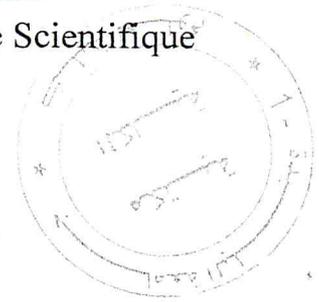


PA-004-282-1

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Saad Dahlab Blida 01
Faculté des sciences
Département de l'Informatique



Mémoire de fin d'études présenté pour l'obtention du diplôme
de
Master en Informatique
Option : Génie des systèmes Informatique

Thème :

Irrigation Intelligente et Internet des Objets

MA-004-282-1

Président du Jury:
Mr Hadji Yakhia
Membres - Mme Abdel
- Mr Zaïr

Réaliser Par :
ININHAZWE Fleury
NZUNGA Gaël

Dirigé par :
Mr Abdallah Hichem Kameche

Année Universitaire: 2014-2015

Remerciements

Nous tenons à remercier en cette occasion tout le corps enseignant qui a contribué à notre formation, plus particulièrement le chef du département informatique Mme Benstitti, notre encadreur MAB Kameche Abdallah Hicham pour son aide et les précieux conseils qu'il a bien voulu nous donner.

Nos vifs remerciements vont à Phd Miloud Aouidate, celle qui nous a proposé le thème que nous présentons.

Nous remercions également toute la communauté burundaise vivant en Algérie qui nous aide à ne pas oublier notre chère patrie et plus particulièrement Nahayo Parfait et Manirakiza Jean Marie pour leur soutien moral pendant nos études.

Nous n'oublions pas nos parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience, nos proches et amis qui nous ont soutenu et encouragé.

Nous remercions aussi vivement tous les responsables de l'université de Blida1 ainsi que toutes les personnes qui nous ont aidé de près ou de loin.

Dédicaces

Je remercie Dieu de m'avoir donné le courage pour accomplir ce modeste travail que je dédie:

A mes très chers parents Phd Pierre-Célestin Karangwa et Marie-Rose Mudende.

A la nouvelle et heureuse famille de mon frère Kévin Nimbeshaho.

A mes trois sœurs Inagateka Ashley-Balla, Kantore Ambre-Bérenice et Kwizera Leslie-Morgane.

Aucun mot ne saurait représenter ma gratitude, je suis et serais éternellement votre fils et frère dévoué.

A toute ma grande famille, à tous mes amis et à tous mes enseignants.

Nzunga Gael

A ma très chère maman,

En témoignage de mon immense affection et ma grande gratitude.

Ni mes dédicaces, ni mes remerciements ne pourront égaler votre sacrifice.

Votre amour et sollicitude que vous m'avez toujours réservés.

J'espère que vous trouvez en moi votre source de fierté et de bonheur

A mon défunt père, repose en paix

A NIBITANGA Joséphine pour ses conseils et sa patience

A tous mes frères et sœurs que

*Que Dieu vous prête longue vie et bonne santé et qu'il garde notre solidarité
notre indéfectible attachement familial.*

A toute ma grande famille, à tous mes amis et à tous mes enseignants.

Ininahazwe Fleury

RESUME

Notre planète souffre d'une mauvaise gestion d'une de ces principales ressources : l'eau. La terre s'assèche d'un côté et d'un autre côté nous avons une surpopulation qui cause un accroissement considérable de nos besoins alimentaires. Ces besoins alimentaires étant satisfaits en grande partie par les produits de l'agriculture, il est donc indispensable d'avoir une bonne politique de gestion de l'eau pendant l'irrigation pour s'assurer que la production puisse continuer au delà de notre génération sans endommager la planète.

Nous avons la chance de vivre à une époque où un dispositif peut se connecter à internet, c'est l'ère de l'internet des objets.

Nous avons donc décidé dans ce document de proposer un système automatique d'irrigation intelligente capable de s'intéresser aux réels besoins en eau d'une plantation grâce à l'utilisation de divers capteurs placés à côté des plantes pour la collecte des données environnementales telles que la température ambiante et l'humidité du sol. L'utilisateur pourra éditer des seuils de données qui, une fois dépassés, permettront au système de prendre la décision d'arroser ou pas le champ. L'utilisateur peut également prendre la décision tout seul et sommer le système d'arroser la plante, tout cela grâce à une interface web facile à utiliser.

Mots clés : Irrigation intelligente, internet des objets, Arduino, Capteurs.

ABSTRACT

Our beloved planet suffers from a bad management of water. On one side, the earth is becoming dry, on the other side we have an overpopulation that causes an extremely increase of our need in food. While a great amount of these foods is supplied by agriculture, we must have a good policy in water management in the field of irrigation.

We are lucky to live in a world where everything and nothing can be connected to the internet. That's the "Internet of Things" era.

In this document, we decided to develop and realize an automatic system for a smart irrigation that will be able to determinate the real need in water of a plantation through different sensors placed all around. The environmental data collected, such as temperature and soil moisture will be used by the system to know whether or not the plant needs to be irrigated. A user can set a limit at which the system will chose or not to give water to the plant. The user can also command the system to start or stop the irrigation process. All of that will be achieved through a simple web interface.

Keywords : Smart Irrigation, Internet of Things, Arduino, Sensors.

Table des Matières

Table des Matières

Introduction générale.....	1
Partie Théorique.....	2
Chapitre I : Irrigation.....	3
I.1: INTRODUCTION	4
I.2: LA CRISE MONDIALE DE L'EAU.....	5
I.2: LA CRISE MONDIALE DE L'EAU.....	5
I.3: L'EAU DANS LES DIFFERENTS TYPE DE SOL	7
I.4: IRRIGATION.....	11
I.5: LES METHODES D'IRRIGATION	12
<i>I.5.1. Irrigation de surface.....</i>	<i>14</i>
<i>I.5.2 Irrigation par aspersion</i>	<i>16</i>
<i>I.5.3 Irrigation au goutte à goutte.....</i>	<i>16</i>
I.6: L'IRRIGATION INTELLIGENTE.....	16
<i>I.6.1 Introduction et base de l'irrigation intelligente</i>	<i>17</i>
<i>I.6.2 Systèmes basées sur l'évapotranspiration.....</i>	<i>17</i>
<i>I.6.3 Systèmes basées sur les capteurs d'humidité du sol.....</i>	<i>19</i>
<i>I.6.4 Exemples de Systèmes d'irrigation intelligents</i>	<i>19</i>
I.7: CONCLUSION	23
Chapitre II : Internet des Objets.....	24
II.1: INTRODUCTION	24
II.2: DEFINITIONS ET CONCEPT	25
II.3: STANDARDS ET PROTOCOLES DE COMMUNICATION.....	28
<i>II.3.1: Le standard IEEE 802.15.4.....</i>	<i>29</i>
<i>II.3.2: 6lowPan.....</i>	<i>31</i>
<i>II.3.3: UDP : User Datagram Protocol.....</i>	<i>38</i>
<i>II.3.4: Le protocole applicatif COAP.....</i>	<i>40</i>
II.4: LES DIFFICULTES ET LES OBSTACLES QUI FREINENT L'IoT	45
II.5: LES APPLICATIONS ACTUELLES DE L'INTERNET DES OBJETS.....	46
II.6: LES DOMAINES DE L'INTERNET DES OBJETS	46
II.7: Internet des objets au service de l'agriculture ou l'agriculture connectée.....	47
II.8: CONCLUSION	50
PARTIE PRATIQUE	51
CHAPITRE III : CONCEPTION ET REALISATION DU	
SYSTEME.....	52

Table des Matières

III.1:Introduction	53
III.2:Problématique.....	54
III.3:Conception du système informatique.....	57
III.3.1:Métriques d'évaluation	57
III.3.2:Architecture de la solution proposée et protocole de communication mise en place	58
III.4:Description du système physique.....	67
III.4.1:La carte Arduino Uno	68
III.4.2:Le module wifi ESP8266	70
a. Présentation du module.....	70
b.Spécifications techniques du module Wifi ESP8266	71
c.Branchements avec la carte Arduino	72
III.4.3:Les différents capteurs et actionneur	73
III.4.4:Accessoires.....	75
III.4.5: Fonctionnement du système.....	77
III.5:Conclusion.....	80
Chapitre IV : Tests.....	82
IV.1:Introduction.....	83
IV.2:Tests du système	83
IV.2.1:Description de la culture et son cycle	83
IV.2.2:Phase de Test	84
IV.3: Les vues du système et interface utilisateur	86
IV.4: Conclusion.....	90
Conclusion générale.....	91
Références.....	93

Listes des Figures

Liste des Figures

Figure 1: Différences de tailles des particules du sol	6
Figure 2 : Exemple de sols sableux.....	7
Figure 3 : Un sol limoneux.....	8
Figure 4 : Exemple d'un sol argileux.....	9
Figure 5 : Arrosage des plantes avec un arrosoir.....	11
Figure 6 : Irrigation par sillons.....	13
Figure 7 : Diagramme général du système.....	18
Figure 8 : Fonctionnement du système.....	19
Figure 9 : Flow chart du système.....	20
Figure 10: Pompe et dispositif d'affichage.....	20
Figure 11 : Système entier.....	21
Figure 12: Comparaison de la pile tcp/ip traditionnelle et de la pile ip pour objets intelligents.....	28
Figure 13 : LR WPAN Vs Autres réseaux sans fils.....	29
Figure 14 : Types d'en-tête 6LoWPAN.....	32
Figure 15 : Datagramme Ipv6 avec une en-tête 6LoWPAN compressé.....	32
Figure 16 : Probable datagramme Ipv6 et leurs en-tête 6LoWPAN.....	33
Figure 17 : Indication du type Mesh.....	33
Figure 18 : Différentes significations des valeurs de V et de F.....	33
Figure 19 : Format d'en-tête du premier fragment et du suivant.....	34
Figure 20 : En-tête de compression HC1.....	35
Figure 21 : Compression de l'en-tête Ipv6.....	35

Listes des Figures

Figure 22 : Compression HC2 suivant.....	36
Figure 23 : Compression HC_UDP d'un en-tête UDP6.....	36
Figure 24 : Compression HC_UDP des ports.....	36
Figure 25 : Compression HC_UDP du champ "Longueur".....	37
Figure 26 : En-tête UDP.....	37
Figure 27 : En-tête UDP-Lite.....	38
Figure 28 : Environnement RESTful contraint.....	39
Figure 29 : En-tête du protocole COAP.....	40
Figure 30 : Exemple de communication client / serveur COAP.....	43
Figure 31: Robot Anatis.....	48
Figure 32: Drone eBee.....	48
Figure 33: Smart Watering System.....	49
Figure 34: comparaison entre moyenne et médiane.....	58
Figure 35: Architecture du système.....	59
Figure 36 : Diagramme de séquence pour le scénario d'envoi de requêtes.....	62
Figure 37 : Diagramme de séquence pour le scénario de demande de données.....	62
Figure 38 : Diagramme d'états-transitions du système.....	63
Figure 39 : Représentation du système en un système asservi.....	64
Figure 40 : Organigramme du système en ne considérant que l'humidité.....	65
Figure 41 : Organigramme du système considérant l'humidité et la température.....	66
Figure 42: Image de la carte Arduino.....	68
Figure 43 : Le module wifi ESP8266.....	71
Figure 44 : Branchements avec la carte Arduino.....	73

Listes des Figures

Figure 45 : Le capteur SEN92355P.....	74
Figure 46 : Le SEN11301P.....	74
Figure 47 : Un capteur de luminosité.....	75
Figure 48 : Vue réelle du montage.....	76
Figure 49 : Vue schématique du montage.....	76
Figure 50 : Page d'accueil.....	87
Figure 51 : Page web d'interaction avec le système.....	88
Figure 52 : Page des graphes.....	89

Liste des Tableaux

Tableau I : Tableau comparatif des méthodes de données.....	17
Tableau II: Comportement du capteur.....	85
Tableau III: Comparaison des consommations journalières des deux terrains.....	85

Introduction Générale

L'eau est une des ressources les plus précieuses de notre planète. Elle est toute fois, dans la plupart des cas, consommée comme si elle provenait d'une source inépuisable. Donc son utilisation doit être contrôlée et régulée.

Elle figure parmi les éléments essentiels auxquels font recours les êtres vivants, y compris les plantes, pour se nourrir, se construire et vivre. Pour permettre leur croissance végétative et leur développement. Les plantes ont besoin d'eau en quantité suffisante et au bon moment, à portée de leurs racines. Suite aux précipitations incertaines ou autres conditions climatiques, l'homme doit pratiquer l'irrigation pour apporter artificiellement aux plantes l'eau nécessaire selon le type de la plante et au bon moment.

Comment savoir, **à quel moment** faut-il irriguer et **quelle quantité d'eau** faut-il apporter à la plante pour augmenter sa productivité et son développement normal ?

L'objectif majeur de notre travail consiste à répondre à cette question, en proposant même un système d'irrigation intelligente et automatique développé à base des outils technologiques modernes qui nous ont permis de connecter nos plantes c'est-à-dire grâce aux différents capteurs implantés aux voisinages de la plante nous pouvons détecter les paramètres de l'environnement tel que la température, l'humidité et la luminosité. Ces paramètres seront consultables en temps réels sur internet par l'utilisateur qui surveille de près sa culture. Ainsi, il peut décider d'irriguer ou stopper l'irrigation en cours tout cela à distance. Sinon, le système déclenchera et stoppera l'irrigation selon les besoins de la plante sans intervention humaine.

Pour relater les travaux réalisés dans le cadre de notre projet, notre mémoire s'organisera de la façon suivante :

- Le premier chapitre : Ce chapitre est dédié à l'irrigation dans sa généralité avec un aperçu sur quelques systèmes d'irrigation intelligents proposé dans différents travaux.

