37]   |
| Refroidisseur | 0.11 KW/m <sup>2</sup> | [38]   |
| Échauffement  | 0.19 KW/m <sup>2</sup> |        |

- **Hypothèses :**

- ✓ *Débit de la pompe* : 1 min → 0.14 Litre

$$\text{Coût (1 min)} = 38.91/60 = 0.65 \text{ kW/min}$$

- **L'humidex ou indice de confort** : C'est un indice qui est élaboré à partir de la combinaison de l'humidité et de la température : l'humidex permet d'évaluer l'intensité des conditions météorologiques supportées par les gens. Son calcul est assez compliqué avec la formule ci-dessous : [39]

$$H = T + h$$

T : température relevée sous abri normalisé (°C)

h : humidité relative telle que  $h = 0.55 * (e - 10)$

e : tension de vapeur saturante telle que  $e = 6.11 * \exp(5417.7530 * ((1/273.16) - (1/Td)))$

Td : température du point de rosée (°C)

Tableau 3.5 : Typologie des ambiances biothermiques selon l'indice de Thom (Temperature Humidity Index)

| THI (Indice de Thom en C°) | Ambiance          |
|----------------------------|-------------------|
| THI $\geq$ 30              | Torrède           |
| 29.9 à 26.5                | Très chaud        |
| 26.4 à 20.0                | Chaud             |
| 19.9 à 15.0                | Confortable       |
| 14.9 à 13                  | Frais             |
| 12.9 à -1.7                | Froid             |
| -1.8 à -9.9                | Très froid        |
| THI $\leq$ -10             | Extrêmement froid |

### 3.6. L'algorithme génétique

La résolution d'un problème d'optimisation consiste à explorer un espace de recherche afin de maximiser (ou minimiser) une fonction donnée. Les complexités (en taille ou en structure) relatives de l'espace de recherche et de la fonction à maximiser conduisent à utiliser des méthodes de résolutions radicalement différentes. En première approximation, on peut dire qu'une méthode déterministe est adaptée à un espace de recherche petit et complexe et qu'un espace de recherche grand nécessite plutôt une méthode de recherche stochastique (recuit simulé, algorithme génétique, ...) [28].

Dans la plupart des cas, un problème d'optimisation se divise naturellement en deux phases: recherche des solutions admissibles puis recherche de la solution à coût optimal parmi ces dernières. Suivant la méthode employée, ce découpage est plus ou moins apparent dans la résolution [28].

#### 3.6.1. Le fonctionnement des algorithmes génétiques

Comme dans les systèmes biologiques soumis à des contraintes, les meilleurs individus de la population sont ceux qui ont une meilleure chance de se reproduire et de transmettre une partie de leur héritage génétique à la prochaine génération. Une nouvelle population, ou génération, est alors créée en combinant les gènes des parents. On s'attend à ce que certains individus de la nouvelle génération possèdent les meilleures caractéristiques de leurs deux parents, et donc qu'ils seront meilleurs et seront une meilleure solution au problème. Le nouveau groupe (la nouvelle génération) est alors soumis aux mêmes critères de sélection, et par après génère ses propres rejetons. Ce processus est répété plusieurs fois, jusqu'à ce que tous les

individus possèdent le même héritage génétique comme illustré dans la figure 3.12. Les membres de cette dernière génération, qui sont habituellement très différents de leurs ancêtres, possèdent de l'information génétique qui correspond à la meilleure solution au problème.

L'algorithme génétique qui a été développé par Holland [29] est de base comporte trois opérations simples qui ne sont pas plus compliquées que des opérations algébriques :

- Sélection
- Croisement
- Mutation

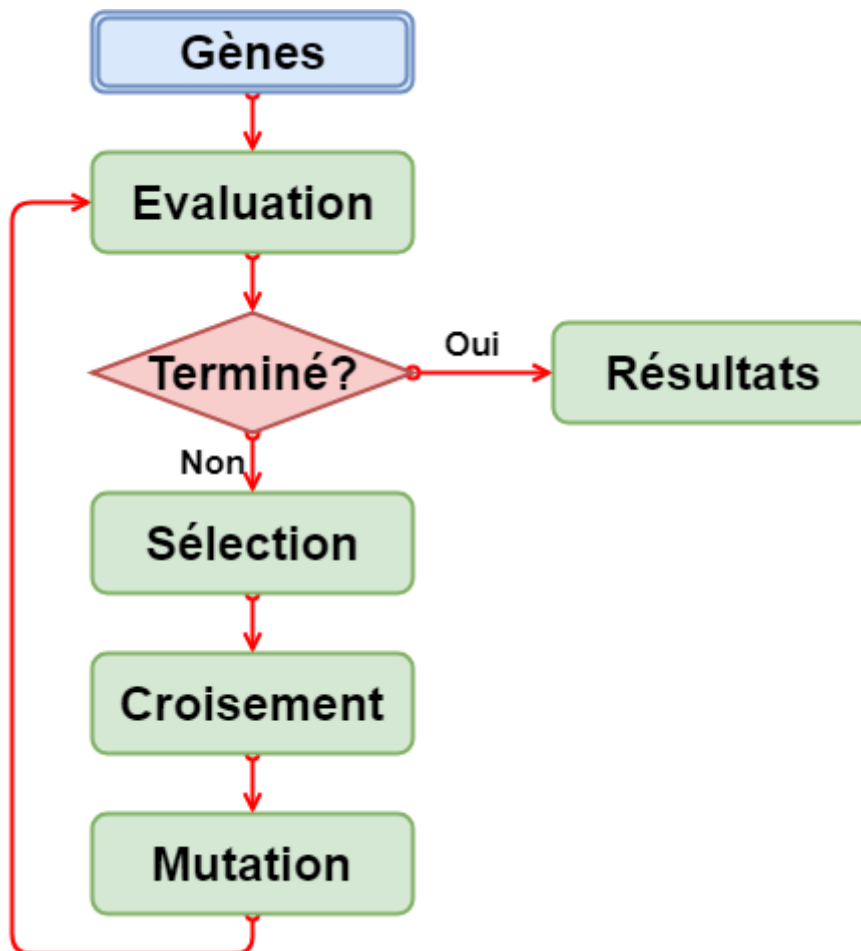


Figure 3.12 : Principe général des algorithmes génétiques adapté de [29]

### 3.6.2. L'application de l'algorithme génétiques

Nous utilisons les algorithmes génétiques, pour atteindre à une gestion intelligente de l'énergie verte et l'irrigation dans les serres connectées. Donc l'objectif c'est l'optimisation de la consommation d'énergie en prenant en considération le développement naturel de la plante. Dans cette partie nous allons présenter l'adaptation de l'algorithme génétique à ce problème en suivant ces étapes jusqu'à atteindre la solution.

L'optimisation consiste à rechercher la meilleure solution d'un problème au sens d'un ou de plusieurs critères choisis en respectant les caractéristiques du système et les contraintes qui lui sont imposées. Les AGs utilisés pour résoudre les problèmes d'optimisation nécessitent le codage de l'ensemble des paramètres d'origine du problème à optimiser en une chaîne de caractères d'alphabet, de longueur finie. Ils n'utilisent que les valeurs de la fonction étudiée et pas celles de sa dérivée ou de toute autre fonction. Enfin, ils utilisent des règles de transition probabilistes et non déterministes [30].

### 3.6.2.1. Le codage d'individus

La procédure normale pour coder un algorithme génétique ayant plusieurs paramètres est de coder chaque paramètre comme une séquence de bits. Les séquences sont ensuite tronquées l'une après l'autre pour former une grande séquence, le chromosome, qui représente le vecteur des paramètres et l'ensemble chromosomes c'est la population initiale. Chaque séquence du vecteur total représente un gène, et la valeur de chaque gène est un allèle.

Nous fixons la taille de la population à  $N = 10$ . Nous tirons donc de façon aléatoire 10 chromosome sachant qu'un chromosome est composé de 5 bits et que chaque bit dispose d'une probabilité 0/1/2/3/4/5/6 d'avoir une valeur 0 jusqu'à 6. Et ces 5 bits représente respectivement la durée d'exécution des actionneurs (la pompe, le ventilateur, la lumière, le système de refroidissement, le système d'échauffement), dont l'unité de temps est de 10 minutes c'est-à-dire 1 = 10 minutes, 2 = 20 minutes et ainsi de suite. La séquence totale serait la suivante :

**10510, 62413, ..., 26010**

Un chiffre codé en binaire dans ce cas ne représente pas une valeur spécifique mais plutôt un état la durée d'exécution. Par exemple, si on code des valeurs de 0 à 6 à l'aide de 5 bits, le chiffre 12010 représente indique que : la pompe : ON pendant 10 minutes, le ventilateur : ON pendant 20 minutes, la lumière : OFF, le système de refroidissement : ON pendant 10 minutes, le système d'échauffement : OFF.

- **Contraintes de validation d'individus**

- On ne peut pas voir le système de refroidissement et le système d'échauffement fonctionne en même temps, donc l'un de ces bits doit être 0.
- On ne peut pas voir aussi le système d'échauffement et la ventilateur fonctionnent en même temps donc l'un de ces bits aussi doit être 0.

### 3.6.2.2. La sélection

La sélection est un processus dans lequel des individus d'une population sont choisis selon les valeurs de leur fonction coût ou « fitness » pour former une nouvelle population. Les individus évoluent par des itérations successives de la sélection, appelées générations. Chaque individu est sélectionné proportionnellement à sa fonction « fitness », donc, un individu avec une fonction « fitness » plus élevée aura plus de chance d'être sélectionné qu'un autre avec une valeur de « fitness » inférieure. Cette fonction peut être envisagée comme une mesure de profit ou de qualité qu'on souhaite maximiser ou minimiser [30].

La fonction de fitness permet d'évaluer le degré d'adaptation de chaque individu à son environnement, elle donnera une valeur reflétant sa qualité pour résoudre le problème posé. Dans notre cas la fonction fitness sera la somme d'énergie consommée par les cinq actionneurs qu'on a déjà cités, et la meilleure solution sera l'individu qui possède la petite valeur de fitness dans la population (Minimisation). On définit l'ensemble des concepts suivants :

**Min** : Minimisation

**f** : Fonction objectifs

$$\text{Min} : f = \sum_{i \in D} ( \sum_{t \in T} t * p_i ) * C_E$$

- **i** : Dispositif
- **t** : Temps
- **D** : L'ensemble des dispositifs
- **T** : L'ensembles de temps
- **p<sub>i</sub>** : Le puissance nominal du dispositifs i
- **C<sub>E</sub>** : Le coût d'énergie

Une nouvelle population va être créée à partir de l'ancienne par le processus de sélection. La nouvelle population est décrite dans le tableau 3.5.