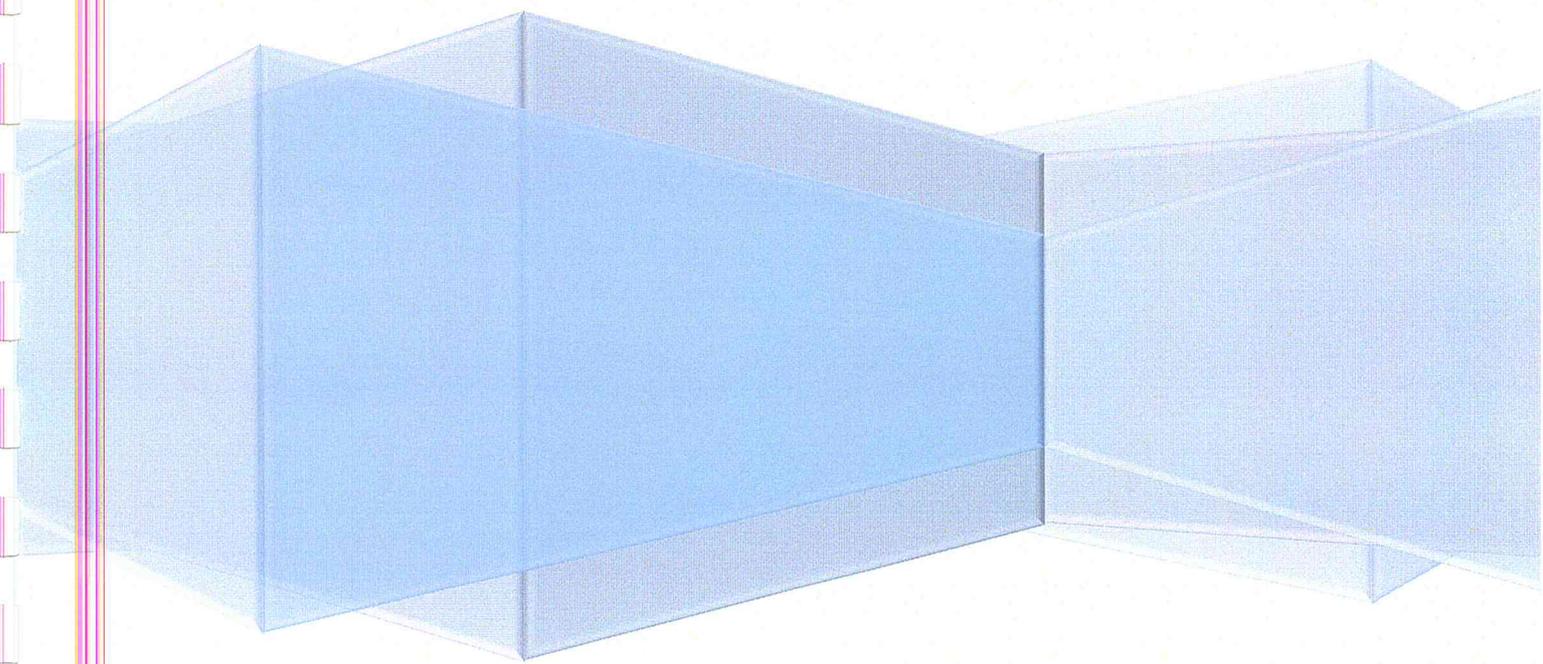
Introduction Générale

- Le deuxième chapitre : Dans ce chapitre, nous allons parler sur l'internet des objets, en premier lieu nous allons présenter sa définition et son concept, en deuxième lieu nous parlerons de ses standards et ses protocoles de communication, nous allons finir en parlant des domaines d'applications de l'internet des objets.

- Le troisième chapitre : Dans ce chapitre, nous abordons la problématique autour du système proposé, on décrira le système physique et ses composants matériels un par un. Ce chapitre englobe toute la partie conception du système avec ses diagrammes : le diagramme de classes, le diagramme de cas d'utilisation et les diagrammes de séquences.

- Le quatrième chapitre : Ce chapitre va se consacrer sur la réalisation de notre système d'irrigation intelligente. Nous présenterons le matériels et le logiciel utilisés ainsi que le protocole de communication utilisé lors de l'envoi et réception des données. A la fin nous exposons les interfaces utilisateur développées dans notre système.

PARTIE THEORIQUE



Chapitre I : L'Irrigation



I.1: Introduction

Ce chapitre est dédié à l'irrigation dans sa généralité avec un aperçu sur les systèmes d'irrigation intelligents proposés par différents travaux.

En effet on ne pourrait aborder la conception et la réalisation de notre prototype sans parler de la mauvaise gestion de l'eau qui amène plus de gens à se préoccuper de cette ressource indispensable pour notre survie.

On parlera un peu des caractéristiques des différents sols car une bonne gestion de l'eau passe dans le domaine de l'agriculture du moins par une assez bonne connaissance du sol sur lequel on compte irriguer.

Nous mentionnerons aussi les techniques ancestrales d'irrigation qui sont les bases des techniques d'irrigation intelligente. Pour finir on étudiera deux cas de systèmes d'irrigation automatique intelligents, l'un proposé en Inde, l'autre au Rwanda.

I.2: La crise mondiale de l'eau

L'eau est une denrée primordiale et indispensable à l'être humain. D'aucun s'accorde à dire que nous connaissons, si ce n'est déjà le cas, une crise mondiale de l'eau dû principalement a un boom démographique et économique. En effet, la naissance de plus en plus d'êtres humains et l'amélioration des conditions économiques de certains pays font que les besoins en eau aient doublé en seulement trente-cinq ans. Quelques chiffres donnés par Gaëlle Dupont en mars 2009 dans le journal Le Monde sont assez alarmant. Elle y dit que la croissance de la population mondiale, de 80 millions de personnes par an, augmente les besoins en eau de 64 milliards de mètres cubes chaque année. Aussi que c'est pour l'agriculture, la production d'énergie et le développement économique que les exigences sont les plus

Chapitre I : L'Irrigation

importantes. En matière agricole, l'évolution des habitudes alimentaires pèse lourdement. Par exemple, La production d'un kilo de blé nécessite de 400 à 2 000 litres d'eau, selon les régions, et celle d'un kilo de viande de 1 000 à 20 000 litres.

Cette soi-disant pénurie d'eau n'est en fait qu'un signe flagrant de mauvaise gestion des ressources d'eau actuelles. Selon le professeur Asit K. Biswas, expert auprès de l'ONU et de dix-sept États, membre de la Commission mondiale sur l'eau, membre fondateur de l'Association internationale des ressources en eau et du Conseil mondial de l'eau et aussi fondateur de l'International Journal of Water Resources Development et a été son rédacteur en chef depuis 1985, il n'y a pas de crise mondiale de l'eau. Pour lui les chiffres donnés par la banque mondiale et/ou l'ONU sont souvent biaisés. En effet, Leur hypothèse est qu'une ville est dans une crise de pénurie si elle n'a pas au moins 150 mètres cubes d'eau douce par personne, par an. Ce qu'ils oublient, dit-il, et qui est élémentaire, c'est que l'eau n'est pas comme le pétrole. Personne ne la consomme vraiment entièrement. 99 % de l'eau qui arrive dans une maison part dans les eaux usées. La question fondamentale, nous dit-il encore, est de savoir comment nous gérons nos eaux usées pour pouvoir les utiliser et les réutiliser, ce que fait Singapour. Cette ville dispose de 35 à 40 mètres cubes par personne, par an, et ils n'ont aucun problème d'eau. C'est une question d'efficacité. Il a aussi constaté que l'utilisation totale de l'eau en 2005 aux États-Unis est en fait inférieure à ce qu'elle était en 1975, alors qu'il y avait beaucoup moins d'habitants, d'activité économique et de besoins en nourriture. Et les États-Unis ne font que commencer à effleurer la surface sur le plan de l'efficacité.[REP 15]

En somme, la crise mondiale de l'eau est une réalité même si les causes ne sont pas là ou on pourrait imaginer qu'elles soient. Il faut à tout prix éviter le gaspillage et dans le domaine de l'agriculture une irrigation efficace est un des meilleurs moyens d'économiser l'eau.

I.3: L'eau dans les différents type de sol

En agriculture, l'apport en eau sur les terrains à cultivé ne dépend pas uniquement du type de culture qu'on souhaite planté mais aussi et surtout du type de sol. L'eau du sol ne représenterait que 0,064% de l'eau douce totale, son rôle est cependant essentiel puisque c'est l'eau qu'utilisent les racines des plantes. Une bonne gestion de cette eau souterraine se fait par une bonne connaissance du type du sol de son champ et des risques particuliers en ce qui a trait au déplacement des polluants présents dans les sols cultivés.

Un sol est souvent composé de sable, de limon et d'argile. Un sol sera donc sableux, limoneux ou argileux si sa teneur en sable, en limon et en argile est considérable. [HIL 14]

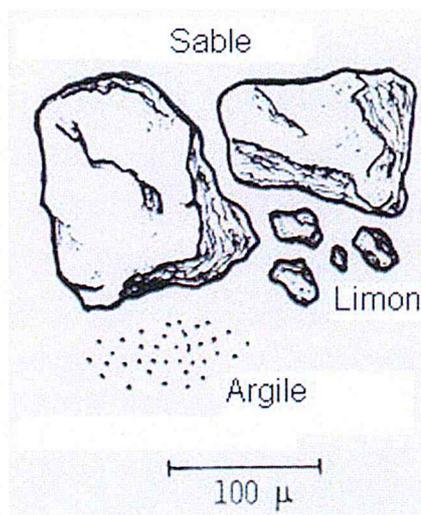


Figure 1: Différences de tailles des particules du sol

Sols sableux

Le sable donne un sol meuble, bien aéré et bien drainé. Les particules d'un sol sableux sont relativement espacées, ce qui permet à l'eau de s'écouler rapidement. Les substances dissoutes dans l'eau qui s'infiltre pénètrent vite dans les profondeurs du sol et éventuellement dans les eaux souterraines. Certaines activités agricoles comme le mélange des pesticides, le rinçage des cuves et l'entreposage du fumier,

Chapitre I : L'Irrigation

des engrais et des combustibles, peuvent être particulièrement dangereuses sur un sol sableux.

Si l'eau consommée à la ferme provient d'un puits, la contamination d'un réservoir aquifère souterrain peut entraîner des conséquences graves et immédiates. Un litre d'huile suffit à rendre non potables deux millions de litres d'eau. Les humains ne sont pas les seuls affectés, la contamination de l'eau souterraine peut aussi avoir des répercussions à long terme sur beaucoup d'autres utilisateurs du réservoir aquifère.

Les sols sableux ont une structure instable, ce qui les rend très sensibles à l'érosion éolienne. Le vent peut devenir le moyen de transport idéal pour les sédiments et les éléments nutritifs fixés aux particules en érosion qui viennent envahir les eaux de surface. Les sols à texture grossière se dessèchent rapidement, ce qui favorise l'érosion éolienne. Pour contrer ces problèmes, on recommande notamment les pratiques suivantes : les rotations culturales qui favorisent les résidus végétaux, les cultures de protection, le travail minimal du sol et l'utilisation de brise-vent et de barrières annuelles.



Figure 2 : Exemple de sols sableux

Sols limoneux

Le limon rend le sol glissant. Bien que tous les sols soient sujets à une éventuelle érosion par l'eau, le limon est le plus menacé. Sur les pentes longues ou abruptes, l'érosion par l'eau s'intensifie et le ruissellement peut atteindre une vitesse

Chapitre I : L'Irrigation

impressionnante. L'érosion par l'eau s'accompagne du ruissellement de substances dissoutes ou fixées à des particules.

Pour réduire l'érosion par l'eau, les pratiques suivantes sont recommandées : les rotations culturales, les cultures de protection, le travail du sol de conservation, la culture étagée et l'aménagement de bandes de protection végétalisées et de rigoles gazonnées.

En plus des sédiments, l'érosion par l'eau transporte plusieurs substances solubles dans l'eau, comme les pesticides et les engrais. [HIL 14]



Figure 3 : Un sol limoneux

Sols argileux

L'argile donne un sol visqueux qui retient l'eau et les substances nutritives. Les sols renfermant une forte proportion d'argile sont propices à l'agriculture en zone aride, mais plusieurs de leurs caractéristiques peuvent causer le déplacement des polluants présents dans les sols cultivés. La structure superficielle des sols argileux peut se dégrader, formant une croûte. L'encroûtement limite l'infiltration et accroît le ruissellement. Un sol argileux mouillé a tendance à se compacter, ce qui favorise également le ruissellement, lequel peut contenir des polluants et affecter la qualité des eaux de surface ou souterraines. Les sédiments de la finesse de l'argile prennent

Chapitre I : L'Irrigation

beaucoup de temps à se déposer dans les étangs-réservoirs, les ruisseaux et les lacs, ce qui peut hausser de beaucoup le coût du traitement de l'eau.

Les sols argileux peuvent également être très sensibles à l'érosion éolienne. Normalement, l'argile contribue à former des mottes stables. Cependant, la sécheresse peut causer la pulvérisation de la couche superficielle des argiles lourdes, au point de réduire les mottes en particules de la taille de gros grains de sable, très sensibles à l'érosion éolienne. On peut favoriser la protection de la structure superficielle en réduisant au minimum le travail des sols argileux et en conservant les résidus végétaux.

Le compactage du sol, qui touche surtout les sols argileux, est dû au passage de véhicules lourds ou à une circulation fréquente au même endroit. Le compactage peut avoir des effets néfastes sur le drainage et la germination.



Figure 4 : Exemple d'un sol argileu

Le type de sol est donc un facteur important à considérer lors de la conception et de la gestion d'un système d'irrigation. Un sable faiblement pourvu en matière organique retiendra à peine 5% de son poids en eau. Par contre, un sol limoneux pourra en retenir près de 30 %. Cette quantité d'eau retenue influence directement sur les fréquences d'irrigation. Par exemple, une argile aura assez d'eau en réserve en début de saison pour approvisionner une culture pendant un mois, alors qu'un sable grossier n'aura de réserve que pour quelques jours.[HIL 14]

I.4: Irrigation

Depuis longtemps, l'irrigation a été utilisée (appliquée) pour apporter artificiellement de l'eau à des végétaux cultivés pour en augmenter la production et permettre leur développement normal, en cas de manque d'eau induit par les précipitations incertaines ou autres conditions climatiques.

Une irrigation inadaptée ou mal conçue peut être source de beaucoup de problèmes :

- La sous-irrigation ou donner juste l'eau nécessaire pour les plantes augmente le risque de salinisation.
- La sur-irrigation peut être source de propagation de pathogènes et les polluants dans les cultures.

Alors, il est important de suivre le taux d'humidité de manière à conserver au maximum les plantes en vie, car chaque plante a besoin d'un taux d'humidité spécifique.

Voici quelques raisons qui nous poussent à recourir à l'irrigation :

- ✓ L'irrigation est nécessaire pour protéger les cultures de la sécheresse car les précipitations sont incertaines
- ✓ Nous ne recevons pas les précipitations pendant toutes les saisons de l'année, alors il faut pratiquer l'irrigation pendant les saisons sans précipitations
- ✓ Il ne pleut pas de la même manière dans toutes les régions du pays ; donc l'irrigation est nécessaire dans les régions où les précipitations ont été insuffisantes
- ✓ On distingue plusieurs types de sols, certains absorbent l'eau beaucoup plus par rapport aux autres ; donc au cas de besoin, il serait important d'irriguer les zones ayant des sols qui absorbent l'eau beaucoup plus par rapport aux autres
- ✓ L'eau des pluies s'écoule très rapidement le long des pentes, donc l'irrigation peut être nécessaire dans ces zones en pente.

I.5: Les méthodes d'irrigation

Comme vu précédemment, lorsque les précipitations sont insuffisantes, l'irrigation serait nécessaire pour couvrir le besoin en eau des cultures.

Il existe aujourd'hui plusieurs méthodes d'irrigations et chaque méthode présente en même temps des avantages et des inconvénients qui doivent être pris en considération lorsqu'il s'agit de choisir quelle méthode utiliser selon les conditions locales.

La méthode d'irrigation la plus élémentaire est celle qui consiste à transporter l'eau à partir de la source d'alimentation (par exemple un puits), à chaque plante avec un seau ou un arrosoir



Figure 5 : Arrosage des plantes avec un arrosoir

Inconvénients :

- Nécessite une main-d'œuvre importante
- Exige un long travail et un grand effort

Avantage :

- Convenable pour l'irrigation des petits jardins de légumes, à proximité immédiate de la source d'eau.

L'irrigation des grandes superficies fait appel à d'autres méthodes d'irrigation beaucoup plus adaptées, disons même perfectionnées

On distingue trois techniques d'irrigation les plus couramment utilisées [CBR 90]:

- Irrigation de surface (gravitaire):
 - irrigation par bassins
 - irrigation par sillons/à la raie
 - irrigation par planches
- Irrigation par aspersion
- Irrigation au goutte à goutte

I.5.1. Irrigation de surface

L'irrigation de surface consiste à amener l'eau au point le plus haut du terrain et à la laisser s'écouler par gravité.

L'eau est ensuite distribuée au champ :

- soit par submersion (irrigation par bassins),
- soit dans des sillons en terre (irrigation par sillons)
- ou bien par ruissellement à la surface d'une planche d'arrosage (irrigation par planches).

a) Irrigation par bassins

Les bassins sont constitués de cuvettes en terre, à fond à peu près plat, entourées de diguettes de faible hauteur ou levées.

Ces levées jouent le rôle d'empêcher le passage de l'eau aux champs adjacents.

Avantage : Cette technique d'irrigation s'applique à toutes les cultures qui peuvent tolérer la submersion par les eaux pour une longue durée (exemple : 12-24 heures) par exemple l'irrigation des rizières, les cultures semées à la volée (céréales), les cultures en ligne (tabac),.....

Inconvénients : L'irrigation par bassins n'est pas recommandée pour les cultures qui ne tolèrent pas la submersion par les eaux pour des durées supérieures à 24 heures.

Chapitre I : L'Irrigation

L'irrigation par bassins n'est généralement pas recommandée pour l'irrigation des cultures à racine tubercule et à tubercules, telles que la pomme de terre, la cassave et les carottes, cultures qui, nécessitent un sol bien meuble et bien drainé.

b) Irrigation par sillons

Les sillons sont des petites rigoles en terre, aménagées dans le sens de la pente du terrain, pour transporter l'eau entre les rangées de cultures. Tout le long de son trajet dans le sens de la pente du terrain, l'eau s'infiltré dans le sol, principalement par les côtés du sillon. Ainsi, les cultures sont irriguées.



Figure 6 : Irrigation par sillons

Généralement, les plantes sont cultivées sur les billons qui séparent les sillons. La méthode d'irrigation par sillons est recommandée pour plusieurs sortes de cultures, principalement pour les cultures en lignes. Cette technique est aussi essentiellement recommandée pour les cultures qui ne tolèrent pas la submersion de leur feuillage ou de leur collet par les eaux pour un temps trop long.

c) Irrigation par planches

Les planches sont généralement des bandes de terre assez longues, réalisées de telle sorte que les pentes soient uniformes, et séparées par des diguettes. Ici les diguettes ne sont pas conçues pour former une cuvette pour contenir les eaux contrairement à l'irrigation par bassins, mais pour guider l'eau lors de son ruissellement à travers la planche. L'irrigation par planches est recommandée pour les exploitations de grande taille, où les travaux agricoles sont mécanisés.

I.5.2 Irrigation par aspersion

L'aspersion est une méthode née aux USA dans l'immédiat après-guerre. Elle est beaucoup plus économe en eau et ne demande que 1700 à 2300 m³/ha/an. En revanche il faut une alimentation d'eau sous pression ce qui entraîne une consommation d'énergie extérieure. [JED 14]

L'irrigation par aspersion consiste à fournir l'eau aux cultures sous forme de pluie artificielle. L'eau est mise sous pression en utilisant généralement des pompes pour être distribuée aux cultures via des asperseurs rotatifs. L'eau sort sous la forme d'un jet et se répartit en gouttelettes d'eau qui tombent sur le sol.

I.5.3 Irrigation au goutte à goutte

L'irrigation au goutte à goutte, appelée aussi micro-irrigation, consiste à délivrer l'eau en gouttes à la surface du sol avec une faible dose (2-20 litres par heure). L'eau est canalisée dans des tuyaux en plastique munis d'orifices appelés gouteurs (émetteurs, distributeurs, jets d'eau, etc.). L'eau est délivrée au voisinage immédiat de la plante de sorte que l'humidification soit limitée à la zone racinaire du sol. [CBR 90]

I.6: L'irrigation intelligente

Après avoir mentionné les techniques d'irrigation classiques utilisées, nous allons maintenant aborder certaines techniques d'irrigation intelligentes.

I.6.1 Introduction et base de l'irrigation intelligente

En agriculture, le domaine de l'irrigation est en constante évolution et l'offre technologique est continuellement bonifiée. C'est ainsi que le concept d'irrigation intelligente est né, où les compétences et progrès technologiques sont mis à la disposition de l'agriculture en général et l'irrigation en particulier pour un rendement plus efficace, c'est-à-dire une meilleure production pour un coût relativement faible.

L'irrigation est passée d'une irrigation manuelle, avec l'apport de l'eau depuis un puits en utilisant des bidons jusqu' au champ, à une irrigation automatique avec l'utilisation de la mécanique et de certaines lois physiques pour acheminer l'eau au champ depuis une source d'eau quelconque.

L'ère du numérique et les mouvements écologiques, de plus en plus soucieux du sort de notre planète et de l'humanité, ont fait que l'on utilise l'électronique et l'informatique pour mieux calculer les besoins réels de la plante en eau et pour activer de manière autonome ou à distance les valves d'arrosage.

Dans le domaine de l'irrigation intelligente, deux grandes écoles se confrontent : l'irrigation basée sur le calcul de l'évapotranspiration et celle basée sur le calcul de l'humidité.

I.6.2 Systèmes basées sur l'évapotranspiration

L'évapotranspiration(ET) fait référence à la baisse d'humidité dans le sol par évaporation et transpiration de la plante. Des facteurs comme la température de l'air, l'humidité ambiante, les radiations solaires, la pluie et la vitesse du vent affectent les calculs liés à l'évapotranspiration.

Chapitre I : L'Irrigation

Les contrôleurs d'irrigation basés sur cette technologie tentent de calculer donc l'humidité du sol grâce à l'évaporation et la transpiration des plantes afin d'irriguer le champs adéquatement. L'efficacité de ces contrôleurs dépend de leurs méthodes de récolte de données.

Méthode de récolte de données	Description	Avantages	Inconvénients
Historical ET	Le contrôleur mémorise l'historique des données de l'évapotranspiration et les utilise dans la gestion du temps d'irrigation	Le contrôleur ne dépend pas d'un autre dispositif.	Il ne prend pas en compte les changements soudain de climat.
Sensor-based	Le contrôleur utilise les données proposées par les capteurs qui lui sont rattaché (de température ou luminosité).	Les données sont régulièrement mises à jour.	Les données sont limitées par le nombre et types de capteurs utilisés.
Source externe	Des données temps réel sont envoyé au contrôleur depuis une source externe.	Les données sont précises.	Des problèmes de communication peuvent survenir.
On-site Weather Station	Une station climatique installée récoltera les données précises de température,	Des données très précises transmises régulièrement	Prix d'installation assez élevé.

Chapitre I : L'Irrigation

	d'humidité ambiante, etc. Elle sera directement connecté au contrôleur ou a un ordinateur associé.		
--	--	--	--

Tableau I : Tableau comparatif des méthodes de données

I.6.3 Systèmes basées sur les capteurs d'humidité du sol

Cette technologie à été pendant longtemps relégué au second plan à cause du fait que les recherches sur l'évapotranspiration avaient déjà porter leur fruit mais aussi a cause du matériel défectueux proposé à l'époque. Par exemple les capteurs de capacité étaient affectés par les conditions du sol tandis que les capteurs de resistivité et de conductivité souffraient de corrosion au fil du temps. Malgré cette mauvaise réputation accumulé au cours des décennies précédentes, cette technologie reste la plus efficace. En effet, au lieu de calculer l'humidité du sol à travers l'évapotranspiration pourquoi ne pas la calculer à travers les données transmises par le sol lui-même. Une étude de l'Université de Floride aux Etats-Unis a mené une étude comparative entre les deux technologies et à part pour les sols sableux où les deux technologies s'équivalent il s'est avéré que l'utilisation de capteurs d'humidité du sol amenait à une consommation moindre d'eau.[BAS 14]

On voit ainsi éclore de nouvelles techniques aussi bien dans le calcul des besoins en eau de la plante que dans les logiciels de contrôle et/ou de gestion de l'irrigation. Quelques articles lus dans le but de notre travail proposent des systèmes d'irrigation intelligente ou « smart irrigation » en anglais.

I.6.4 Exemples de Systèmes d'irrigation intelligents

I.6.4.a Système d'irrigation intelligente avec communication via Bluetooth

Dans l'article[KAM 14], H.N. Kamalaskar et Dr P.H.Zope d'Inde propose un système d'irrigation sur une communication Bluetooth et un logiciel pour des plateformes android.

Leur idée est que tout composant constituant un système d'irrigation automatique peut être contrôlé à distance et que donc grâce à la vulgarisation des Smartphones dans la plupart des coins en Inde, les fermiers pourront utiliser leur système pour le contrôle et/ou le monitoring de leur système d'irrigation.

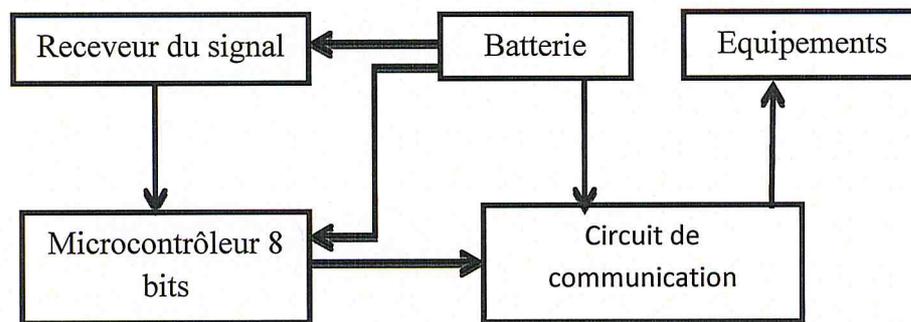


Figure 7 : Diagramme général du système

Description des composant du système

1. **Le microcontrôleur** : Il forme le cœur du système. Il lit les données des capteurs et les envoie à l'application android avec une actualisation des données toutes les 5 secondes. La performance de l'Atmel 8-bit AVR RISC est due plusieurs choses : une mémoire flash de 32 KB avec une capacité lecture-pendant-écriture, une mémoire EEPROM d'1KB, une SRAM de 2KB, 23 I/O lignes, 32 registres
2. **Le module de communication** : Une communication Bluetooth est utilisée pour la réception de données et l'envoi de requêtes.

- 3. L'application android :** Android est un système d'exploitation contenant une tonne d'applications telles qu'un programme SMS, calendrier, cartes, navigateurs web et sont pour la plupart, si ce n'est toutes, écrit en langage de programmation Java. Ces aspects d'android ont influencé le choix du logiciel. [KAM 14].

I.6.4. b. Système d'irrigation intelligent pour les petites fermes au Rwanda

Au Rwanda, le domaine de l'agriculture dépend essentiellement de la saison des pluies. Aussi le Rwanda est l'un des pays les plus densément peuplé. Bien qu'il ait fait des progrès considérable en matière de développement, le Rwanda reste un pays pauvre et l'électricité n'est pas disponible sur toute l'étendue du territoire.

Ces trois constatations ont poussé quatre rwandais, Gasore Geoffrey, Munyaneza Jean de Dieu, Ngendabanga Jean Pierre et Twibanire Aimable à concevoir un système d'irrigation automatique pour les petits agriculteurs fonctionnant à l'énergie solaire. En effet, leur système est conçu pour des terres de 100m² équipées d'une citerne souterraine de 8m de hauteur collectant les eaux de pluie.[GAS 15]

Les panneaux solaires sont utilisés comme source d'énergie et une pompe à moteur électrique est utilisée pour acheminer l'eau jusqu'à la citerne.

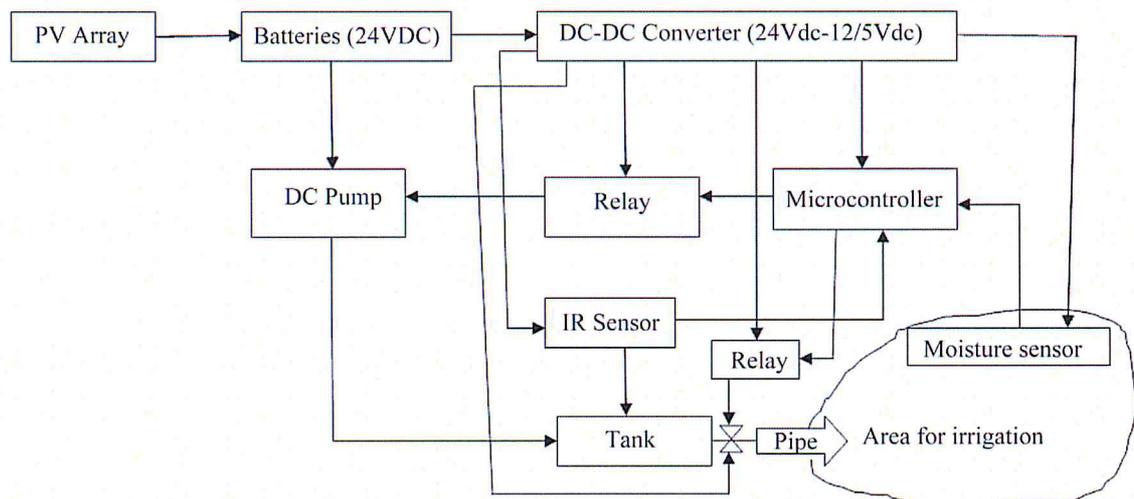


Figure 8 : Fonctionnement du système

Chapitre I : L'Irrigation

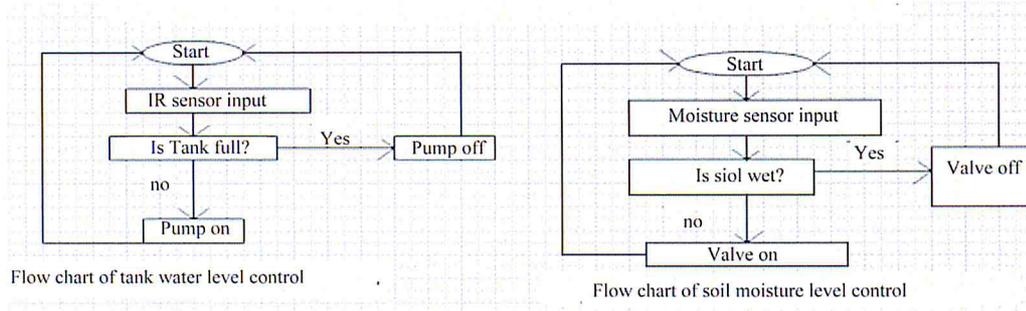


Figure 9 : Flow chart du système

Dans la citerne un dispositif infrarouge est installé pour contrôler le niveau d'eau atteint. Tant que le niveau d'eau n'a pas atteint le dispositif infrarouge, la pompe continue à acheminer l'eau ; une LED rouge est donc allumée montrant que l'eau est pompée vers la citerne et sur le dispositif d'affichage on voit « PUMP IS ON ». Une fois le niveau d'eau atteint, le LED s'éteint et la pompe arrête d'acheminer l'eau et sur le dispositif d'affichage on verra « PUMP IS OFF ».