Tableau 3.6 : Nouvelle population

| Numéro       | Séquence | Fitness | % du total |
|--------------|----------|---------|------------|
| 1            | 20505    | 14.07   | 13.48      |
| 2            | 24550    | 19.91   | 19.58      |
| 3            | 60203    | 39.04   | 38.40      |
| 4            | 00406    | 1.28    | 1.26       |
| 5            | 41120    | 27.36   | 26.92      |
| <b>Total</b> |          | 101.66  | 100        |

### 3.6.2.3. L'opération de croisement

Processus où de nouveaux individus sont formés à partir de parents. Ces nouveaux individus, les rejetons, sont formés en effectuant un croisement entre deux parents. On choisit une position aléatoire  $k$  entre  $[1; h-1]$  où  $h$  est la longueur de l'individu. Le croisement se fait en échangeant les bits de la position  $k + 1$  à  $h$ .

Par exemple : Soit  $k = 4$  pour deux parents (P1 et P2) codés à 5 bits (donc  $h = 5$ ). Les rejetons sont O1 et O2.

$$\begin{array}{ll} P1 = 2010|5 & O1 = 20100 \\ P2 = 1410|0 & O2 = 14105 \end{array}$$

On voit bien l'échange qui s'est produit ici, le bit 5 ( $k + 1$ ) a passé d'un individu à l'autre, pour ainsi former deux nouveaux individus (O1 and O2).

Ce sont ces deux opérations, la sélection et la reproduction, qui sont à la base des algorithmes génétiques. Ceci peut paraître simple à première vue, puisque aucune opération mathématique complexe n'a été effectuée. Mais on peut comparer le processus précédent à l'innovation humaine : souvent, les découvertes n'arrivent pas par chance. Elles sont le résultat d'un échange d'idées qui crée d'autres idées et finalement mènent à une solution d'attente [31].

### 3.6.2.4. L'opération de mutation

Processus aléatoire où un bit change de valeur. Ce processus joue un rôle secondaire dans l'algorithme génétique, mais il est quand même important. La mutation assure qu'aucun point dans l'espace de recherche a une probabilité nulle d'être atteint. Exemple : mutation du bit 2.

$$A1 = 01520 \rightarrow A'1 = 05120$$

Une explication plus complète de ces phénomènes ainsi qu'une preuve théorique de leur performance sont disponibles dans le livre de Goldberg [31].

### 3.6.2.5. Remplacement

Dans cette phase on fait la création d'une nouvelle population par l'évaluation de la population des parents et des enfants, de façon qu'on remplace les mauvais individus trouvés dans la population parent par les meilleurs de la population enfant, pour garder la taille de la population initiale.



### 3.6.2.6. Critère d'arrêt

Comme tous les algorithmes itératifs il faut définir le critère d'arrêt. On répète les opérations génétiques tant qu'un nombre de génération déterminé n'est pas atteint, ou tant que l'algorithme ne converge pas vers un individu optimal. Dans notre cas, nous avons choisi comme critère d'arrêt le nombre de génération jusqu'à atteindre une solution admissible.

## 3.7. Conclusion

Nous avons présenté une nouvelle solution pour la mise en œuvre des serres intelligentes et connectées en utilisant les technologies de l'internet des objets (IoT) et le Cloud Computing, et cette solution inclut la surveillance des serres à distance, prise de décision automatique et intelligente, gestion d'énergie verte ...etc.

Dans ce chapitre, nous avons mis quelques diagrammes pour clarifier plus le fonctionnement du système, nous avons vu au début une architecture détaillée de notre système de surveillance des serres basé sur l'IoT, et nous avons présenté chacun de ses composants et la relation entre eux, et également nous avons aussi présenté un schéma électronique qui explique le fonctionnement électrique dans la serre.

*Chapitre 04*

***Implémentation  
du système***

# Chapitre 04

## Implémentation du système

### 4.1. Introduction

Dans le troisième chapitre, nous avons expliqué la partie conception de notre système qui est composé de deux côté, le côté client qui représente les serres surveillées et le côté fournisseur qui représente les six composants qui sont situés dans le cloud où les applications sont hébergées par le fournisseur de services (SaaS).

Dans ce chapitre nous décrivons les étapes que nous avons suivies pour développer et réaliser notre solution IoT. Dans un premier temps, nous présenterons de brèves définitions les outils de développement utilisés dans la mise en œuvre de notre système tels que le langage de programmation utilisé et les outils de développement, et en deuxième lieu nous présenterons les équipements électroniques utilisé pour le déploiement de la solution, et également on a cité les pseudo-algorithme principaux déployer dans les différents composants du système.

### 4.2. Langage de programmation python™

Il existe un grand nombre de langages de programmation et Python en fait partie. Python est un langage de programmation, dont la première version est sortie en 1991. Créé par *Guido van Rossum*, il a voyagé du Macintosh de son créateur, qui travaillait à cette époque au *Centrum voor Wiskunde en Informatica* aux Pays-Bas, jusqu'à se voir associer une organisation à but non lucratif particulièrement dévouée, la *Python Software Foundation*, créée en 2001. Ce langage a été baptisé ainsi en hommage à la troupe de comiques les « Monty Python » [40].

- **À quoi peut servir Python ?**

Python est un langage puissant, à la fois facile à apprendre et riche en possibilités. Dès l'instant où vous l'installez sur votre ordinateur, vous disposez de nombreuses fonctionnalités intégrées au langage.

Il est, en outre, très facile d'étendre les fonctionnalités existantes, comme nous allons le voir. Ainsi, il existe ce qu'on appelle des bibliothèques qui aident le développeur à travailler sur

des projets particuliers. Plusieurs bibliothèques peuvent ainsi être installées pour, par exemple, développer des interfaces graphiques en Python [40].

- **Concrètement, voilà ce qu'on peut faire avec Python**
  - ✓ De petits programmes très simples, appelés scripts, chargés d'une mission très précise sur votre ordinateur.
  - ✓ Des programmes complets, comme des jeux, des suites bureautiques, des logiciels multimédias, des clients de messagerie...
  - ✓ Des projets très complexes, comme des progiciels (ensemble de plusieurs logiciels pouvant fonctionner ensemble, principalement utilisés dans le monde professionnel).
- **Voici quelques-unes des fonctionnalités offertes par Python et ses bibliothèques**
  - ✓ Créer des interfaces graphiques.
  - ✓ Faire circuler des informations au travers d'un réseau.
  - ✓ Dialoguer d'une façon avancée avec votre système d'exploitation.

### 4.3. Les outils et les frameworks de développement

Dans cette section, nous présenterons les outils et les frameworks utilisés dans la mise en œuvre de notre projet.

#### 4.3.1. Paho-MQTT

Afin de rendre les données des capteurs de serre disponibles sur Internet, et donc permettre aux applications tierces (mobiles, web, etc.) de consommer ces données, nous utiliserons le protocole MQTT.

MQTT est un protocole de messagerie léger basé sur le modèle publication / abonnement. Un broker central fédère les clients MQTT qui publient des messages sur des topics spécifiques, permettant aux autres clients abonnés à ces sujets de recevoir immédiatement ces messages. [iot.eclipse.org]



### 4.3.2. Broker Mosquitto

Eclipse Mosquitto est un courtier de messages open source (sous licence EPL / EDL) qui implémente les versions 3.1 et 3.1.1 du protocole MQTT. Mosquitto est léger et peut être utilisé sur tous les appareils, des ordinateurs monocarte basse consommation aux serveurs complets.

Le protocole MQTT fournit une méthode légère d'exécution de la messagerie à l'aide d'un modèle de publication / abonnement. Cela le rend approprié pour la messagerie de l'Internet des objets, par exemple avec des capteurs de faible puissance ou des appareils mobiles tels que des téléphones, des ordinateurs embarqués ou des microcontrôleurs. [mosquitto.org]

Le projet Mosquitto fournit également une bibliothèque C pour la mise en œuvre des clients MQTT, ainsi que les très populaires client MQTT mosquitto\_pub et mosquitto\_sub.



### 4.3.3. Web.py Python Web Framework

web.py est un framework web pour Python aussi simple que puissant. web.py est dans le domaine public; vous pouvez l'utiliser pour n'importe quel but avec absolument aucune restriction.

web.py a été publié à l'origine, tandis qu'Aaron Swartz travaillait sur reddit.com, où le site l'utilisait à mesure qu'il devenait l'un des 1000 meilleurs sites selon Alexa et servait des millions de pages vues par jour. "C'est le framework anti-framework. web.py ne vous gêne pas », explique le fondateur Steve Huffman. [webpy.org]



### 4.3.4. Le framework Django

Django est un framework Web Python de haut niveau qui encourage un développement rapide et un design propre et pragmatique. Construit par des développeurs expérimentés, il prend en charge une grande partie des tracas du développement Web, de sorte que vous pouvez vous concentrer sur l'écriture de votre application sans avoir besoin de réinventer la roue. C'est gratuit et open source. [djangoproject.com]



### 4.3.5. Python Dataset

Bien que la gestion des données dans une base de données relationnelle présente de nombreux avantages, elles sont rarement utilisées dans le travail quotidien avec des ensembles de données de petite et moyenne échelle. Mais pourquoi est-ce? Pourquoi voyons-nous énormément de données stockées dans des fichiers statiques au format CSV ou JSON, même si elles sont difficiles à interroger et à mettre à jour de façon incrémentielle?

La réponse est que les programmeurs sont paresseux, et donc ils ont tendance à préférer la solution la plus facile qu'ils trouvent. Et en Python, une base de données n'est pas la solution la plus simple pour stocker un tas de données structurées. C'est ce que dataset va changer!

Dataset fournit une couche d'abstraction simple qui supprime la plupart des instructions SQL directes sans la nécessité d'un modèle ORM complet - essentiellement, les bases de données peuvent être utilisées comme un fichier JSON ou un magasin NoSQL. [dataset.readthedocs.io]

### 4.3.6. PyCharm

PyCharm est un environnement de développement intégré (IDE (Integrated Development Environment)) utilisé pour programmer en Python. Il offre l'analyse de code, un débogueur graphique, la gestion des tests unitaires, l'intégration de logiciel de gestion de versions, et supporte le développement web avec Django. Il est développé par l'entreprise tchèque JetBrains. Il est multi-plateforme et fonctionne sous Windows, Mac OS X et Linux. [jetbrains.com]



## 4.4. Les équipements électroniques

Dans cette section, nous allons décrire les appareils électroniques utilisés dans notre projet, nous allons donner également les caractéristiques de ces appareils.