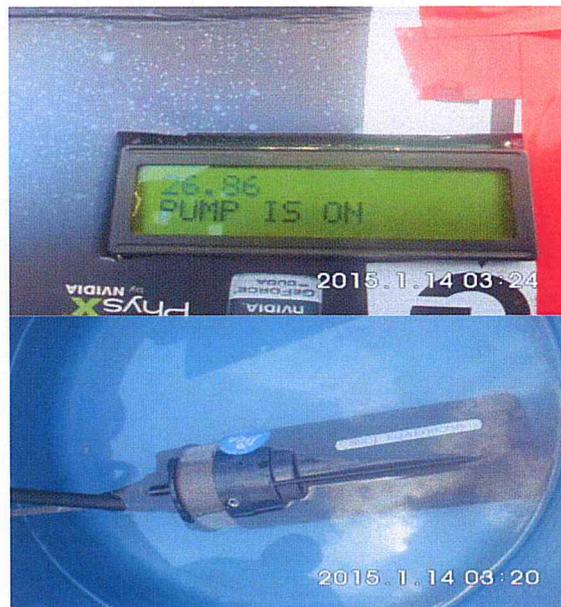


Figure 10: Pompe et dispositif d'affichage

Au niveau du champ, si l'humidité du sol est faible, une température de 30°C, un signal est envoyé au dispositif central qui actionnera la valve pour une irrigation du champ : une LED verte est allumée ce qui signifie que l'irrigation est en cours, sur le dispositif d'affichage on aperçoit « VALVE IS ON ». Si maintenant l'humidité du

Chapitre I : L'Irrigation

sol est élevée, une température en dessous de 15°C, un signal est envoyé au dispositif central pour fermer la valve : la LED verte est éteinte pour signifier que l'irrigation a été stopper et sur le dispositif d'affichage on y verra « VALVE IS OFF ».



Figure 11 : Système entier

I.7: Conclusion

Dans ce chapitre nous avons constaté que le manque d'eau n'en ait pas un au vrai sens du terme il s'agit plus tôt d'une mauvaise gestion de cette ressource. On a aussi parlé de l'eau dans les différents types de sol.

Ce chapitre étant consacré à l'irrigation, il est donc normal d'avoir vu les différentes techniques d'irrigation ayant existé ou existant encore ainsi que d'analyser quelques systèmes automatique d'irrigation.

Dans le prochain chapitre nous analyserons un outil indispensable pour notre prototype : l'internet des objets.

Chapitre II : Internet des Objets



II.1: Introduction

L'Internet des objets est une révolution technologique dans le domaine de l'informatique et des télécommunications. L'IdO fait référence à une variété d'équipements et de systèmes d'informations de détection tels que les réseaux de capteurs, des dispositifs de lecture (RFID, code à barres), de systèmes de localisation et de communication courte portée basés sur la communication machine à machine (M2M), à travers le réseau Internet pour former un réseau plus grand et plus intelligent.

Cette révolution est basée sur une évolution constante de l'Internet, des technologies et des logiciels, des protocoles de communication, des capteurs embarqués qui ne cessent d'être améliorés, des objets physiques de plus en plus intelligents et capables de fournir des informations et de percevoir en temps réel leur environnement. L'IdO peut être vu sous deux angles, soit centré sur l'Internet ou centré sur l'objet. Quand elle est centrée sur l'Internet, les services sont la composante principale de son architecture et les objets contribuent en l'alimentant par des données. Lorsqu'elle est centrée sur l'objet, le centre de l'architecture devient l'objet et on parle de cloud des objets. Le cloud des objets apparaît donc comme une plateforme d'objets permettant un usage intelligent des infrastructures, des applications et de l'information à coûts réduits.

L'IdO repose sur un large panel de technologies, de protocoles, de réseaux et de concepts : des infrastructures réseaux, de nouvelles plateformes logicielles, matérielles et de services. L'IdO est en particulier associé à l'identification et la traçabilité via l'intégration des puces RFID (*Radio Frequency Identification Systems*) ; le web sémantique, les nanotechnologies, la mobilité, l'ubiquité, le *crowdfunding*. Cette mutation constante et évolutive des technologies et l'avènement de nouvelles plateformes, de nouveaux services et de nouvelles architectures entraînent de nouvelles perspectives, de nouveaux marchés avec des enjeux économiques, sociaux, politiques, éthiques, sécuritaires et réglementaires larges et variés .

Chapitre II : Internet des Objets

Nous pouvons citer comme défis à relever l'intégration et le partage de données sur des plateformes Cloud, la sécurisation des données personnelles des utilisateurs (liberté et confidentialité), la bonne gouvernance (transparente et démocratique), l'harmonisation des standards, des réseaux et les aléas de la compétition économique. La gestion de la chaîne logistique s'inscrit dans cette perspective et occupe une place prépondérante parmi les champs d'application de ces nouvelles technologies et concepts liés à l'IdO. Nous pouvons citer à titre d'exemple des problématiques traitées dans le domaine de la logistique, comme abordé dans, telles que l'aide à la gestion et à la prise de décision, l'optimisation des stocks, l'amélioration de la qualité de service, l'identification par radiofréquence, le suivi temps réel des produits et des processus. [GNI 14]

II.2: Définitions et concept

« L'Internet des Objets est une extension de l'Internet actuel à tous les objets pouvant communiquer, de manière directe ou indirecte, avec des équipements électroniques eux-mêmes connectés à l'Internet ». [WEI 10]

« l' internet des objets est un monde dans lequel les objets peuvent communiquer automatiquement avec des ordinateurs, entre eux, pour fournir des services au bénéfice de l'humanité ». [COU 10]

Le terme «internet des objets» a vu le jour il y a 20 ans dans le centre MIT auto-ID¹ et a marqué le début d'une ère nouvelle pour le commerce et l'industrie. En premier lieu, l'internet des objets était considéré comme une simple prolongation de l'identification par radiofréquence (RFID). Mais si l'on considère les possibilités actuelles d'évolutions et le nombre d'applications attenantes à l'interconnexion des objets, l'internet des objets apparaît davantage comme une révolution : durant le 19e siècle, les machines ont appris à exécuter des commandes, durant le 20e siècle, elles ont appris à penser, et durant le 21e siècle, elles apprendront à anticiper et à percevoir.

L'internet des objets se compose d'une série de nouveaux systèmes indépendants fonctionnant avec leurs propres infrastructures qui reposent en partie

Chapitre II : Internet des Objets

sur les infrastructures existantes de l'internet. Celui-ci peut être mis en relation avec des services.

Il couvre trois types de communication qui peuvent être établies dans des zones restreintes (« intranet des objets ») ou publiques (« internet des objets »):

- d'objet à personne;
- d'objet à objet;
- de machine à machine (M2M).

Couvrant actuellement plusieurs applications telles que:

- les téléphones portables munis d'une connexion internet et d'un appareil photo;
- les numéros de série uniques ou les codes-barres pour les produits pharmaceutiques;
- les compteurs électriques « intelligents » qui donnent un compte-rendu de la consommation en temps réel;

L'expression aurait été introduite pour la première fois par Kevin Ashton (un des fondateurs du MIT Auto-ID Center) durant une présentation en 1999 : "I could be wrong, but I'm fairly sure the phrase 'Internet of Things' started life as the title of a presentation I made at Procter & Gamble (P&G) in 1999", Kevin Ashton, RFID Journal, 22 June 2009. [CITC 13]

Le concept d'Internet des Objets exige la coordination des dispositifs suivants :

- une étiquette physique identifie chaque objet / une étiquette virtuelle identifie chaque lieu ;
 - un dispositif mobile (téléphone cellulaire, organiseur, ordinateur portable...) doté d'un logiciel additionnel, lit les étiquettes physiques ou localise les étiquettes virtuelles ;
 - un réseau sans fil relie le dispositif portable à un serveur contenant l'information relative à l'objet étiqueté ;
 - les informations sur les objets sont gérées dans des pages existantes du web ;

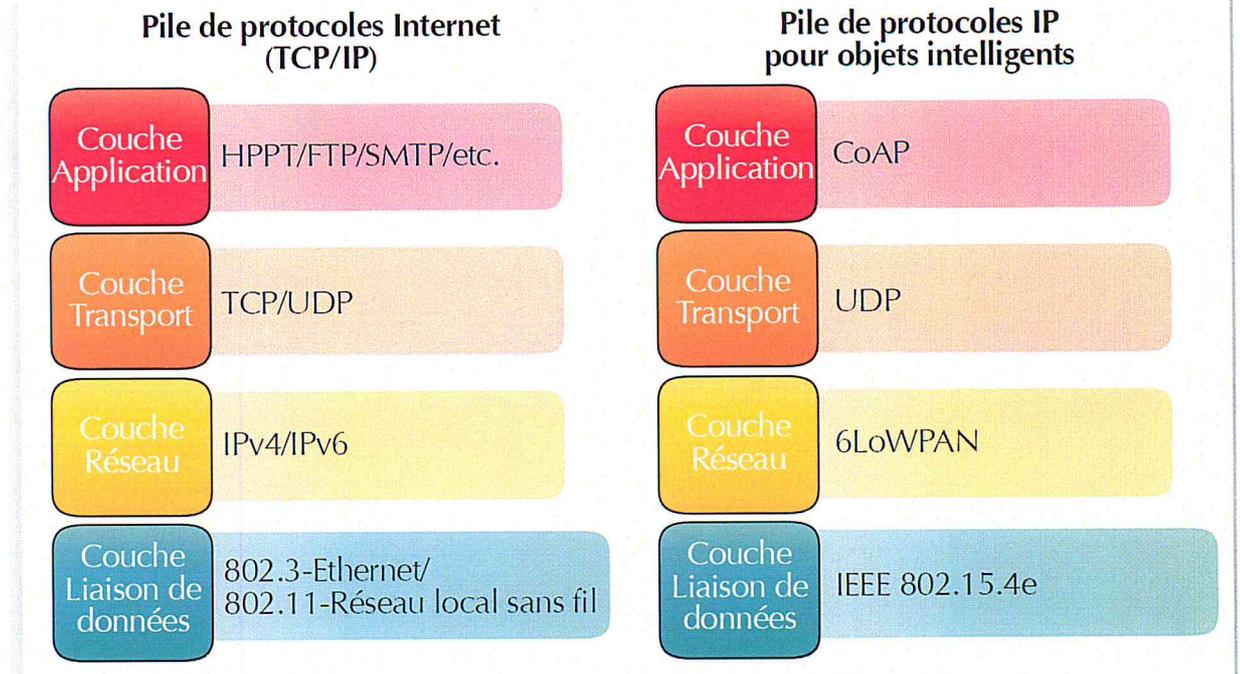


Figure 12: Comparaison de la pile tcp/ip traditionnelle et de la pile ip pour objets intelligents[ARL 13]

II.3.1: Le standard IEEE 802.15.4

Les PAN (*Personal Area Network*) regroupent des équipements contrôlés par un seul utilisateur sur de faibles distances (une dizaine de mètres).

La norme 802.15 de l'IEE définit les PAN sans fil appelé WPAN (*Wireless PAN*) dont les technologies sont le Bluetooth, les normes IEEE 802.15.3 (*WPAN haut débit*) et IEEE 802.15.4 (*WPAN faible débit ou Low Rate*). Le 802.15.4 est un protocole de communication destiné aux réseaux sans fil de la famille des LR WPAN (*Low Rate Wireless Personal Area Network*) du fait de leur faible consommation, de leur faible portée et du faible débit des dispositifs utilisant ce protocole. Il permet ainsi de proposer une autonomie énergétique de plusieurs mois, voire plusieurs années.

Le 802.15.4 est utilisé par de nombreuses implémentations basées sur des protocoles propriétaires comme le ZigBee ou sur IP comme le 6LoWPAN.

Chapitre II : Internet des Objets

Le tableau suivant positionne les caractéristiques des réseaux *Low Rate Wireless Personal Area Network* par rapport aux autres types de réseaux sans fils.

Protocole	LR WPAN	Bluetooth	Wifi
IEEE	802.15.4	802.15.1	802.11a/b/g
Besoins mémoire	4-32 Kb	250 Kb +	1 Mb +
Autonomie avec pile	Années	Jours	Heures
Nombre de nœuds	65 000+	7	32
Vitesse de transfert	250 Kb/s	1 Mb/s	11-54-108 Mb/s
Portée	100 à 1600 m	10-100 m	300 m

Figure 13 : LR WPAN Vs Autres réseaux sans fils

Le protocole 802.15.4 propose comme fonctionnement une topologie réseau en étoile, maillée ou en point à point.

La couche physique (PHY) contient l'émetteur/récepteur radio (RF), avec un mécanisme de contrôle de bas niveau (contrôle de la qualité du signal, détection d'énergie). Les fréquences basses permettent d'avoir une plus grande portée grâce à une plus faible perte de propagation. Les plus grandes provoquent des sorties plus élevées, une plus faible latence et des cycles de travail plus courts. La couche liaison ou MAC (*Medium Access Control*) définit la méthode d'échange des trames entre les éléments du réseau. Chaque élément est identifié par une adresse MAC spécifique au protocole (*attention : le format de ces adresses n'est pas le même que celui de l'adresse MAC utilisée sur un réseau Ethernet*). Cette couche liaison offre un mécanisme de contrôle d'erreur permettant de vérifier l'intégrité des trames. Il s'agit là d'une différence fondamentale avec le standard Ethernet. En effet Ethernet ne propose aucun système de détection ou de correction d'erreurs, cette tâche étant laissée aux protocoles de transports de niveau supérieur.

Chapitre II : Internet des Objets

La spécification 802.15.4 fournit des fonctions de sécurité au niveau de la couche de liaison, ce sont les suivantes :

- Contrôle d'accès.
- Intégrité des messages.
- Confidentialité des messages.
- Protection contre le rejeu

Ces éléments sont paramétrés au niveau d'un champ « Security Suite » au niveau des trames des messages MAC. On peut activer l'une, plusieurs ou toutes les fonctions, basée sur des algorithmes de chiffrement AES (*Advanced Encryption Standard*). [INH 14]

II.3.2: 6lowPan

IPv4 et IPv6 sont efficaces pour la délivrance de données pour les réseaux locaux, les réseaux métropolitains et les réseaux étendus comme l'internet. Cependant, ils sont difficiles à mettre en oeuvre dans les capteurs en réseaux et autres systèmes contraints en raison, notamment, de la taille importante des en-têtes.

6LoWPAN, en fait abréviation de « *IPv6 Low Power Wireless Personal Area Network* », a été conçu pour permettre à IPv6 d'intégrer ces matériels informatiques contraints et les réseaux qui les interconnectent 6LoWPAN définit en particulier des mécanismes d'encapsulation et de compression d'en-têtes permettant aux paquets IPv6 d'être envoyés ou reçus *via* le protocole de communication pour réseaux radio IEEE 802.15.4.

Le standard 6LowPan ne prévoit pas de fonctions de sécurité en plus de celles potentiellement mises en oeuvre au niveau du 802.15.4 et de IP V6. [INH 14]

a. *Format des adresses*

On cherche à obtenir un identifiant d'interface IPv6.

Chapitre II : Internet des Objets

L'identifiant d'interface pour une interface IEEE 802.15.4 peut être basée sur l'identifiant EUI-64 assigné au composant 802.15.4. Dans ce cas l'identifiant d'interface est formé selon la spécification « IPv6 sur Ethernet » [RFC2464].

Tous les dispositifs 802.15.4 ont une adresse IEEE EUI-64 mais des adresses courtes sur 16 bits sont également possibles. Dans ce cas, une pseudo adresse sur 48 bits est ainsi formée:

D'abord les 32 bits de gauche comprennent 16 bits à zéro et le PAN ID de 16 bits si on le connaît.

On concatène ensuite ces 32 bits avec les 16 bits de l'adresse courte. On obtient donc une adresse sur 48 bits:

16_bit_PAN:16_zero_bits:16_bit_short_address

L'identifiant d'interface est alors formé à partir de ces 48 bits en accord avec la spécification "IPv6 over Ethernet" [RFC2464]. Cependant, le bit « U/L » Universal/Local doit être mis à zéro en corrélation avec le fait que ce n'est pas une valeur globale unique.

L'adresse de liaison locale IPv6 [RFC4291] pour une liaison locale est formée en ajoutant II

(Interface Identifier) au préfixe FE80::/64.

b. Couche d'adaptation

Il est nécessaire de disposer d'une couche d'adaptation notamment pour adapter des paquets IPv6 dont le MTU est de 1280 dans des trames dont le MTU est de 127 octets.

Les formats décrits ici sont la charge dans le PDU (Protocol Data Unit) de la couche MAC de IEEE 802.15.4. La charge LoWPAN (soit un paquet IPv6) suit un en-tête d'encapsulation.

Tous les datagrammes encapsulés transportés sur 802.15.4 sont préfixés par une pile d'en-tête. Chaque en-tête contient d'abord un type d'en-tête.

Les types d'en-tête sont les suivants:

Chapitre II : Internet des Objets

Code	Type	Description
00 xxxxxx	NALP	Not a LoWPAN frame
01 000001	IPv6	Uncompressed IPv6 Addresses
01 000010	LOWPAN_HC1	LOWPAN_HC1 compressed IPv6
01 010000	LOWPAN_BC0	LOWPAN_BC0 broadcast
01 111111	ESC	Additional Dispatch byte follows
10 xxxxxx	MESH	Mesh Header
11 000xxx	FRAG1	Fragmentation Header (first)
11 100xxx	FRAGN	Fragmentation Header (subsequent)

Figure 14 : Types d'en-tête 6LoWPAN

Les valeurs comme 01 000011 sont réservées pour des usages futures.

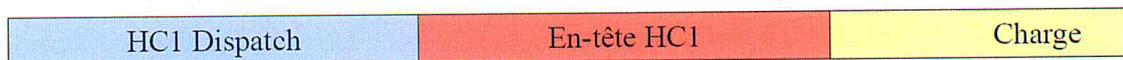
Le type Dispatch est défini par la séquence 01 comme bits 0 et 1. Suit ensuite un sélecteur sur 6 bits permettant d'identifier le type de l'en-tête suivant.

Le type NALP permet d'interopérer avec d'autres types de réseau. ESC signifie que l'en-tête suivant est un simple champ de 8 bits pour la valeur Dispatch. Il permet des valeurs Dispatch plus grandes que 127. Si plus d'un seul en-tête LoWPAN se trouve dans même un paquet alors ils doivent être dans l'ordre suivant:

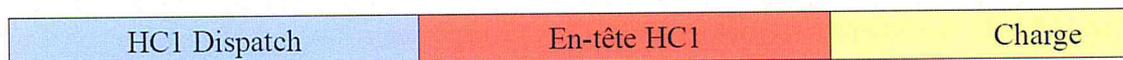
Mesh Addressing Header

Broadcast Header

Fragmentation Header



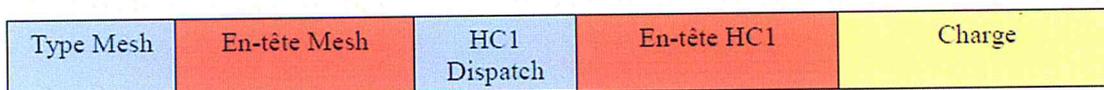
Un datagramme Ipv6 avec un en-tête 6LoWPAN compressé.



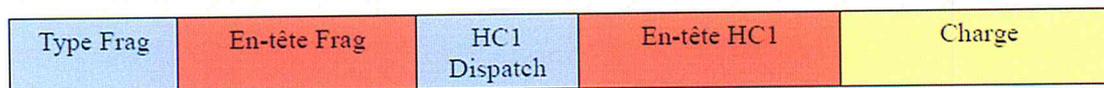
Un datagramme Ipv6 avec un en-tête 6LoWPAN compressé.

Figure 15 : Datagramme Ipv6 avec une en-tête 6LoWPAN compressé

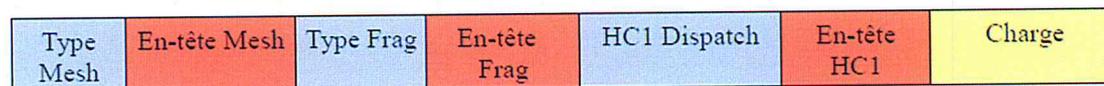
Chapitre II : Internet des Objets



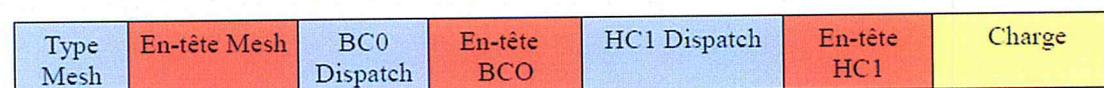
Un datagramme Ipv6 avec un en-tête 6LoWPAN compressé et un adressage mesh.



Un datagramme Ipv6 avec un en-tête 6LoWPAN compressé avec fragmentation.



Un datagramme Ipv6 avec un en-tête 6LoWPAN compressé avec fragmentation et adressage mesh.



Un datagramme Ipv6 avec un en-tête 6LoWPAN compressé, un adressage mesh et du multicast/diffusion.

Figure 16 : Probable datagramme Ipv6 et leurs en-tête 6LoWPAN

(a) Type Mesh

Le type mesh est indique par la valeur 1 0 des deux premiers bits.

1	1	1	1	4	16 ou 64	16 ou 64
1	0	V	F	HopLft	Adresse source	Adresse destination

Figure 17 : Indication du type Mesh

Le bit V précise le type de l'adresse source et le bit F la longueur de l'adresse destination.

V	F	Adresse source	Adresse destination
0	0	Adresse EUI-64	Adresse EUI-64
1	0	Adresse courte sur 16 bits	Adresse EUI-64
0	1	Adresse EUI-64	Adresse courte sur 16 bits
1	1	Adresse courte sur 16 bits	Adresse courte sur 16 bits

Figure 18 : Différentes significations des valeurs de V et de F

Le champ HopLft sur 4 bits doit être décrémenté par chaque nœud ou il transite avant d'effectuer un nouveau saut. Si cette valeur atteint 0, le paquet est abandonné.

Chapitre II : Internet des Objets

La valeur 0x0F est réservée et indique qu'un saut long sur 8 bits suit permettant un nombre de sauts plus grand que 14. Les adresses sont celles de la couche liaison.

(b) Type fragmentation

Si la charge utile d'un datagramme ne peut être contenue dans une trame 802.15.4, elle doit être fragmentée et chaque fragment doit être précédé d'un en-tête de fragmentation.

L'offset d'un fragment ne peut être qu'un multiple de 8 donc tous les fragments sauf le dernier doivent avoir une longueur multiple de 8. Le premier fragment doit avoir le format d'en-tête suivant :

1	1	1	1	1	11	16
1	1	0	0	0	Taille du datagramme	Tag du datagramme

En-tête Fragmentation (Paquet 1)

Tous les fragments suivants ont le format:

1	1	1	1	1	11	16	8
1	1	1	0	0	Taille du datagramme	Tag du datagramme	Offset

En-tête Fragmentation (Paquets suivants)

Figure 19 : Format d'en-tête du premier fragment et du suivant

La longueur est celle du paquet entier avant fragmentation. Elle doit être la même pour tous les fragments de la charge. Le tag doit être le même pour tous les fragments d'une même charge utile d'un datagramme IPv6.

L'offset est un incrément de 8 octets. Le premier octet du datagramme soit le début de l'en-tête Ipv6 a un offset de 0.

(c) Compression des en-têtes Ipv6 et en-tête HC1

L'en-tête IPv6 ayant une longueur de 40 octets et certaines informations étant redondantes avec notre couche adaptation, il peut être intéressant de le compresser. La version est toujours 6 et peut être supprimée. Si les identifiants d'interface des

Chapitre II : Internet des Objets

adresses source et destination sont dérivés des EUI-64, on peut toujours les retrouver. Seul le champ Hop Limit (8 bits) ne peut être éludé ou compressé.

Un en-tête IPv6 peut être compressé en trois octets dans le plus favorable des cas.

NH1 (8 bits)	2	2	1	2	1	8
0 1 0 0 0 0 1 0	Adresse source	Adresse destination	TF	Next Header	HC2	Ipv6 Hop limit

En-tête de compression HC1

Figure 20 : En-tête de compression HC1

Les champs Adresse (source et destination) décrivent le format de compression de l'adresse correspondante sur deux bits. Si le préfixe est absent, on présume que l'on est sur le lien local et si l'identifiant d'interface est absent, on le dérive de l'adresse de la couche d'adaptation ou du champ " Mesh Addressing " si un en-tête Mesh est présent.

Adresse HC1	
00	Préfixe et Identifiant d'interface sont présents.
01	Préfixe présent et Identifiant d'interface supprimé.
10	Préfixe absent et Identifiant d'interface présent.
11	Préfixe et Identifiant d'interface sont absents.

Compression HC1 des adresses

Le bit 4 TF précise si les champs Traffic Class et Flow Label sont compressés.

TF	
0	Pas de compression.
1	Trafic Class et Flow Label valent 0.

Compression HC1 de TF et FL

Le champ " Next Header " permet de compresser le champ correspondant dans l'en-tête IPv6.

NH	
00	Pas de compression
01	UDP
10	ICMP
11	TCP

Compression HC1 de Next Header

Figure 21 : Compression de l'en-tête Ipv6

Le bit HC2 précise si l'en-tête suivant est lui-même compressé. On parle alors de compression HC2.

HC2	
0	Plus d'en-tête de compression
1	Compression HC2 fonction de NH.

Compression HC2 suivant

Figure 22 : Compression HC2 suivant

(d) Encodage des en-têtes UDP

Ceci est possible si HC2=1 et NH =01 dans l'en-tête de compression HC1. On parle ici d'encodage HC_UDP. Cet encodage permet de compresser les champs suivants de l'en-tête UDP: port source, port destination et longueur. Le champ "checksum" ne peut être compressé.

1	1	1	5
Port source	Port destination	Longueur	Réservé

Compression HC_UDP d'un en-tête UDP6

Figure 23 : Compression HC_UDP d'un en-tête UDP6

Les ports source et/ou destination peuvent être compressés sur 4 bits. Dans ce cas, les champs "Port source" et/ou "Port destination" de l'en-tête valent 1. Le port est calculé en prenant:

Port = P + valeur sur 4 bits ou P vaut 0xF0B0 (61616), un des ports UDP les plus utilisés.

Port	
0	Pas de compression
1	Port sur 4 bits

Compression HC_UDP des ports

Figure 24 : Compression HC_UDP des ports

Le bit Longueur précise si la longueur est compressée. Dans ce cas, le champ "Longueur" de l'en-tête UDP est égal à la longueur de la charge utile dans l'en-tête IPv6 moins la longueur de tous les en-têtes d'extension entre l'en-tête IPv6 et l'en-tête UDP.

Longueur	
0	Pas de compression
1	Compression

Compression HC_UDP du champ "Longueur"

Figure 25 : Compression HC_UDP du champ "Longueur"

II.3.3: UDP : User Datagram Protocol

Le protocole UDP permet de transporter des datagrammes au-dessus de IP dans un mode non connecté. C'est un protocole qualifié de non fiable. Dans IPv6, le checksum devient obligatoire, ce qui va entraîner la création du protocole UDP-Lite.

0	15	16	31
Port source		Port destination	
Longueur		Checksum	
Charge			

En-tête UDP

Figure 26 : En-tête UDP

La longueur est celle de l'en-tête plus la charge.

UDP-lite (Lightweight User Datagram Protocol):

UDP-lite permet de remonter aux couches supérieures des données erronées pendant leur transport. Si dans un environnement informatique, une erreur peut avoir des conséquences relativement graves quant à l'intégrité des données et il est normal de rejeter ces paquets, or, la plupart des décodeurs de flux multimédias sont capables

Chapitre II : Internet des Objets

de supporter un certain nombre d'erreurs binaires dans un flux de données. Pour améliorer la qualité perçue par l'utilisateur, il est donc préférable d'accepter des paquets erronés plutôt que de rejeter un bloc complet d'information.