### 4.4.1. Raspberry Pi

Le Raspberry Pi est un petit ordinateur qui peut faire beaucoup de choses. Vous le branchez sur un moniteur et y attachez un clavier et une souris, inspirés du 1981 BBC Micro. L'objectif du créateur Eben Upton était de créer un appareil à faible coût qui améliorerait les compétences en programmation et la compréhension du matériel au niveau pré-universitaire.

Il a été rapidement adopté par les bricoleurs, les fabricants et les passionnés d'électronique pour les projets qui nécessitent plus qu'un simple microcontrôleur (comme les périphériques Arduino).

Le Raspberry Pi est plus lent qu'un ordinateur portable ou un ordinateur de bureau moderne, mais il est toujours un ordinateur Linux complet et peut fournir toutes les capacités que cela implique, à un faible niveau de consommation d'énergie. [raspberrypi.org]

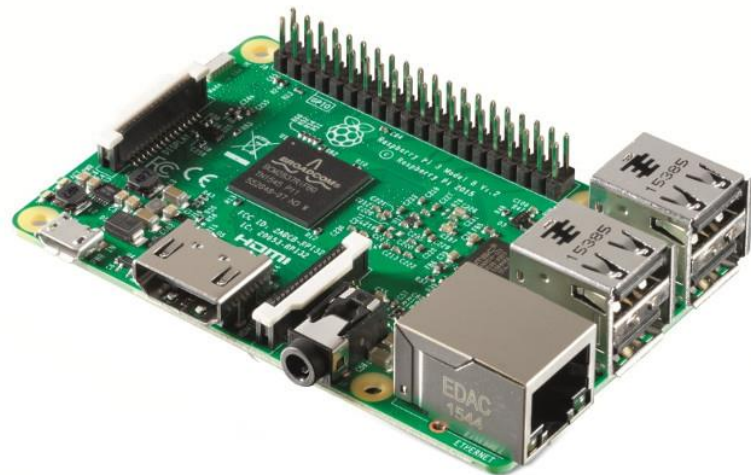
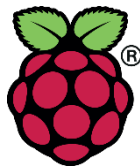


Figure 4.1: Raspberry Pi 3 Model B

- **Les caractéristiques de ce modèle de Raspberry Pi**
  - CPU:** 4× ARM Cortex-A53, 1.2GHz
  - GPU:** Broadcom VideoCore IV
  - RAM:** 1GB LPDDR2 (900 MHz)
  - Networking:** 10/100 Ethernet, 2.4GHz 802.11n wireless
  - Bluetooth:** Bluetooth 4.1 Classic, Bluetooth Low Energy
  - Storage:** microSD
  - GPIO:** 40-pin header, populated
  - Ports:** HDMI, 3.5mm analogue audio-video jack, 4× USB 2.0, Ethernet, Camera Serial Interface (CSI), Display Serial Interface (DSI)
- **Raspbian:** Raspbian est le système d'exploitation officiel de Raspberry Pi basé sur debian linux. Il est livré avec deux versions Raspbian Jessie avec PIXEL et Raspbian Jessie Lite. Dans notre projet, nous avons utilisé la version allégée car nous n'avons pas besoin de bureau graphique puisque Raspberry Pi sera utilisé en tant que micro-contrôleur. [raspberrypi.org]

#### 4.4.2. Capteur AS-XM1000 802.15.4 Mote

Module AS-XM1000 802.15.4 est la nouvelle génération de modules mote, basée sur les spécifications techniques "TelosB", avec des capteurs 116Kb-EEPROM et 8Kb-RAM améliorés et des capteurs de température, d'humidité et de lumière intégrés. [advanticsys.com]

- **Les caractéristiques de ce modèle de capteur**

- ✓ IEEE 802.15.4 WSN entièrement compatible avec la plate-forme TelosB
- ✓ Microcontrôleur TI MSP430F2618, CC2420 RF
- ✓ Compatible avec TinyOS 2.x et ContikiOS 3.0
- ✓ Température, humidité, capteurs de lumière
- ✓ Utilisateur et boutons de réinitialisation
- ✓ 3Leds
- ✓ Interface USB
- ✓ 2xAA piles incluses

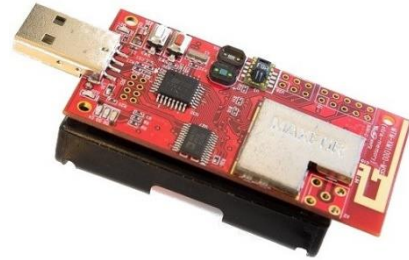


Figure 4.2 : Capteur de température, humidité et la lumière AS-XM1000 802.15.4 Mote

#### 4.4.3. Le sink SG1000

Le SG1000 est un périphérique de passerelle Ethernet 802.15.4 qui sert de concentrateur de données pour votre réseau de capteurs sans fil. L'architecture robuste est capable de gérer les données d'un grand nombre de nœuds de capteurs sans fil, étant la seule limite de la mémoire physique du système. De plus, la base de données embarquée permet le stockage local de ces données, permettant l'accès à ces enregistrements par des applications externes grâce à l'interface Ethernet configurable. [advanticsys.com]

- **Les caractéristiques de ce périphérique**

- ✓ Pont Ethernet 2,4 GHz IEEE 802.15.4
- ✓ 802.15.4 passerelle de capteur sans fil compatible avec TinyOS.
- ✓ Capacité de reprogrammation d'image de nœud de puits.
- ✓ 3 ports USB utilisables en tant que banc d'essai WSN et reprogrammation de nœud.
- ✓ Base de données interne pour stocker les données brutes des capteurs.
- ✓ Interface Web compréhensible.



Figure 4.3 : Le sink SG-1000



#### 4.4.4. Relai 8 Canaux

Ce module 8 relais prévoit toutes les fonctionnalités nécessaires à une mise en œuvre rapide mais surtout huit relais capables de supporter 10A sous 250V alternatif. Tel qu'il est conçu, il fonctionne avec des systèmes en logique 3.3v et 5V (donc Arduino, Raspberry, Micropython, etc) [41].

Ce que nous apprécions le plus, c'est la protection offerte par les Optocoupleurs et la possibilité de dissocier le circuit d'alimentation des relais (JD-VSS) de celle de la logique de commande (VCC)... il suffit en effet de retirer le cavalier JD-VSS et d'alimenter les relais 5V par l'intermédiaire de la broche JD-VCC.

Pratique, il offrira une isolation galvanique (le circuit haute-tension n'est jamais en contact avec le circuit de commande) ainsi qu'une protection pour votre circuit de commande électronique (en cas de court-circuit, votre microcontrôleur est protégé électriquement) [41].



Figure 4.4 : Un relai de 8 canaux

- **Quelques caractéristiques de ce module**
  - ✓ Module compacte.
  - ✓ LED indicatrices de l'état des relais.
  - ✓ Utilisation de diode en roue libre pour éviter les effets transitoires des bobines.
  - ✓ Chaque relais activé consomme 63mA sur l'alimentation (VCC).
  - ✓ Courant d'activation par broche de commande.
  - ✓ Avec une alimentation relais VCC=5V
    - VCC = 5 Volts => courant d'activation = 2.0 mA (par retour à la masse).
    - VCC = 3.3 Volts => courant d'activation = 0.5 mA (par retour à la masse).
  - ✓ Dimensions: 138 x 56mm (hauteur: 18mm).

## 4.5. Les algorithmes principaux du système

### 4.5.1. Pseudo algorithmes du côté client

Du côté client, il y a 4 Script Principal que nous allons expliquer dans les Pseudo-Algorithmes suivants qui sont exécutés dans chaque Raspberry Pi et les 2 autres sont localisés et exécutés par le Sink Principal.

#### 4.5.1.1. Pseudo algorithme du Sink Intermédiaire (Raspberry Pi)

Comme mentionné précédemment, nous avons deux scripts qui s'exécutent dans notre Sink intermédiaire. Le pseudo-algorithme suivant représente le script qui rassemble les informations des capteurs sans fil dans la même serre.

- *Rôle 1 du Raspberry Pi*

**Tant Que** *En courant faire*

```

| données ← recevoir_depuis_les_capteurs();
| envoyer_au_sink_principal (données, id_serre);

```

**Fin**

**Algorithme 1:** Pseudo-algorithme du Sink Intermédiaire (Collecter les informations)

Le deuxième pseudo-algorithme représente le script qui s'exécute dans notre Raspberry Pi qui reçoit des commandes du Sink Principal pour les exécuter (actionneurs de contrôle)

- *Rôle 2 du Raspberry Pi*

**Tant Que** *En courant faire*

```

| commandes ← recevoir_des_commandes_de_la_part_de_sink_principal ();
| action ← sélectionnez_l'action (commandes);
| exécuter_des_actionneurs (action);

```

**Fin**

**Algorithme 2 :** Pseudo-algorithme du Sink Intermédiaire (Exécution de commandes)

#### 4.5.1.2. Pseudo-algorithme de Sink Principal

Le Sink Principal a également 2 scripts, le premier collecte les informations de chaque Sink Intermédiaire et les publie, et l'autre reçoit des commandes du système de GHs et les envoient au Sink Intermédiaire destination. Le pseudo-algorithme ci-dessous représentent le premier script qui collecte et publier des informations.

- **Rôle 1 du Sink Principal**

**Tant Que** *En courant faire*

```

info ← recevoir_de_sink_intermédiaire ();
topic ← générer_un_topic (info.id_serre);
msg = info.données;
MQTT.publier (topic, msg, adresse_réseau_du_broker);

```

**Fin**

**Algorithme 3** : Pseudo-algorithme du Sink Principal (Publier informations)

Le deuxième pseudo-algorithme du Principal Sink représente le script qui reçoit des commandes de système GHs et les envoyés au Sink Intermédiaire Destiné, Voir le pseudo-algorithme ci-dessous.