En IPv4, l'utilisation du checksum UDP étant optionnelle (la valeur 0 indique que le checksum n'est pas calculé), UDP peut être utilisé pour transporter des flux multimédia. Avec IPv6, l'utilisation du checksum a été rendue obligatoire puisque le niveau 3 n'en possède pas. Pour éviter qu'un paquet comportant des erreurs ne puisse pas être remonté aux couches supérieures, le protocole UDP-lite a été défini RFC 3828. Les modifications sont minimales par rapport à UDP.

0	15	16	31
Port source		Port destination	
Couverture du checksum		Checksum	
Charge			

En-tête UDP-lite

Figure 27 : En-tête UDP-Lite

La couverture du checksum est le nombre d'octets à partir du premier octet de l'en-tête couverts par le checksum. L'en-tête UDP-Lite doit toujours être couvert par le checksum. Un checksum de 0 indique que le paquet entier est couvert par le checksum. [LAN 09]

II.3.4: Le protocole applicatif COAP

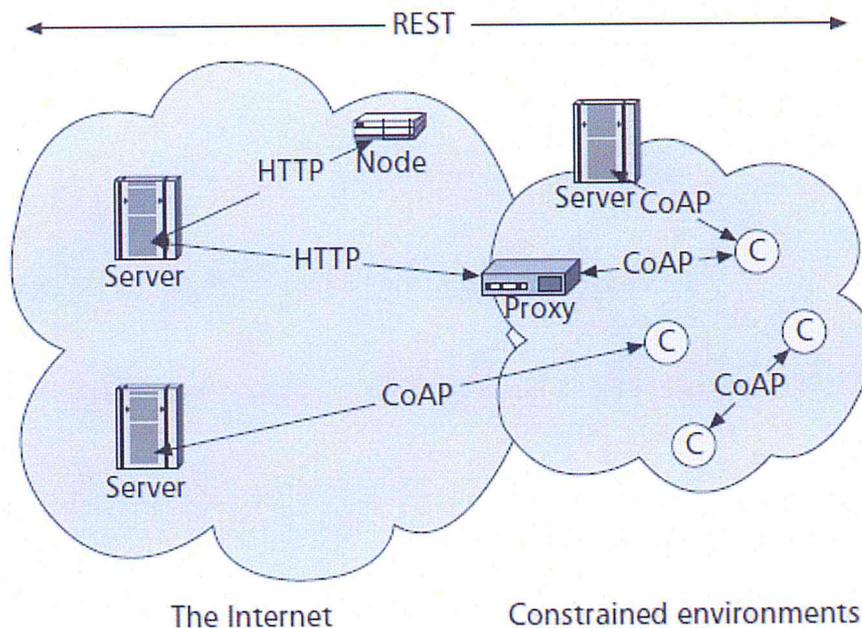


Figure 28 : Environnement RESTful contraint

L'IETF a récemment créé un nouveau groupe de travail : Constrained RESTful Environment CORE. L'objectif de ce groupe est d'étendre l'architecture web aux applications Machine to Machine M2M utilisant des systèmes contraints.

Pour cela, le groupe a défini COAP, un protocole de communication générique optimisé pour les architectures contraintes. Ce protocole peut être défini comme un sous-ensemble de HTTP dont le coût d'utilisation a été réduit.

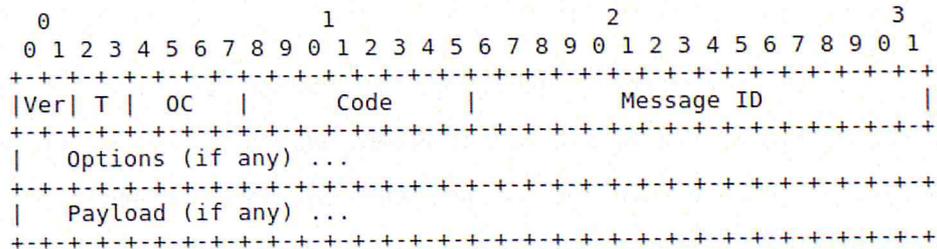
a. Les caractéristiques du protocole

Comme dit précédemment, COAP est le protocole utilisé dans un environnement contraint, nous allons voir les caractéristiques qui font de lui le protocole adapté pour ce milieu.

Les principales caractéristiques de COAP sont les suivantes :

Chapitre II : Internet des Objets

- Une en-tête concise : Le protocole a une en-tête de base de seulement 4Ko et une taille totale de 10 à 20 Ko selon les requêtes (en ajoutant les options et les données).



En-tête du protocole COAP

Figure 29 : En-tête du protocole COAP

- Gestion des méthodes : COAP met à disposition les requêtes GET, PUT, POST et DELETE. Ces méthodes vont pouvoir être utilisées par le client pour accéder aux données. Leur utilisation est similaire à celle de HTTP.
- Les URIs : Le protocole supporte les Uniform Resource Identifier ce qui va permettre de spécifier la cible grâce à un nom d'hôte, un port, un chemin et un paramètre de requête. Voici un exemple d'URI COAP :
`coap://example.net/.well-known/core ?n=Light`
- Le type de contenu : Le protocole permet de transporter des données d'usages différents en mettant dans l'en-tête le type de données de la charge utile.
- La découverte de ressources : La découverte de ressources est un besoin-clé dans une architecture web et notamment pour les applications M2M. En effet, cette recherche doit être autonome et ne doit pas avoir besoin d'une interaction humaine. Les serveurs COAP doivent pouvoir fournir une URI afin que le serveur puisse être découvert.

Chapitre II : Internet des Objets

requête du client a bien été reçue, les réponses en 4.xx indiquent que le client a envoyé une mauvaise requête et les réponses en 5.xx indiquent qu'il y a eu une erreur au niveau du serveur.

Le message COAP peut être accompagné d'une multitude d'options. Elles sont identifiées par un numéro et sont séparées en deux catégories :

- les critiques : le nœud qui reçoit le message avec cette option a besoin de comprendre cette option pour répondre au message.
- les facultatives : si le nœud ne comprend pas l'option, il peut tout simplement l'ignorer.

Le protocole COAP supporte différents formats de charge utile. Le format est déterminé grâce à l'option critique Content-type. Il supporte notamment le xml et le json. Le challenge est de trouver un format de charge utile le plus adapté à l'environnement contraint. Différents formats ont été proposés, le protocole COAP supporte l'un d'eux : Efficient XML Interchange

c. Exemple de communication COAP

Pour mieux comprendre le fonctionnement de COAP, nous allons voir un exemple de communication entre un client et un serveur.

Etape 1 : Le client envoie une requête GET avec un id = 123, de type confirmable CON et avec une uri-query = /light.

Etape 2 : Le serveur répond par un 2.00 OK avec le même id que le client, de type acquittement ACK et avec comme charge utile la réponse à la requête (non visible ici)

Chapitre II : Internet des Objets

Etape 3 : Le client envoie une requête GET avec un id = 124, de type confirmable CON et avec une uri-query = /humidity.

Etape 4 : Le client retransmet la requête car le serveur n'a pas répondu dans les délais. Il y a eu un timeout

Etape 5 : Le serveur répond par un 2.00 OK avec le même id que le client, de type acquittement ACK et avec comme charge utile la réponse à la requête (non visible ici). [VIP 12]

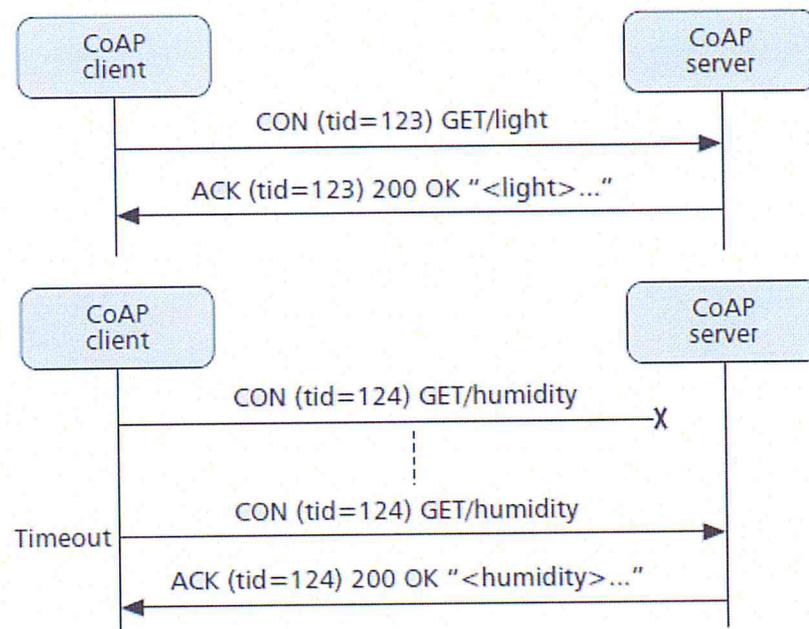


Figure 30 : Exemple de communication client / serveur COAP

II.4: Les difficultés et les obstacles qui freinent l'IoT

Plusieurs obstacles pourraient toutefois ralentir la progression de l'IoT, notamment le déploiement du protocole IPv6, l'alimentation des capteurs et la définition de normes.

Le déploiement du protocole IPv6 : Nous avons atteint le nombre maximal d'adresses IPv4 en février 2010. Si cela n'a pas eu d'incidence visible pour le grand public, le développement de l'IoT pourrait s'en trouver ralenti, puisque chacun des milliards de nouveaux capteurs potentiels devra avoir sa propre adresse IP. En outre, le protocole IPv6 facilite la gestion des réseaux grâce à des fonctions de configuration automatiques, et propose des fonctions de sécurité améliorées.

L'alimentation des capteurs : Pour que l'IoT puisse dévoiler tout son potentiel, les capteurs devront être autosuffisants. Imaginez qu'il faille changer les piles de milliards d'appareils déployés aux quatre coins de la planète et même dans l'espace. Cela serait évidemment impossible. Nous devons donc trouver un moyen de générer de l'électricité en puisant dans l'environnement, par exemple en utilisant les vibrations, la lumière et les courants d'air. La 241^e foire-exposition de l'American Chemical Society (société américaine de chimie) de mars 2011 a été marquée par une avancée significative : des scientifiques ont annoncé la création d'un nanogénérateur viable sur le plan commercial. Il s'agit d'une puce flexible capable de générer de l'électricité à partir de mouvements corporels tels qu'un pincement de doigt.

« Ce progrès [le nanogénérateur] représente un jalon important dans le développement de composants électroniques portables alimentés au moyen de gestes corporels, sans batterie ni prise électrique. Nos nanogénérateurs sont sur le point de transformer nos vies. La seule limite à leur potentiel est notre imagination. » **Zhong Lin Wang**, *Responsable scientifique, Georgia Institute of Technology (États-Unis)*

Les normes : D'énormes progrès ont déjà été accomplis dans le domaine des normes, mais le chemin à parcourir est encore long, notamment dans les domaines de la sécurité, de la confidentialité, de l'architecture et des communications. Tout comme l'IEEE, de nombreux organismes s'efforcent de relever ces défis en

s'assurant que les paquets IPv6 peuvent être acheminés sur différents types de réseau. [EVA 11]

II.5: Les applications actuelles de l'Internet des Objets

Citons quelques applications déjà opérationnelles :

- suivi de l'acheminement des objets (courriers postaux, transports routiers, maritimes et aériens) ;
- connaissance de la composition des produits, en particulier des produits sensibles (pharmaceutiques) ;
- suivi de l'utilisation et de l'état des objets après leur acquisition par le client ;
- sécurité des transfusions sanguines (contrôle de la compatibilité).

Évoquons des applications expérimentales plus originales.

- Le Web napperon (prototype développé par Érasme – département du Rhône) facilite l'accès des personnes âgées ou handicapées à des applications informatiques : On associe des étiquettes RFID à des objets familiers (photos, CD, boîtes de médicaments...) qu'il suffit de placer sur un lecteur, en forme de napperon, pour afficher sur un écran aux informations relatives à cet objet.
- La montre verte couplée à un téléphone mobile, capte des données environnementales (niveau sonore, taux d'ozone...) en différents lieux avant de les transmettre à un central qui les traite en temps réel

II.6: Les domaines de l'Internet des Objets

Dans le cadre du Développement Durable, l'Internet des Objets est appelé à jouer un rôle important dans différents secteurs de notre environnement :

- entreprises : logistique cycle de vie des objets ;
- transports : suivi des acheminements ;
- espace urbain : surveillance, circulation ;
- services publics : communications, énergie, santé ;
- services à la personne ; sécurité ;
- domicile : confort, économies d'énergie, domotique.

II.7: Internet des objets au service de l'agriculture ou l'agriculture connectée

L'internet des objets est entrain de profondément modifier l'agriculture. Si « **Internet of Things** » tend à devenir “**Internet of Everything**” il faut alors souligner quels pourraient être ses éventuelles propositions pour le monde agricole.

A échelle professionnelle ou pour les plus amateurs d'entre nous, de nombreux objets connectés nous sont maintenant proposer pour produire plus et mieux. Prenons le cas des capteurs intelligents ; l'usage de ces capteurs s'est largement répandu et a permis de rapidement remplacer l'intuition humaine pour de nombreuses tâches quotidiennes. Ainsi par exemple, les prévisions météorologiques, l'arrosage ou la surveillance des cultures sont de plus en plus confiés à des systèmes autonomes, automatisés et connectés en réseau sur l'internet afin de répondre aux attentes en temps réel.

Les méthodes traditionnelles qui composent majoritairement l'agriculture, tendent ainsi petit à petit à laisser la place à des méthodes modernes, centrées sur l'optimisation des rendements et la productivité agricole. Vu l'intérêt de l'internet des objets vis-à-vis de l'agriculture, de nombreuses sociétés se sont lancées dans la confection d'accessoires intelligents, adaptés aux besoins spécifiques du secteur agricole.

Chapitre II : Internet des Objets

A titre d'exemple, voici les objets connectés, robot et drone qui ont été conçus pour exécuter une ou des tâches agricoles bien précises [MOC15] :

a. *Le robot carré Anatis :*



Figure 31 : Robot Anatis

Anatis est un robot agricole connecté agro écologique qui assiste les maraichers dans leur quotidien en réalisant l'entretien des cultures par binage automatique. Le robot Anatis sert aussi d'aide à la décision dans le suivi des cultures et émet un rapport de synthèse pour chaque parcelle avec un ensemble de données permettant à l'agriculteur maraicher d'anticiper la gestion de ses cultures. Le robot Anatis est un assistant autonome qui peut être relié à un Smartphone ou à une tablette.

b. *Drone eBee de Sensefly :*



Figure 32 : Drone ebee

Proposé par **Airinov**, le drone SenseFly eBee permet de survoler les cultures à basse altitude afin d'analyser la régularité de la pousse. En fonction des densités et des couleurs, les données fournies par le drone eBee peuvent permettre de déterminer sur quelles portions de cultures il est nécessaire d'intervenir en diffusant de l'engrais ou en intensifiant l'arrosage des cultures.