- **Rôle 2 du Sink Principal**

**Tant Que** *En courant faire*

```

info ← MQTT.abonner (adresse_réseau_du_broker, commandes_de_topic_préfix );
id_serre ← get_id (info.topic);
commandes ← info.données;
adresse_de_sink_intermédiaire ← get_address (id_serre);
envoyer_à_sink_intermédiaire (adresse_de_sink_intermédiaire, commandes);

```

**Fin**

**Algorithme 4** : Pseudo-algorithme du Sink Principal (Abonné commandes)

**Remarque:** topic\_préfix signifie tous les topics qui commence par le même préfixe. Dans ce cas, le sink peut être abonné à tous les topics avec des commandes de catégorie, après cela il peut différencier les topics destinés pour chaque serre.

#### 4.5.2. Pseudo algorithme du côté fournisseur (Composants du système)

Dans notre système de serres hébergé dans le cloud, nous avons 6 composants:

- 1) Broker.
- 2) Serveur d'abonnement maître (MSub Server).
- 3) Serveur de décision automatique (AD Server).
- 4) Serveur Web (WebServer).
- 5) Serveur de contrôle (Ctrl Server).
- 6) Serveur de bases de données (DBs Server)

Du côté fournisseur, il y a 3 script principal que nous allons expliquer dans les Pseudo-Algorithmes suivants qui sont exécutés dans le cloud.

#### 4.5.2.1. Serveur d'abonnement maître (MSub Server)

Le serveur d'abonnement maître est un client abonné MQTT qui s'abonne à tous les messages de données publiés par le Sink Principal et distribués via le broker, chaque fois que le serveur d'abonnement maître reçoit des données, il les stocke sur le serveur de bases de données. Le pseudo-algorithme suivant montre le fonctionnement général du script de l'abonné maître:

**Tant Que** *En courant faire*

```

msg ← MQTT.abonner (adresse_réseau_du_broker, commandes_de_topic_préfix );
topic ← msg.topic;
données ← msg.données;
stocker_des_données_dans_le_serveur_de_DBs (topic, données);

```

**Fin**

**Algorithme 5** : Pseudo-algorithme du l'abonné maître

#### 4.5.2.2. Serveur de Contrôle (Ctrl Server)

Ce serveur reçoit les deux commandes envoyées par l'utilisateur via le serveur Web (Contrôle Manuelle) et les commandes automatiques envoyées par le serveur de décision automatique (préconfiguré par l'utilisateur) après que le serveur de contrôle publie les commandes par le broker au Sink Principal, ce dernier renvoie-les au Sink Intermédiaire destiné (qui est en même temps le micro-contrôleur). Le pseudo-algorithme suivant montre le fonctionnement du serveur de contrôle:

**Tant Que** *En courant faire*

```

info ← commande_de_réception ();
topic ← info.topic;
commande ← info.commande;
MQTT.pUBLIER (topic, données, adresse_réseau_du_broker);

```

**Fin**

**Algorithme 6** : Pseudo-algorithme du serveur de contrôle

### 4.5.2.3. Serveur de décision automatique (AD Server)

Ce composant est responsable de prendre des décisions automatiques régulièrement sans avoir besoin de l'intervention de l'utilisateur. Son rôle est de minimiser le besoin d'action répétitive de l'utilisateur et peut être configuré pour satisfaire les meilleures conditions pour les récoltes en gardant le meilleur degré de température ou donner la bonne quantité d'eau.

Le pseudo-algorithme suivant présente le fonctionnement du serveur de décision automatique:

#### **Tant Que** *Activé* **faire**

```
info_env ← conditions_d'environnement ();
```

```
prendre_action ← Quelle_action_faire (info_env);
```

```
Si prendre_action != 0 alors
```

```
    | faire_l'action (prendre_action);
```

```
Fin
```

```
tâche = planifier_les_tâches (heure actuelle);
```

```
Si tâche != 0 alors
```

```
    | faites_la_tâche (tâche);
```

```
Fin
```

```
Fin
```

**Algorithme 7** : Pseudo-algorithme du serveur de décision automatique

### 4.5.3. Pseudo-algorithme de l'algorithme génétique

Entrée : température, humidité, nombre de serre ;

Sortie : Décisions

#### Début

```
Aléatoire_Pop (pop_size) ; " La création aléatoire de la population_initiale de
                             la taille pop_size "
Validation_&_Correction(pop_init) ; " Validation et correction de la population
                                     initiale pour avoir des individus
                                     admissible "
Fitness () ; " Cette fonction représente la valeur de fitness "
Selection() ; " Cette fonction choisit les individus performants par l'appel
               de la fonction fitness "
Croisement () ; " Cette fonction pour le croisement es la création des
                 nouveaux individus fils "
Mutation () ; " Cette fonction fait la mutation entre deux bits dans la
               même gène de l'individu "
Evaluation () ; " Cette fonction permet de calculer la valeur de fitness de
                 chaque individus "
Si (Critère_d'arrêt) alors :
    |   Terminer ;
Sinon :
    |   Remplacement () ; " Cette fonction remplacer les fils dans la
                           population initial "
Fin_si
```

#### Fin

**Algorithme 8** : Pseudo-algorithme de l'algorithme génétique

## 4.6. L'interface SaaS

L'interface SaaS est l'application Web hébergé dans le cloud dans laquelle nous pouvons à la fois surveiller et contrôler notre serre.

### 4.6.1. Page principale (page d'accueil)

C'est l'entrée de notre application, elle est destinée aux visiteurs, clients et l'admin et c'est là où on peut voir les dernières actualités sur la technologie des serres intelligentes, comme le client peut accéder à son compte ou contacter l'administrateur s'il y a un problème ou une ambiguïté. L'admin aussi il peut connecter depuis cette page.

La figure suivante montre la capture d'écran de la page Web de la page principale

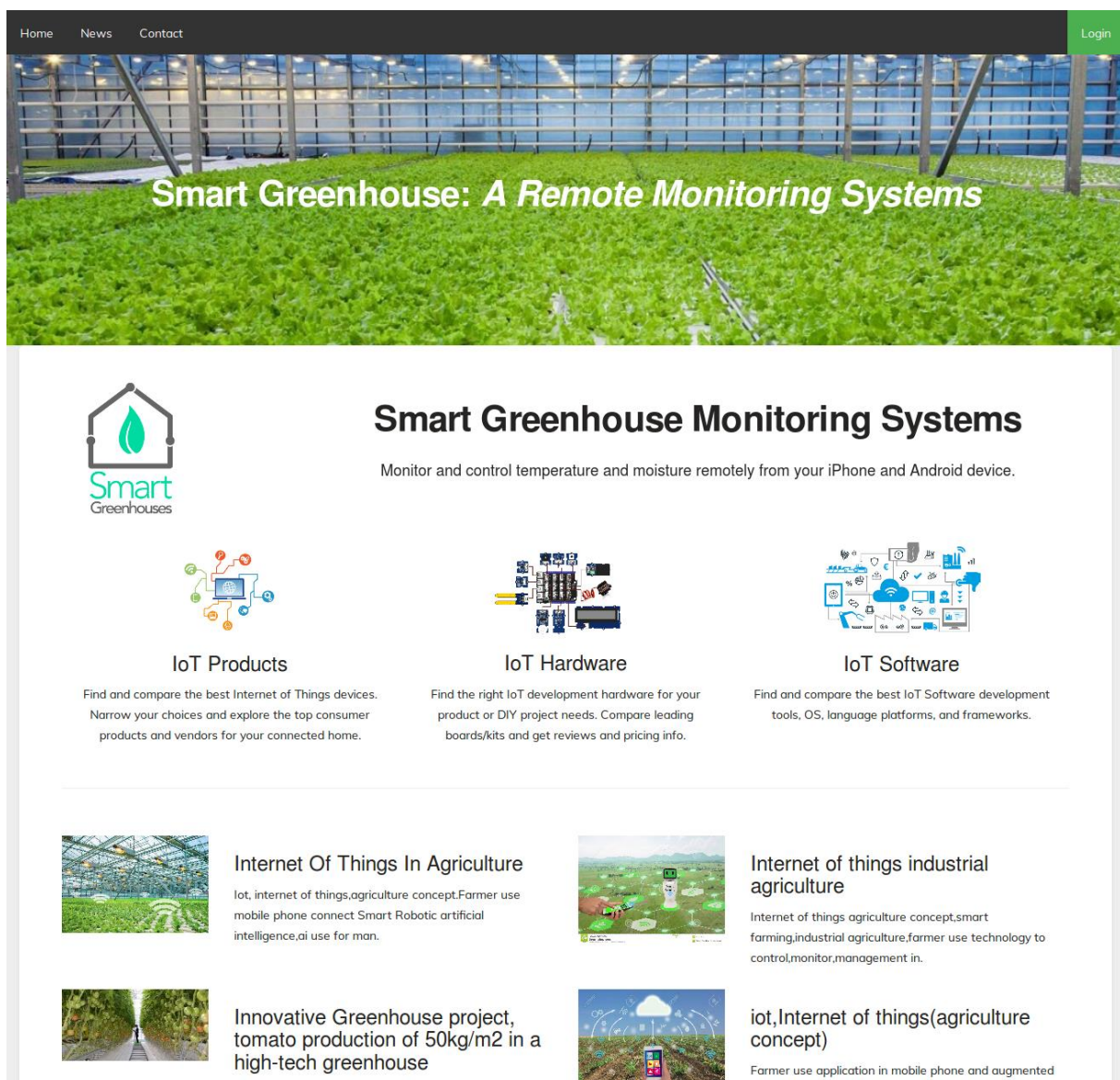


Figure 4.5 : La page principale (page d'accueil)

### 4.6.2. Page de surveillance

C'est la page Web dans laquelle nous pouvons voir des informations sur la serre telles que la température, l'humidité et la lumière, nous pouvons également surveiller la serre avec une webcam et voir les notifications du système, plus des graphiques de la température et de l'humidité qui changent en fonction du temps. La figure suivante montre la capture d'écran de la page web de surveillance.

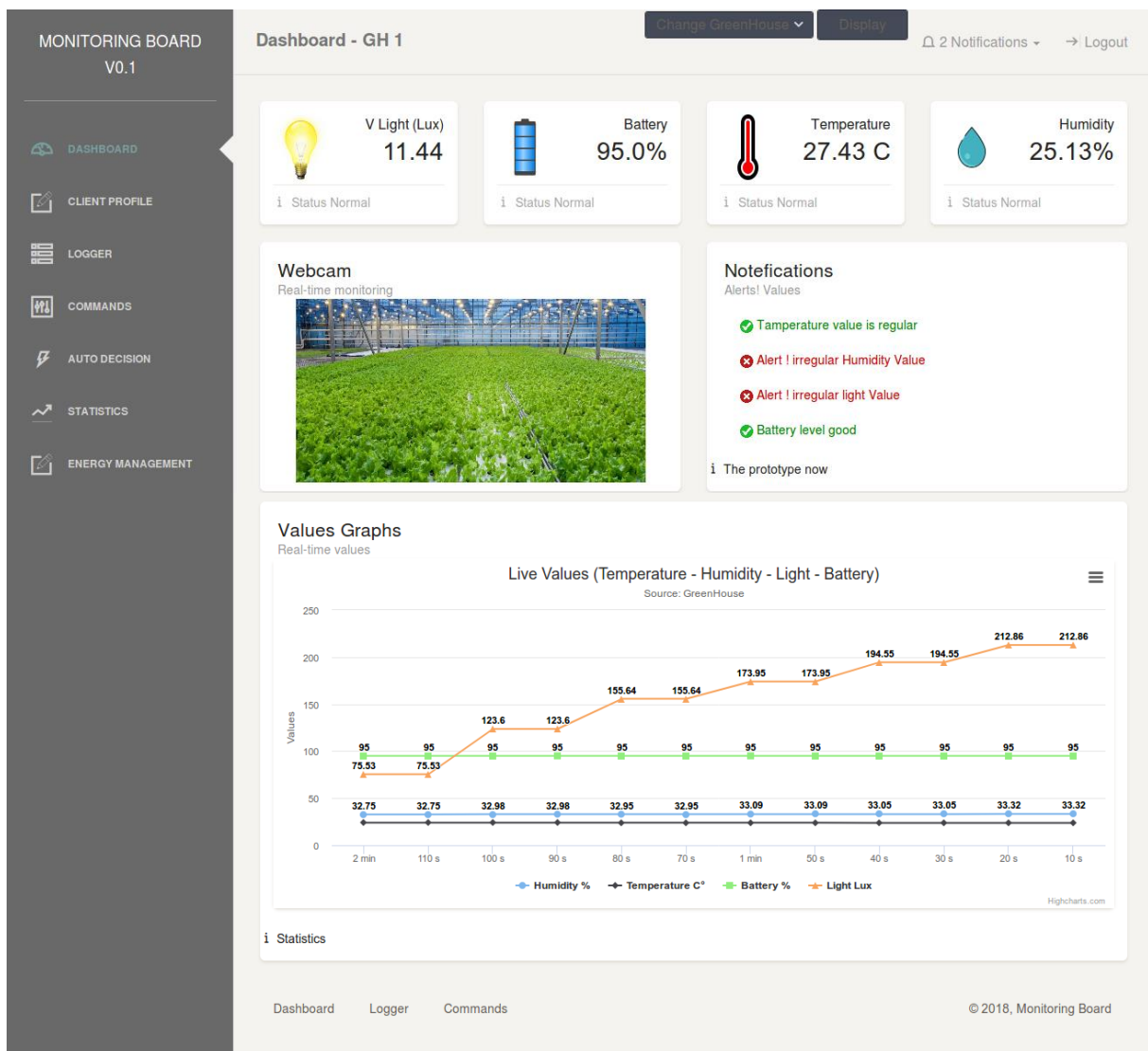


Figure 4.6 : La page d'accueil de surveillance



### 4.6.3. Profil du client

Cette page web montre le profil du client, ce dernier peut voir ses informations ou les mettre à jour, comme il peut voir quelques informations générales sur ses serres.

Les figure suivante montre la capture d'écran de la page Web du profil du client.

The screenshot shows the 'Client Profile' page with the 'UPDATE INFORMATION' tab selected. The 'Edit Profile' form contains the following fields:

- User Name: az
- First Name: alaeddine
- Last Name: alaeddine
- Phone Number: 0656554454
- E-mail Address: alaeddine.zeraib@yahoo.com
- Password: ..
- Address: biskra

An 'Update Profile' button is located at the bottom of the form.

Figure 4.7 : Capture d'écran 1 de la page de profil du client

The screenshot shows the 'Client Profile' page with the 'MY FARM' tab selected. It displays two tables and a map:

**Farm Information**  
All details about the farm

| Farm Location | Farm Area |
|---------------|-----------|
| Biskra        | 120       |

**Greenhouses Information**  
All details about the greenhouses

| Greenhouse ID | Greenhouse Type |
|---------------|-----------------|
| 1             | Tomate          |

**Geographical location**  
Farm site on the maps

A Google Map shows the farm site location in Biskra, Tunisia, with a red pin and a label 'Farm site X'.

Figure 4.8 : Capture d'écran 2 de la page de profil du client

#### 4.6.4. Logger

Cette page Web montre les 10 dernières informations reçues des capteurs sans fil. La figure suivante montre une capture d'écran de la page Web de l'enregistreur.

The screenshot shows the 'Logger - GH 1' interface. It features a sidebar menu with options like Dashboard, Client Profile, Logger, Commands, Auto Decision, Statistics, and Energy Management. The main content area displays a 'Data Table' with the following columns: Date, Voltage, Temperature, Humidity, VLight, InfLight, @Src-, and Payload. The table contains 10 rows of data, all from 26-2-2018, showing consistent sensor readings.

| Date              | Voltage | Temperature | Humidity | VLight | InfLight | @Src- | Payload                              |
|-------------------|---------|-------------|----------|--------|----------|-------|--------------------------------------|
| 26-2-2018 0:51:52 | 2.84    | 27.43       | 25.13    | 11.44  | 11.44    | 1111  | 00FFFF11110A00010F221A2F02F900050005 |
| 26-2-2018 0:51:42 | 2.84    | 27.43       | 25.13    | 11.44  | 11.44    | 1111  | 00FFFF11110A00010F221A2F02F900050005 |
| 26-2-2018 0:51:32 | 2.84    | 27.43       | 25.13    | 11.44  | 11.44    | 1111  | 00FFFF11110A00010F221A2F02F900050005 |
| 26-2-2018 0:51:22 | 2.84    | 27.43       | 25.13    | 11.44  | 11.44    | 1111  | 00FFFF11110A00010F221A2F02F900050005 |
| 26-2-2018 0:51:12 | 2.84    | 27.43       | 25.13    | 11.44  | 11.44    | 1111  | 00FFFF11110A00010F221A2F02F900050005 |
| 26-2-2018 0:51:2  | 2.84    | 27.43       | 25.13    | 11.44  | 11.44    | 1111  | 00FFFF11110A00010F221A2F02F900050005 |
| 26-2-2018 0:50:52 | 2.84    | 27.43       | 25.13    | 11.44  | 11.44    | 1111  | 00FFFF11110A00010F221A2F02F900050005 |
| 26-2-2018 0:50:41 | 2.84    | 27.43       | 25.13    | 11.44  | 11.44    | 1111  | 00FFFF11110A00010F221A2F02F900050005 |

Figure 4.9 : La page Logger

#### 4.6.5. Commandes

Dans la page de commande, l'utilisateur peut soit contrôler le manuel des ressources de serre, soit configurer les paramètres de notification. La figure suivante montre la capture d'écran de la page web de la commande.

The screenshot shows the 'Resources Controle' and 'Notifications Settings' sections of the web interface. The 'Resources Controle' section includes four status controls: Greenhouse Fan Status, Greenhouse Light Status, Greenhouse Watering Status, and Greenhouse Door Status, each with a 'Select One' dropdown menu and an 'Apply' button. The 'Notifications Settings' section includes three sliders: Temperature (Min 18 C°, Max 29 C°), Humidity (Min 75 %, Max 85 %), and Visible Light (Min 80 Lux, Max 500 Lux). A 'Live Webcam' section shows a real-time video feed of the greenhouse interior.

Figure 4.10 : La page du commandes

### 4.6.6. Décision Automatique

Cette page Web sert à configurer le serveur de décision automatique qui est responsable de la prise de décision automatique (contrôle de la serre) ou de l'exécution des tâches planifiées. Les figures suivantes montrent des captures d'écran de la page Web Auto Décision.

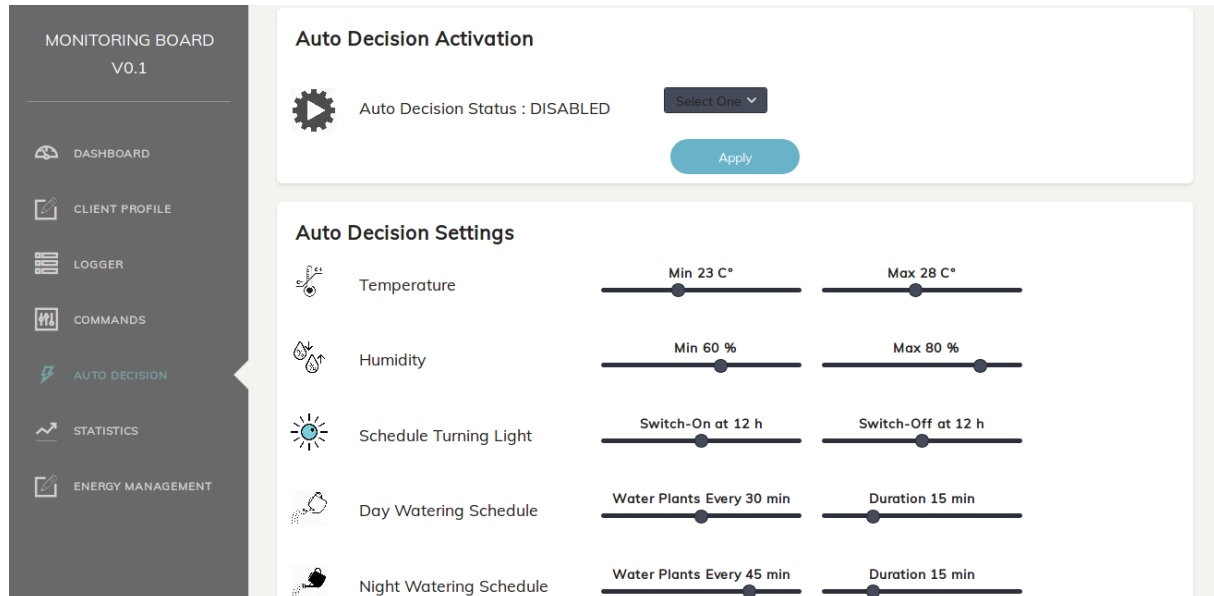


Figure 4.11 : La page de décision automatique

### 4.6.7. Statistiques

Cette page web visualiser les statistiques des derniers états climatiques de la serre sous forme des graphes. Plus la possibilité d'exporter ces graphes sous forme JPEG, PNG, JPG ou PDF. La figure suivante montre une capture d'écran de la page Web de statistiques.