Chapitre II : Internet des Objets

Il est le drone agricole le plus facile à utiliser du marché, il suffit de le lancer en l'air pour le faire décoller. Il va ensuite acquérir les images et venir atterrir automatiquement à la fin de sa mission de surveillance.

L'agriculteur peut reprogrammer son plan de vol à tout moment et le drone eBee peut couvrir jusqu'à 120 ha en un seul vol. En survolant les champs à basse altitude, le drone eBee peut obtenir une résolution inférieure à 1,5 cm/pixel.

c. *Smart Watering System* :

C'est un ensemble de 3 éléments : contrôleur d'eau, capteur pour plantes et le bridge Internet permettant de garantir la communication avec l'application mobile dédiée.

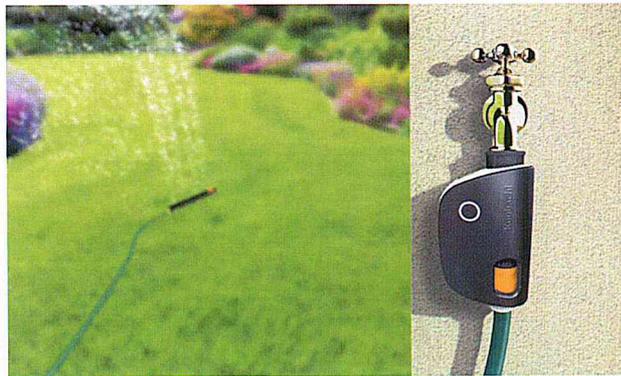


Figure 33 : Smart Watering System

Ce système d'irrigation Smart Watering régule automatiquement l'hydratation des plantes grâce au capteur Wifi Plant Sensor afin de réguler l'apport en eau en prenant notamment en compte les conditions météo, le type de plante surveillé, le type de sol, etc.

Le Smart Watering System de *Koubachi* (est connu pour la famille de capteurs connectés et destinés à prendre soin de vos plantes lorsque vous êtes loin ou tout simplement étourdi.) se fixe sur le robinet du tuyau d'arrosage et embarque même un accéléromètre pour capter les mouvements. Grâce à une valve de régulation de l'eau et à un système de communication en 6LowPAN, il possède une autonomie d'environ 1 an. Grâce à l'application mobile, vous pouvez déclencher manuellement l'arrosage, même si l'intérêt du système est plutôt à l'autorégulation. Selon Koubachi, l'arrosage automatique via Smart Watering System permettrait de réaliser en moyenne 40% d'économie d'eau.

Chapitre II : Internet des Objets

Voilà en quelques mots les innovations technologiques dans l'agriculture qui devraient pousser les méthodes de production à la demande mais aussi permettre de réduire la consommation abusive d'eau, l'un des fléaux de l'agriculture intensive moderne.

L'objectif de notre projet de fin d'étude, est de contribuer dans le secteur agricole en concevant et en réalisant un système d'irrigation intelligente à l'appui de l'internet des objets.

II.8: Conclusion

Ce chapitre met fin à la partie théorique dans laquelle nous avons passé en revue l'irrigation et l'internet des objets.

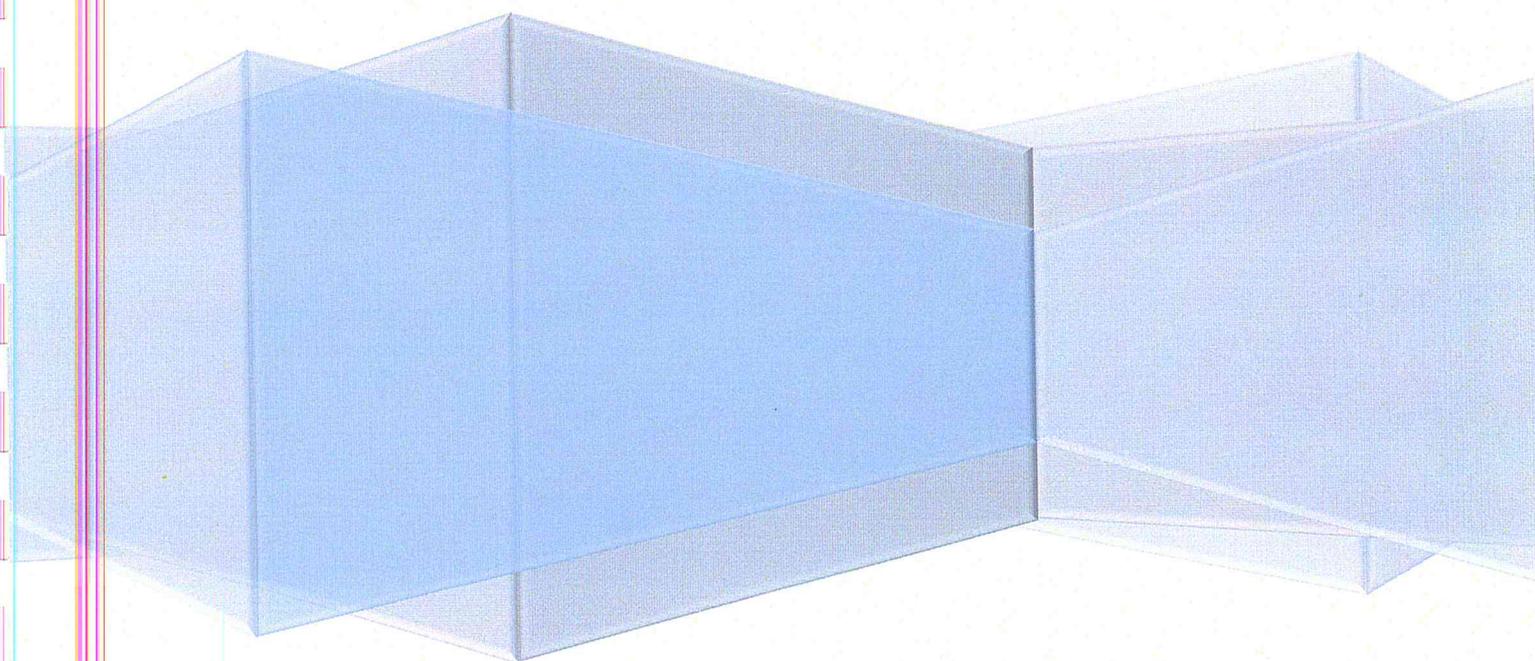
Ce chapitre nous a aidé à mettre en avant cette technologie intégrant des objets usuels au monde d'internet à savoir l'internet des objets. Nous y avons abordé le concept de l'internet des objets et proposé les diverses définitions rencontrées sur la toile.

Nous avons aussi décidé de parler des standards et protocoles qui régissent les communications entre objets au sein du réseau internet.

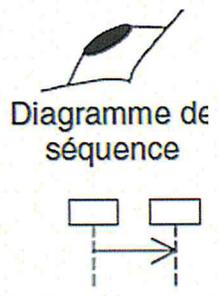
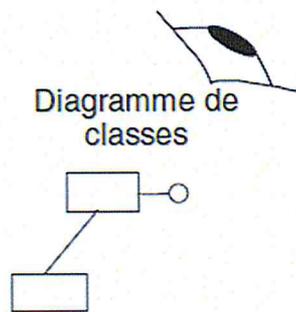
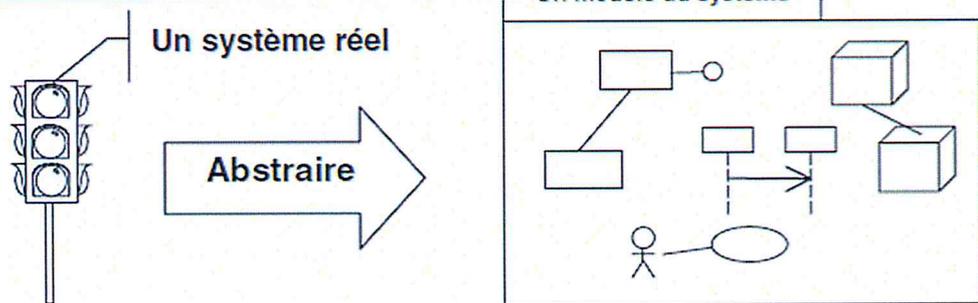
Nous avons en plus présenté les limites que rencontre ce concept, les domaines d'applications ainsi que les applications actuelles utilisant la technologie de l'internet des objets et nous avons fini en présentant un lien entre l'internet des objets et l'agriculture tout en précisant le service que l'internet des objets offre à l'égard du secteur agricole.

Nous allons pouvoir entamer la partie pratique qui va se baser sur le prototype d'un système d'irrigation intelligente que nous avons mis au point.

PARTIE PRATIQUE



Chapitre III : Conception et Réalisation



III.1: Introduction

Nous entamons avec ce chapitre la partie pratique de notre projet. Après avoir donné des explications sur les deux grands aspects qui ont motivé le choix du projet à savoir l'irrigation en générale et l'irrigation intelligente en particulier pour un monde plus sûr pour les générations futures ainsi que l'internet des objets acteur qui tend jour après jour à devenir incontournable dans le monde numérique, nous allons maintenant parler de notre système d'irrigation automatique.

Dans ce chapitre, on abordera la problématique autour du système proposé, on décrira le système physique à savoir décrire un par un les composants matériels du système d'irrigation.

On parlera pour finir du système informatique derrière ce système d'irrigation automatique. On discutera de la modélisation du système informatique avec les diagrammes de classes, de cas d'utilisation et de séquences.

Chapitre III: Conception et réalisation du système d'irrigation automatique

III.2: Problématique

En Afrique, on constate un manque crucial des ressources en eau et les surfaces sont mal irriguées, or la demande a considérablement augmenté, multipliée par 4 au cours des 40 dernières années, à ce rythme la limite maximale du potentiel hydrique sera atteinte avant l'an 2050. Les ressources en eau sont limitées, vulnérables et inégalement réparties. De plus, elles ont subi durant ces dernières décennies les effets négatifs de la sécheresse, de la pollution et d'une utilisation irrationnelle. Les terres arides représentent 60 pour cent de la couverture terrestre en Afrique. Les précipitations, la productivité primaire et la biodiversité sont liées. Plus de 40 pour cent de la population africaine vit dans des zones arides, semi-arides et sèches. Des millions de personnes en Afrique souffrent de pénurie d'eau l'année durant. La rareté de l'eau n'est pas causée uniquement par la géographie: la croissance démographique, l'urbanisation rapide, la mauvaise planification et la pauvreté sont des facteurs significatifs. [BEL 14]

Voilà pourquoi une irrigation plus intelligente est à entreprendre dans notre agriculture. En tant qu'informaticiens quel peut être notre contribution dans cette lutte contre le gaspillage inutile de nos ressources en eaux ? On peut participer à la conception de dispositif d'irrigation automatique de plus en plus intelligent tenant en compte plusieurs facteurs comme l'humidité ambiante, la température, l'humidité du sol et bien d'autre. En tant qu'africains quel doit être notre contribution ? Concevoir ce genre de systèmes avec du matériel efficace mais encore bon marché : une chance que l'accès à internet est évolué ces dernières années.

En effet, Le nombre de personnes qui utilisent internet a été multiplié par 1,5 dans le monde entre 2005 et 2013. Ce sont les pays en développement qui ont connu la plus forte progression: pour 100 habitants, 7,8 avaient accès à Internet en 2005 contre 30,7 en 2013, soit quatre fois plus. La palme revient à l'Afrique où le nombre a été multiplié par 6,9 entre 2005 et 2013. Ce nombre de personnes utilisant internet est passé de 2,4 pour 100 habitants en 2005 à 16,3 pour 100 habitants en 2013. L'internet des objets pouvant être simplifié comme étant la connexion des objets

Chapitre III: Conception et réalisation du système d'irrigation automatique

usuels à internet et que d'ici 2020 environ 26 milliards d'objets seront connecté à internet, pourquoi alors ne pas commencer dès maintenant dans le domaine de l'agriculture. [OBS 14]

C'est dans cette optique que nous avons décidé de concevoir un système d'irrigation intelligente commercialisable, à prix réduit et facile à utiliser à travers une simple interface web. Il permettra à l'agriculteur de contrôler et/ou monitorer son système d'irrigation à distance. Dans ce chapitre, nous allons vous faire part du matériel et technologies utilisés ainsi que de la façon dont le système fonctionne.

- Objectifs a atteindre en concevant système d'irrigation intelligente

Avant de parler de la conception de notre dispositif à proprement parler, faisons un tour d'horizon sur les aspects important à prendre en compte lors de la conception d'un système d'irrigation intelligente :

- 1. Les frais d'utilisation:** Certains systèmes font payer les charges liées à la collecte de données météo ainsi un système banal peut vous couter très cher par mois ou par an. On aura tendance à choisir des systèmes qui après achat ne coute rien ou presque (connexion internet).
- 2. Facilité d'utilisation :** La plupart de ces systèmes se base sur le calcul de l'évapotranspiration pour déterminer si oui ou non il faut irriguer. Le problème avec ce procéder c'est que lors de l'utilisation du logiciel affilié au système il faut souvent avoir des notions assez complexes dans le domaine pour gérer le système. Il faudra donc concevoir des systèmes ne demandant pas beaucoup de paramètres en entré.
- 3. Détection de fautes et/ou de pannes :** Concevoir des systèmes intelligents. Concevoir un système capable de détecter des fautes logicielles mais aussi des pannes matérielles, et aussi capable de réparer ce qui lui est possible ou de désactiver les zones défectueuses mais avant tout capable de vous le faire savoir via sms ou mail.
- 4. Accès à distance :** Dans le monde actuel on a tendance à vouloir et pouvoir être partout en même temps (au travail, à la maison et pourquoi

Chapitre III: Conception et réalisation du système d'irrigation automatique

pas aussi dans son jardin). Il est donc nécessaire de se doter d'un système capable d'être accessible et gérer à distance.