Figure 4.12 : La page de statistiques

### 4.6.8. Gestion de l'énergie verte

Dans cette page web le client peut consulter les décisions intelligentes qui devraient être appliquées sur la serre pour optimiser l'énergie et les ressources en eau ...etc. La figure suivante montre une capture d'écran de la page Web de gestion de l'énergie verte.

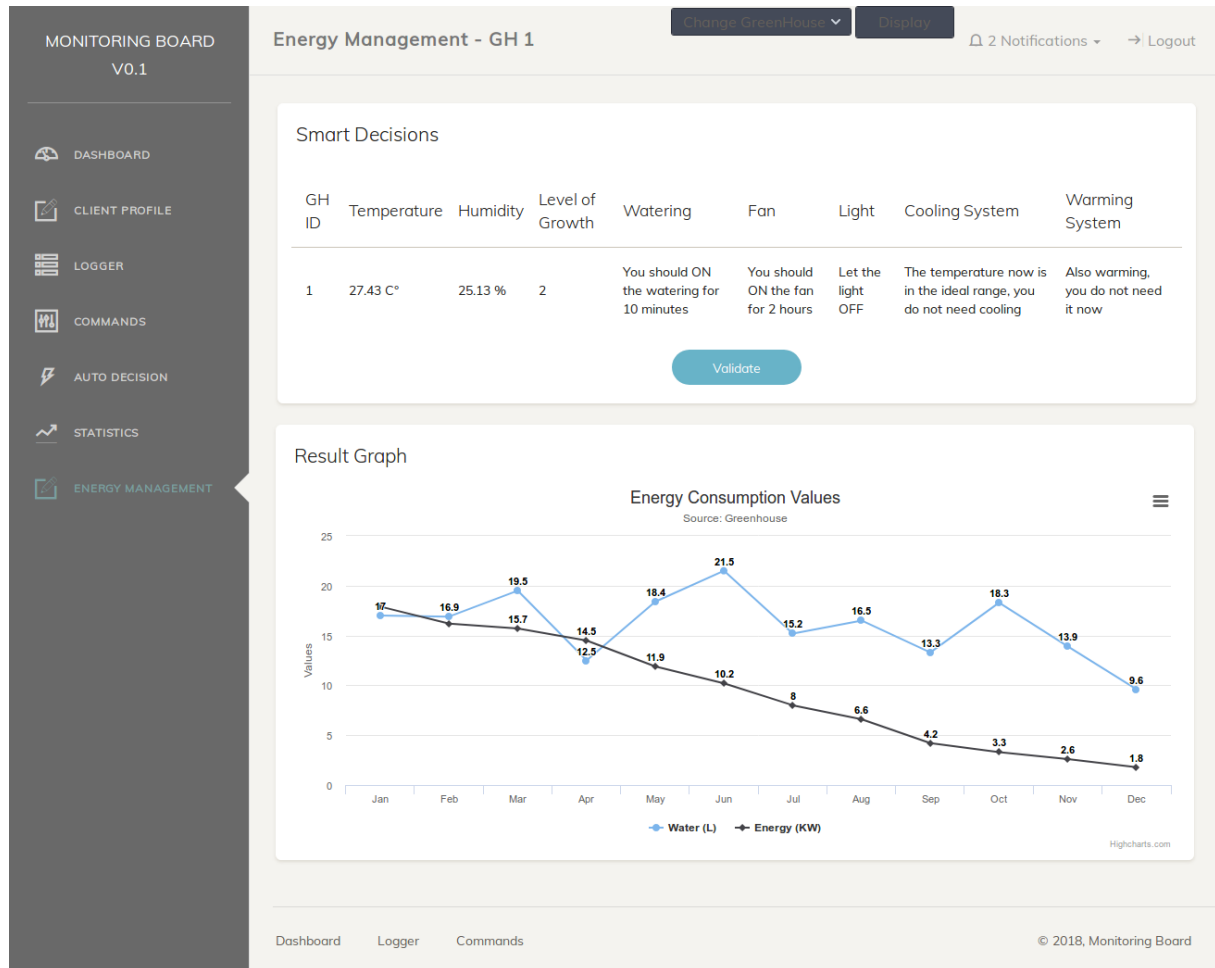


Figure 4.13 : La page de gestion de l'énergie verte

#### 4.6.9. La page web Admin

Dans cette page l'admin peut ajouter un nouveau client, ajouter des serres, les outils de connexion et de contrôle, comme il peut modifier ses informations du compte admin tels que le nom d'utilisateur et le mot de passe. Les figures suivantes montrent des captures d'écran de la page web de l'admin.

MONITORING BOARD V0.1

Admin Profile 2 Notifications Logout

CLIENTS FARMS GREENHOUSES CONNECTION DEVICES CONTROL DEVICES

Clients List  
All Clients

| Client ID | Username | First Name | Last Name | Phone Number | Home Address | E-mail                     |
|-----------|----------|------------|-----------|--------------|--------------|----------------------------|
| 14        | az       | alaeddine  | alaeddine | 0656554454   | biskra       | alaeddine.zeraib@yahoo.com |

Add New Client

Username

First Name

Last Name

Phone Number

Home Address

E-mail Address

Password

Submit Informations

Dashboard Logger Commands © 2018, Monitoring Board

Figure 4.14 : Capture d'écran 1 de la page de profile de l'admin (Ajouter nouveau client)

MONITORING BOARD V0.1

Admin Profile 2 Notifications Logout

CLIENTS FARMS GREENHOUSES CONNECTION DEVICES CONTROL DEVICES

Add New Farm

Farm ID

Area (m<sup>2</sup>)

Client Username

Location

Submit Informations

Figure 4.15 : Capture d'écran 2 de la page de profile de l'admin (Ajouter des nouvelles fermes)

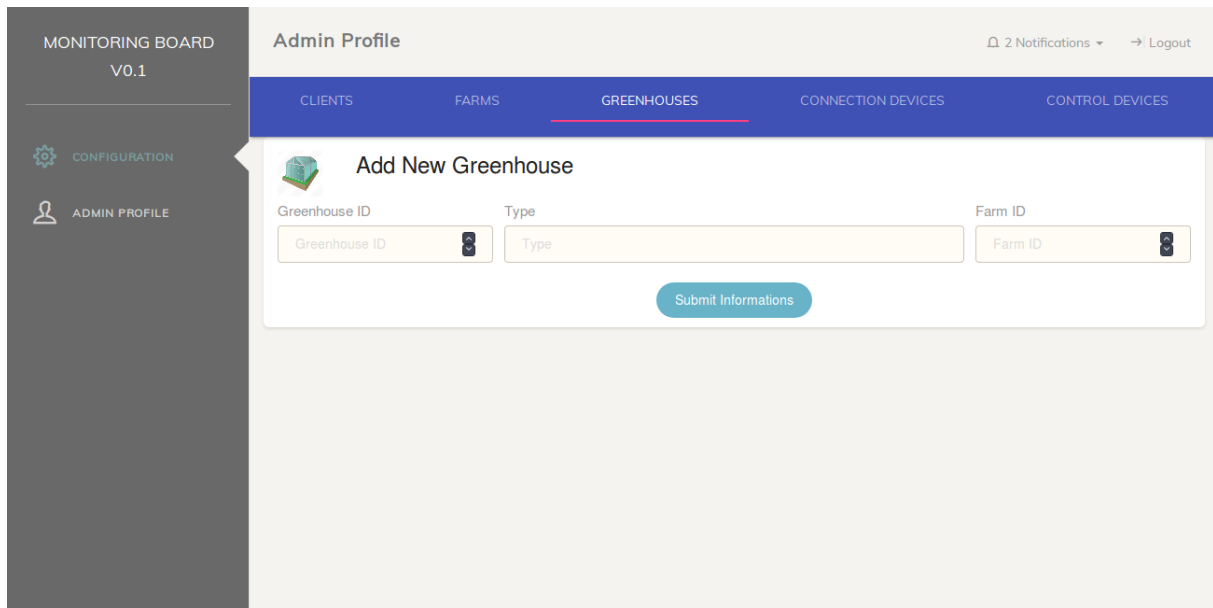


Figure 4.16 : Capture d'écran 3 de la page de profile de l'admin (Ajouter des nouveaux serres)

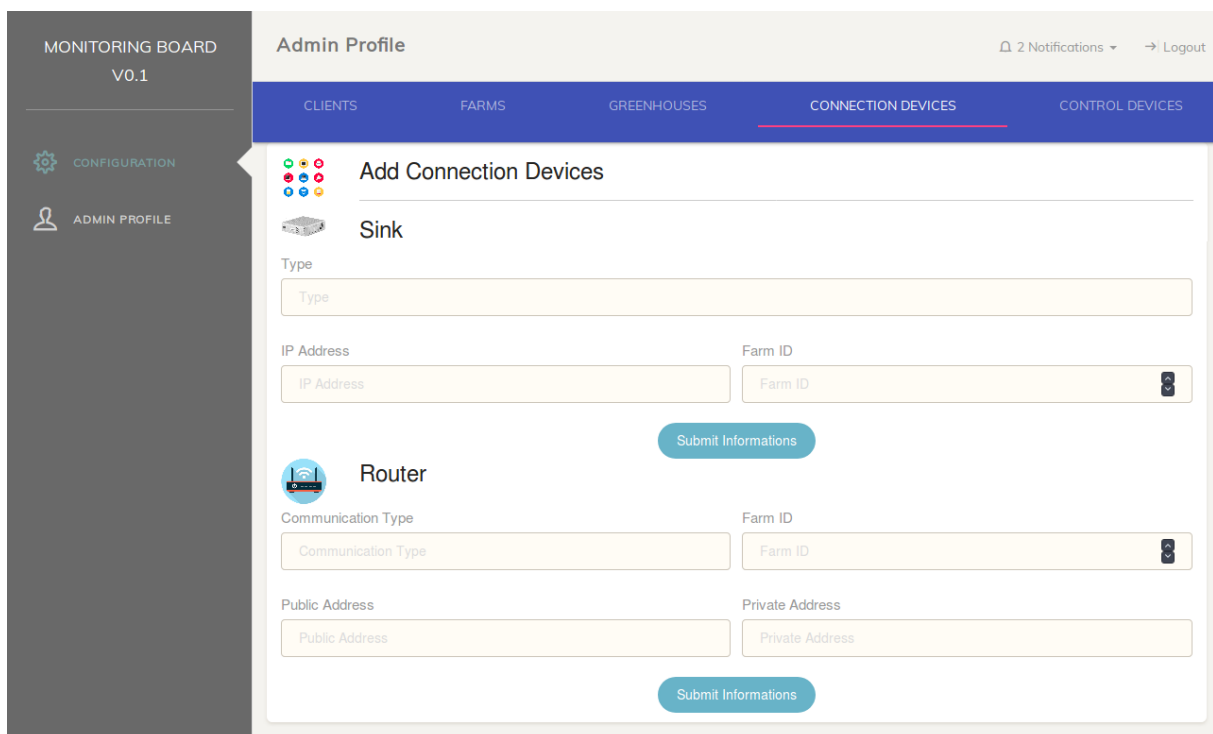


Figure 4.17 : Capture d'écran 4 de la page de profile de l'admin (Ajouter les outils de connexion)

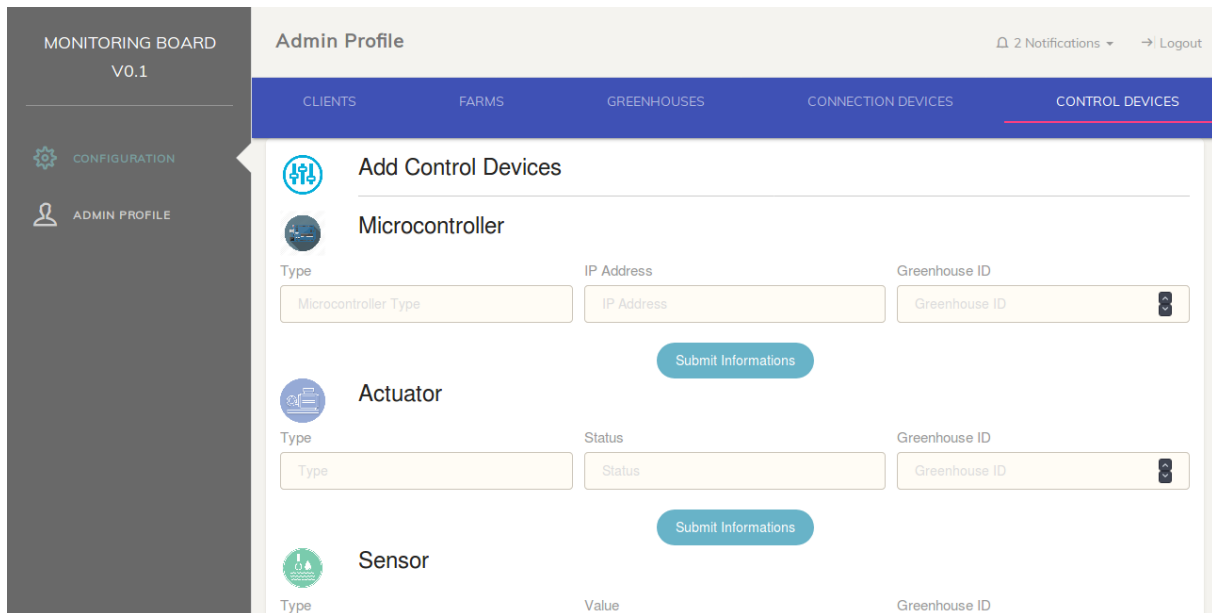


Figure 4.18 : Capture d'écran 5 de la page de profile de l'admin (Ajouter des nouveaux outils de contrôles)

#### 4.7. Application Mobile

L'application mobile offre les mêmes fonctionnalités que dans le tableau de bord Web, il est plus pratique de l'utiliser dans un smartphone. La figure ci-dessous montre quelques captures d'écran de l'application mobile.

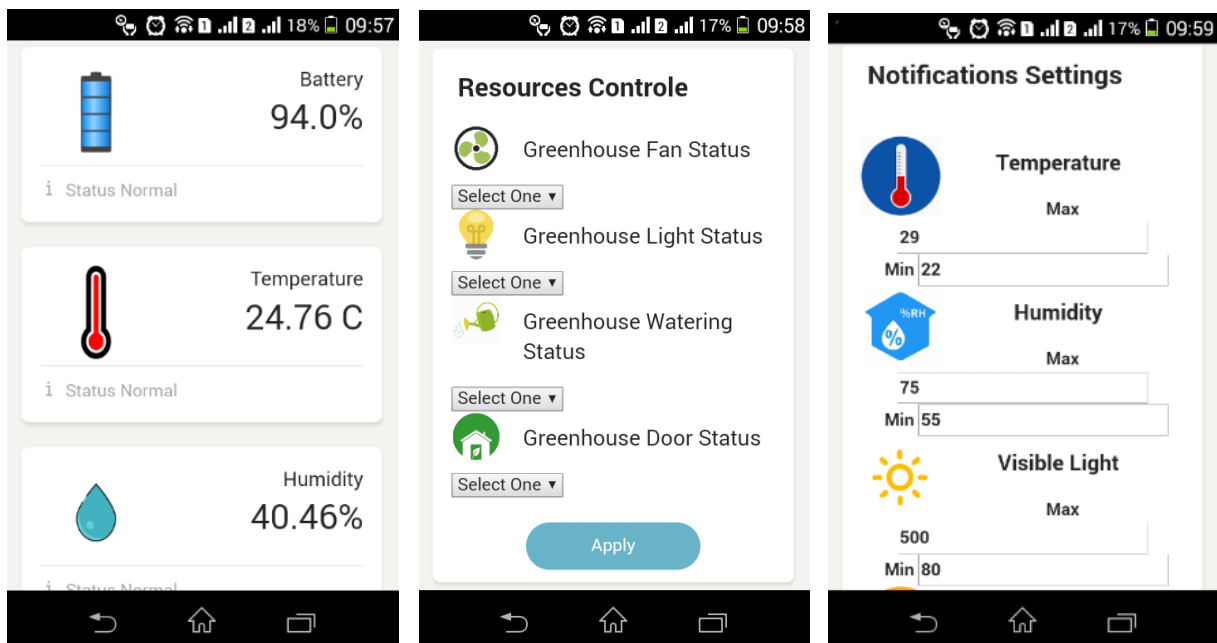


Figure 4.19 : Captures d'écran de l'application mobile

#### 4.8. Déploiement de la solution

Afin de réaliser la solution proposée on a la déployer sur une serre hydroponique au département d'informatique en utilisant les composants électroniques déjà mentionné précédemment plus les actionneurs (Ventilateur, Lampe, pompe à eau) chacun des actionneurs fonctionne avec 220V, Les figures suivantes montrent quelques images de l'intérieure et l'extérieure de la serre.



Figure 4.20 : Images pour le déploiement réel de la solution



## **4.9. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté la mise en œuvre de notre système, nous avons commencé par présenter le langage de programmation, et après les outils et les frameworks utilisés pour développer notre système, nous avons également présenté les dispositifs électroniques utilisés dans la construction de notre projet, Application Web et mobile et la réalisation sur une serre.

# *Conclusion Générale*

## *Et perspectives*

- ***Conclusion***

L'Internet des objets a connu une croissance de plus en plus rapide menant à une révolution prévisible à la fois dans l'environnement de l'industrie et dans la société, un impact énorme qui va changer la vie de beaucoup. Et l'agriculture intelligente c'est l'un des aspects qui a un grand impact qui va développer la main-d'œuvre par la création des emplois dans les régions excédentaires et remédier à la pénurie de main-d'œuvre agricole.

Les nouvelles technologies s'invitent dans notre quotidien et dans de nombreux domaines, parfois très étonnants. Et le domaine de l'agriculture est loin d'être épargné. Une forme d'agriculture se développe de plus en plus: elle est connectée, quel que soit le type de production, et requiert l'utilisation de nouvelles technologies telles que l'imagerie satellitaire et l'informatique. Entre drones arroseurs et capteurs en tout genre, partons aujourd'hui à la découverte du Smart Farming, une méthode pour optimiser les rendements agricoles. [42]

L'agriculture de serre représente un environnement qui peut être contrôlé dans de nombreux aspects, un tel environnement peut être entièrement réglementé au principe de l'Internet des objets (IoT). Dans notre projet, nous avons créé une solution IoT qui aide les agriculteurs à contrôler les serres manuellement ou automatiquement par le système. Et on a proposé un modèle pour la planification de l'exploitation optimale de l'énergie verte. Ainsi, un modèle d'optimisation a été formulé pour optimiser l'éclairage supplémentaire, la circulation et la ventilation de l'air et les systèmes de chauffage et de refroidissement dans les systèmes de contrôle des serres existantes.

- ***Perspectives***

Malheureusement, nous n'avons pas été en mesure de traiter le cas d'un plusieurs serres en raison du temps et des ressources électronique et informatiques limitées. Nous aimerions d'améliorer la solution d'une serre à plusieurs serres connectées et pourquoi pas réaliser cette étape en réalité.

- [1] L'Internet des objets en pleine expansion, 03 avr. 2018; (disponible à [http://www.lemonde.fr/pixels/article/2017/06/08/l-internet-des-objets-en-pleine-expansion\\_5140586\\_4408996.html](http://www.lemonde.fr/pixels/article/2017/06/08/l-internet-des-objets-en-pleine-expansion_5140586_4408996.html))
- [2] M. Han et H. Zhang, "Business intelligence architecture based on internet of things " *Journal of Theoretical & Applied Information Technology*, vol. 50, no. 1, pp. 90-95, 2013.
- [3] M. Weill et M. Souissi, "L'Internet des objets: concept ou réalité?" dans *Réalités industrielles*, ESKA, Éd., Les Annales des Mines. ESKA, 2010, pp. 90-96.
- [4] P.-J. Benghozi, S. Bureau, F. Massit-Folléa, C. Waroquiers, and S. Davidson, *L'internet des objets: quels enjeux pour l'Europe*, Éd. de la Maison des sciences de l'homme éd., 2009, 66 p.
- [5] Système RFID : définition et fonctionnement d'un système RFID ; 07 avr. 2018; (disponible à <http://rfid.comprendrechoisir.com/comprendre/systemerfid>)
- [6] J. A. Stankovic, "Wireless sensor networks" IEEE Computer Society, vol. 41, no.10, pp. 92-95, 2008
- [7] N. Daniel, R. Marcel, and K. Daniel, Livre Blanc *Machine-To-Machine enjeux et perspectives: Orange Business Services*, Syntec informatique, Fing, 2006, 40 p.
- [8] Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, and M. Palaniswami, "Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions," *Future Generation Computer Systems*, vol. 29, no. 7, pp. 1645-1660, 2013.
- [9] J. D. Pessemier, "Une réflexion sur « L'internet des Objets » (IdO) ou « Internet of Things » (IoT)," 2015.
- [10] L'internet des objets (Internet of Things – IoT); 10 avr. 2018; (disponible à <https://www.naxoo.ch/linternet-des-objets-internet-of-things-iot/> )
- [11] G. Marques, N. Garcia, N. Pombo « A Survey on IoT: Architectures, Elements, Applications, QoS, Platforms and Security concepts »; *Advances in Mobile Cloud Computing and Big Data in the 5G Era*, pp 115-130; 2017
- [12] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, M. Ayyash; « *Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols and Applications* »; Article en IEEE Communications Surveys & Tutorials; November 2015
- [13] R. Khan, S. U. Khan, R. Zaheer and S. Khan, "Future internet: The internet of things architecture, possible applications and key challenges," in *Frontiers of Information Technology (FIT)*, 2012 10th International Conference On, 2012, pp. 257-260.
- [14] O. Bouziane; « *A Cloud Monitoring Solution for Internet of Things* »; Memoir 2017
- [15] IoT protocols List: IoT data and network protocols in 2018; 22 avr. 2018; (disponible à <https://www.survivingwithandroid.com/2016/08/iot-protocols-list.html> )

- [16] S. P. Austin Datta, « *L'Internet des Objets : la troisième révolution industrielle* » ; *Logistique & Management*, 23:3, 29-33, 2015
- [17] S. Shekhar, J. Colletti, F. M. Arriola, L. Ramaswamy, C. Krintz, L. Varshney, D. Richardson; « *Intelligent Infrastructure for Smart Agriculture: An Integrated Food, Energy and Water System* »; Computing Community Consortium (CCC), Catalyst. **2017**
- [18] V. Gazis, M. Goertz, M. Huber, A. Leonardi, K. Mathioudakis, A. Wiesmaier, F. Zeiger « *Short Paper: IoT: Challenges, Projects, Architectures* »; T Group (R&D) GmbH, Hilpertstrasse 3564295, Darmstadt, Germany; 2015 18th International Conference on Intelligence in Next Generation Networks.
- [19] M. Roopaei, P. Rad, K. K. Raymond Choo; « *Cloud of Things in Smart Agriculture: Intelligent Irrigation Monitoring by Thermal Imaging* »; The University of Texas at San Antonio; IEEE Cloud Computing published by the IEEE computer society; 2017
- [20] A. Batista, A. Rodriguez, M. Quintana ; « *Using IoT resources to enhance the accuracy of overdrain measurements in greenhouse horticulture* »; CONCAPAN 2016, IEEE
- [21] A. Louise, E. Dadios; « *Energy Cost Optimization in Irrigation System of Smart Farm by using Genetic Algorithm* »; IEEE 2017
- [22] T. Okayasu, A. P. Nugroho, A. Sakai, D. Arita, T. Yoshinaga, R. Taniguchi, M. Horimoto, E. Inoue, Y. Hirai, M. Mitsuoka; « *Affordable Field Environmental Monitoring and Plant Growth Measurement System for Smart Agriculture* »; 2017 Eleventh International Conference on Sensing Technology (ICST) – IEEE
- [23] M. C. Bozchalui, C. A. Cañizares, K. Bhattacharya; « *Optimal Energy Management of Greenhouses in Smart Grids* »; IEEE Transactions on Smart Grid; 2014
- [24] L'agriculture intelligente ; Rédactrice en chef d'ISOfocus ISO; 07 mai. 2018 ; (disponible à [https://www.iso.org/fr/isofocus\\_122.html](https://www.iso.org/fr/isofocus_122.html) )
- [25] L'utilisation de la technologie de l'information dans le secteur agricole des économies; Chine Agriculture Information Institute of CAAS ; 06 mai. 2018 ; (disponible à [http://www.fao.org/fsnforum/fr/activities/discussions/wisdom\\_agriculture](http://www.fao.org/fsnforum/fr/activities/discussions/wisdom_agriculture) )
- [26] IoT et Drone pour une agriculture intelligente; 09 mai. 2018 ; (disponible à <http://www.hadwiger-group.com/fr/innovations/iot-bigdata/iot-et-drone-pour-une-agriculture-intelligente/> )
- [27] Beecham Research Ltd, Libelium designs; «*The future of farming through the IoT perspective* »; 2016
- [28] N. Barnier, P. Brisset; « *Optimisation par algorithmes génétiques sous contraintes* » ; École Nationale de l'Aviation Civile 7, avenue Édouard Belin 31055 Toulouse Cedex 4
- [29] Holland, « *Adaptation in Natural and Artificial Systems* ». University of Michigan Press: Ann Arbor, 1975.

- [30] I Saad, F. Tangour, P. Borne; « *Application des algorithmes génétiques aux problèmes d'optimisation* » ; Revue de l'Électricité et de l'Électronique · Avril 2009
- [31] Goldberg, D.E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley : Reading, MA, 1989.
- [32] Principes agronomiques de la tomate ; 12 fév. 2018 ; (disponible à <http://www.yara.fr/fertilisation/cultures/tomate/les-fondamentaux/principes-agronomiques-tomate/> )
- [33] Comment faire pousser un plant de tomate; 13 fév. 2018 ; (disponible à <https://fr.wikihow.com/faire-pousser-un-plant-de-tomate> )
- [34] 9 Ways to Grow Tomatoes; 13 fév. 2018; (disponible à <https://bonnieplants.com/library/9-ways-to-grow-tomatoes/>)
- [35] Dimensionnement pompes; 20 mai. 2018 disponible à ( [https://www.thermexcel.com/french/ressour/mot\\_pump.htm](https://www.thermexcel.com/french/ressour/mot_pump.htm) )
- [36] Calcule moteur de ventilateur » ; 20 mai. 2018 (disponible à [https://www.thermexcel.com/french/ressour/mot\\_vent.htm](https://www.thermexcel.com/french/ressour/mot_vent.htm))
- [37] Puissance, luminosité et éclairage ; 20 mai. 2018 ; (disponible à [https://www.leclubled.fr/smartblog/22\\_puissance-luminosite-et-eclairage](https://www.leclubled.fr/smartblog/22_puissance-luminosite-et-eclairage) )
- [38] A. Grisey; « *Production sous serre : problématiques actuelles et dernières innovations* »; Conférences techniques SITEVI/SITMAFGR - 27 Novembre 2013
- [39] La température et l'humidité relative ; 15 fév. 2018 ; (disponible à <http://www.meteolafleche.com/temperature.html> )
- [40] Qu'est-ce que Python ? ; Open classrooms ; 14 jui. 2018 ; (disponible à <https://openclassrooms.com/courses/apprenez-a-programmer-en-python/qu-est-ce-que-python> )
- [41] Module 8 relais pour Arduino et Raspberry-pi ; 14 jui. 2018 ; (disponible à <https://arduino103.blogspot.com/2016/09/module-8-relais-pour-arduino-et.html> )
- [42] Le Smart Farming, le futur de l'agriculture ; 14 jui. 2018 ; (disponible à <https://vivredemain.fr/2016/04/15/smart-farming-futur-agriculture/#>)
- [43] Qu'est-ce que l'énergie verte ? ; 16 jui. 2018 ; (disponible à <https://environnement.brussels/thematiques/energie/quest-ce-que-lenergie-verte> )
- [44] M. Elsied, A. Oukaour, H. Gualous, R. Hassan, A. Amin; « *Gestion de l'énergie et optimisation du système multisources basée sur l'algorithme génétique* » ; Symposium De Genie Electrique (Sge'14) : Ef-Epf-Mge 2014, 8-10 Juillet 2014, Ens Cachan, France

# ملخص

من مشغلي الصناعات الزراعية الضخمة إلى المزارعين العضويين الصغار ، يستخدم المزارعون اليوم في جميع أنحاء العالم إنترنت الأشياء للحد من استهلاكهم للمياه والطاقة ، وتحسين جودة أو إنتاج منتجاتهم. في عملنا ، نحن مهتمون بمشكلات منطقة الزراعة ، بالتحديد على إدارة البيوت الزجاجية والتقليل من استهلاك الطاقة حيث اقترحنا حلاً ذكياً متعدد الأطراف جديداً يعتمد على تقنيات الحوسبة السحابية وتقنية إنترنت الأشياء من أجل منح المزارعين القدرة على المراقبة والإشراف والتحكم في عدد كبير من البيوت البلاستيكية العادية والحساسة من دون الحاجة إلى التدخل جسدياً في كل مرة للقيام بإجراءات منتظمة.

## *Abstract*

From massive agribusiness players to small organic farmers, growers all over the world today are using the Internet of Things to reduce their consumption of water and energy, and improve the quality or yield of their products. In our work, we are interested on agriculture area problems, precisely on greenhouses management and the reduction of energy consumption where we have proposed a new smart multitenant solution based on IoT and Cloud Computing technologies in order to give farmers the ability to monitor, supervise and control an important number of normal and sensitive greenhouses without the need to physically intervene each time to make regular actions.

## *Résumé*

Des grands acteurs de l'agroalimentaire aux petits agriculteurs biologiques, les producteurs du monde entier utilisent aujourd'hui l'Internet des objets pour réduire leur consommation d'eau et d'énergie et améliorer la qualité ou le rendement de leurs produits. Dans notre travail, nous sommes intéressés aux problèmes de l'agriculture, précisément sur la gestion des serres et la réduction de la consommation d'énergie. Nous proposons une nouvelle solution intelligente multi-tenant basée sur les technologies IoT et Cloud Computing pour permettre aux agriculteurs de surveiller, superviser et contrôler un nombre important de serres normales et sensibles sans avoir besoin d'intervenir physiquement à chaque fois pour effectuer des actions régulières.