5. **Garantie :** On investit dans de tel système sachant ou espérant qu'il se passera plusieurs années avant qu'il ne soit remplacé. Il serait plus astucieux d'acquérir un système possédant une garantie de 5 ans minimum. Donc en concevant son système il faudra s'assurer que les composants matériels et logiciels puissent tenir la route.
6. **Précision dans la collecte de données :** L'irrigation intelligente dépend de la précision des données qu'elle récolte. Assurez-vous que le système soit fiable et ait une précision sans faille dans la collecte des données environnementales.
7. **Facile à installer :** Lors de la conception d'un tel système, il faut s'assurer qu'il soit facilement installable sur des canalisations déjà existantes.
8. **Un accès administrateur basé sur le web et/ou le Cloud :** Il est beaucoup plus intéressant de posséder un système dont l'accès et la gestion à distance puisse se faire, de manière sécurisé bien sûr, via n'importe quel ordinateur ou smartphone connecté à internet.
9. **Retour sur investissement :** Le but d'un tel système est de consommer moins d'eau mais à quoi bon si on perd en payant des frais supplémentaires de maintenance et/ou de communication de données? Il faut concevoir des systèmes sans de telles charges mais aussi, si possible, des puits communautaires auxquels vous pourrez vendre l'eau sauvegardée.
10. **Rapport sur la consommation :** Chercher des systèmes vous communiquant régulièrement des rapports sur l'état de consommation de l'eau.

On peut, maintenant, vous parler de notre dispositif en commençant par une description du système informatique dudit dispositif.

III.3: Conception du système informatique

Parlons maintenant des fonctionnalités du prototype. Quels sont les choses que l'utilisateur peut faire à distance ? Nous avons conçu ce système pour qu'il soit le plus simple possible à utiliser pour un non initié. Une série de simples pages web jouent le rôle d'interface entre le dispositif physique et l'utilisateur. Mais alors derrière cette simplicité comment fonctionne le système informatique ? Comment l'avons-nous modélisé ? Essayons de répondre à ces questions.

III.3.1: Les métriques d'évaluation du système

L'Arduino reçoit des valeurs en entrées venant des différents capteurs, il doit faire un calcul pour l'envoyer au serveur et décider par la suite sur la sécheresse d'une zone ou non. Parmi les méthodes de calcul nous distinguons deux méthodes, il faut choisir entre la moyenne qui est la somme de l'ensemble des valeurs mesurées divisée par le nombre des capteurs ou la médiane qui est basée sur le stockage des valeurs représentées dans un tableau trié en ordre croissant, la valeur médiane correspond à la valeur qui se trouve au point milieu de cette liste ordonnée.

Les valeurs reçues par le CH sont normalisées, elles sont comprises entre 00 et 100 (valeurs d'humidité en %). Pour une zone sèche, l'humidité du sol est comprise entre 00 et 24 alors que pour une zone bien irriguée, l'humidité est comprise

entre 25 et 100.

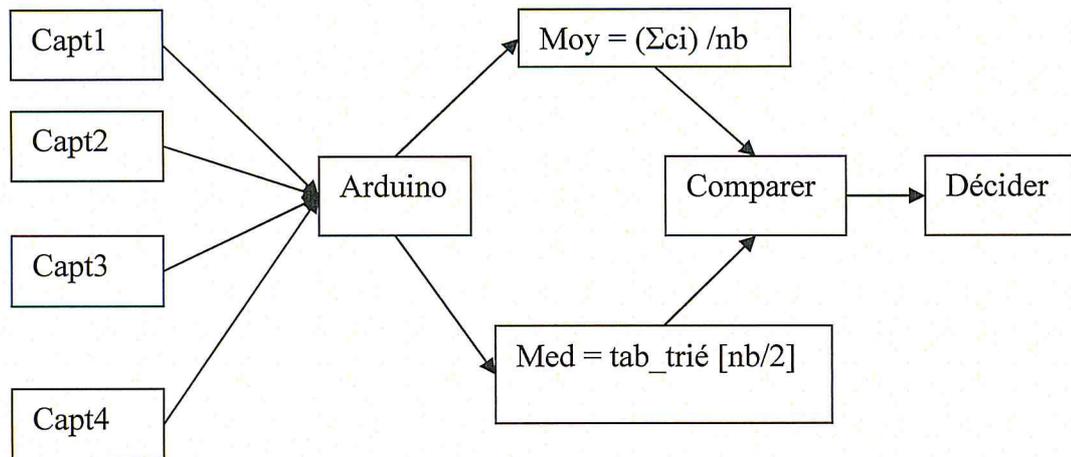


Figure 34: comparaison entre moyenne et médiane

Dans cette figure, « ci » est la valeur captée par le capteur i et « nb » représente le nombre des capteurs.

La valeur de la moyenne est approximativement proche des autres valeurs alors que la médiane peut avoir des fois une valeur éloignée par rapport aux autres valeurs captées. Nous pouvons dire que les valeurs de la moyenne sont plus objectives que ceux de la médiane.

On a jugé que le calcul par la moyenne est plus raisonnable du de point de vue pratique que la médiane, et nous donne une bonne estimation de l'état de la zone.

III.3.2: Architecture de la solution proposée et protocole de communication mise en place

Les objets dont il est question ici sont donc des sources de données, identifiés et identifiables de façon unique et ayant un lien direct ou indirect (via un concentrateur) avec Internet. Ils permettent de **collecter, stocker, transmettre et traiter des données** issues du monde physique.

Chapitre III: Conception et réalisation du système d'irrigation automatique

a. Architecture IoT du système informatique mise en place

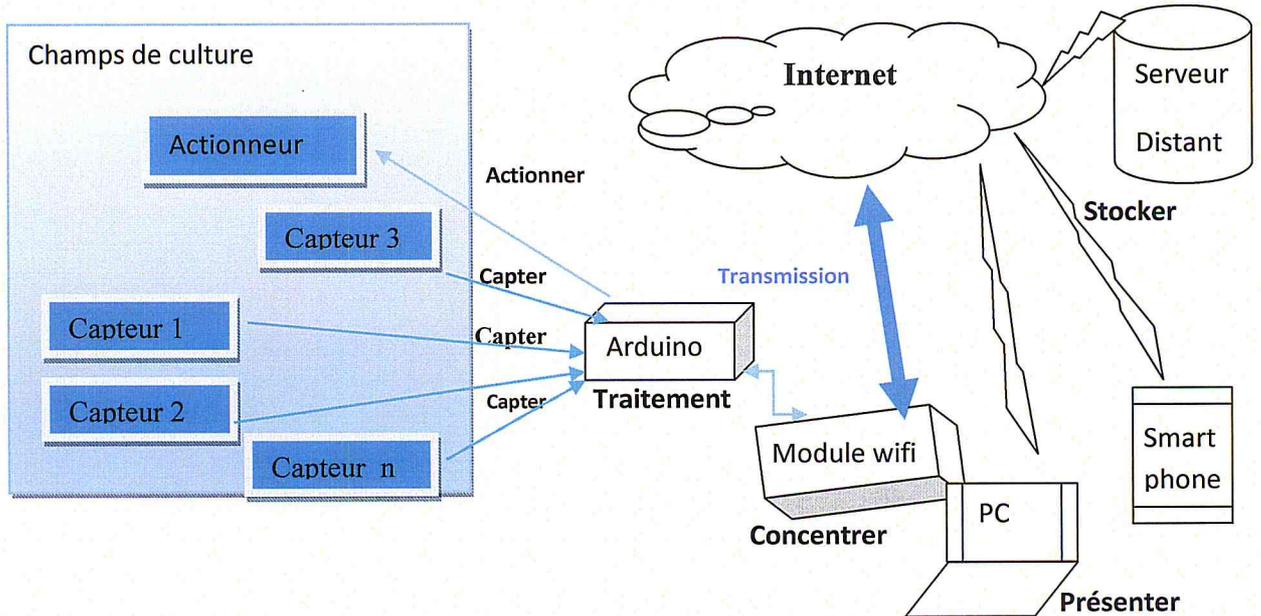


Figure 35: Architecture du système

Essayons d'expliquer un peu notre architecture :

- **Capter** : Les capteurs captent l'information relative à l'environnement et l'envoient à la carte Arduino.
- **Traitement** : Arduino traite l'information reçue et la transmet au module wifi
- **Concentrer** : le module wifi représente la porte d'entrée et de sortie du réseau local au monde internet d'où la flèche aller-retour (**Transmission**) entre arduino et le module wifi.
- **Stocker** : Le serveur distant sauvegarde les données reçues de l'arduino pour en fin servir les clients mobiles ou web à la demande
- **Présenter** : A partir d'un Smartphone ou ordinateur, on peut visualiser via une page web l'état de tout le système ou interagir avec lui
- **Actionner** : A partir des traitements faits par l'arduino, celui-ci peut juger d'alimenter ou stopper la valve via un actionneur (servomoteur).

Chapitre III: Conception et réalisation du système d'irrigation automatique

b. Protocole de communication utilisé

Le protocole de communication utilisé par notre système d'irrigation intelligente pour échanger les données relatives à la température, humidité du sol, luminosité... avec l'utilisateur (un client web) est un protocole XMPP.

En effet, notre arduino va interroger les capteurs périodiquement et envoie les données récoltées à notre serveur XMPP qui par après va les sauvegarde dans une base de données ou les renvoie à un client web par demande.

Revenons sur le protocole XMPP, ce dernier est un protocole d'échange d'informations encodées en XML, un protocole surtout connu pour son utilisation dans l'échange des messages en temps réel et des notions de présence. Il a été entériné par l'IETF (Internet Engineering Task Force) sous le nom EXtensible Messaging and Presence Protocol (XMPP) dont son nom original est Jabber. Nous pouvons déduire qu'il est donc un standard de l'internet, au même titre que HTTP par exemple.

Le XMPP est beaucoup plus utilisé dans des systèmes de messagerie instantanée, mais son application est beaucoup plus vaste que cela. C'est un protocole, un Framework de développement d'applications réseaux communicantes. Il existe de nombreuses implémentations de logiciels client et serveur Jabber.

Voici quelques caractéristiques principales du protocole Jabber (XMPP) :

- ✓ **Extensible** : en utilisant la puissance de XML, tout le monde peut créer des fonctionnalités personnalisées au-dessus des protocoles de base ;
- ✓ **Décentralisé** : l'architecture du réseau XMPP est similaire au courrier électronique (email) ;
- ✓ **Diversifié** : un large éventail de sociétés et des projets open-source utilisent XMPP pour créer et déployer leurs applications et services en temps réel ;
- ✓ **Echange de message et présence basé sur le dialogue XML** ;
- ✓ **Ouvert et standard** ;

Chapitre III: Conception et réalisation du système d'irrigation automatique

✓ Etc

Le dialogue entre applications défini par Jabber est basé sur des flux XML. Il existe trois types de messages de base, qui peuvent être spécialisés grâce à l'utilisation d'espaces de noms (XML namespaces) qui sont :

- **<message/>** : C'est le moyen classique d'échanger des données/messages entre utilisateurs
- **<iq/>** : IQ signifie Info/Query, les messages de type **<iq/>** permettent d'échanger des données très structurées entre les applications Jabber
- **<presence>** : Le simple échange de messages **<presence/>** permet d'indiquer son statut ou de procéder à l'abonnement grâce à l'attribut *type* dont les valeurs possibles sont : *available, unavailable, subscribe...*

Signalons également que notre application n'a pas échappé à ce dialogue basé sur les flux XML, et cela se remarque lorsque notre carte arduino commence à structurer les données reçues des capteurs en format XML avant de les acheminer au serveur XMPP qui par après va interpréter le fichier reçu et récupérer les données qui lui sont envoyées.

c. Scénario de communication

Dans la figure on présente le scénario du comment le système général fonctionne seconde après seconde et cela après l'envoi d'une requête faite par l'utilisateur.

Chapitre III: Conception et réalisation du système d'irrigation automatique

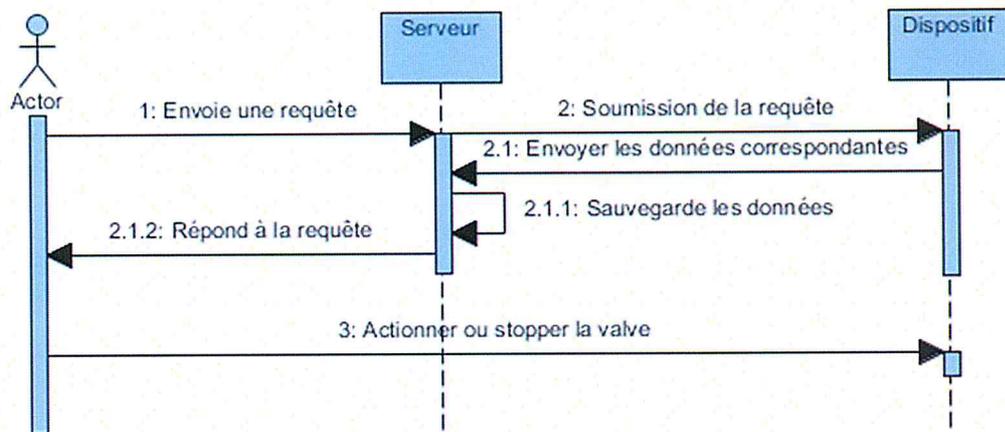


Figure 36 : Diagramme de séquence pour le scénario d'envoi de requêtes

Nous allons avoir maintenant un aperçu de ce qui se passe sans intervention humaine. C'est donc un aperçu de la gestion du système d'irrigation par l'Arduino chargé de stocker les données et de les faire parvenir à l'utilisateur si demandé.

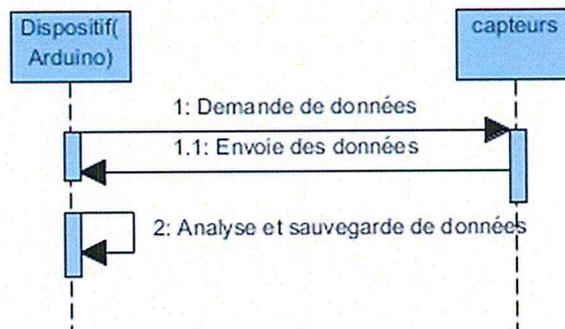


Figure 37 : Diagramme de séquence pour le scénario de demande de données

Chapitre III: Conception et réalisation du système d'irrigation automatique

d. Vue dynamique du système

Pour essayer de comprendre encore de manière plus simplifiée la conception du système, utilisons le diagramme d'états transitions qui nous montrera tous les états par lesquels passera le système en fonction de différents évènements.

Le système passera de l'état initial à celui d' « Idle » (en veille), lorsque on l'allumera il passera à l'état « Aware » (en marche). Le prélèvement de données garde le système à l'état « Aware ». Ce n'est que quand la donnée d'humidité du sol est inférieure au seuil préétabli que le système passe à l'état « Irrigate » et le système quittera cet état pour retourner à l'état « Aware » quand le seuil sera inférieur au niveau d'humidité du sol. Eteindre le système revient à revenir à son état « Idle », il n'y a qu'en cas de panne qu'on atteint l'état final.

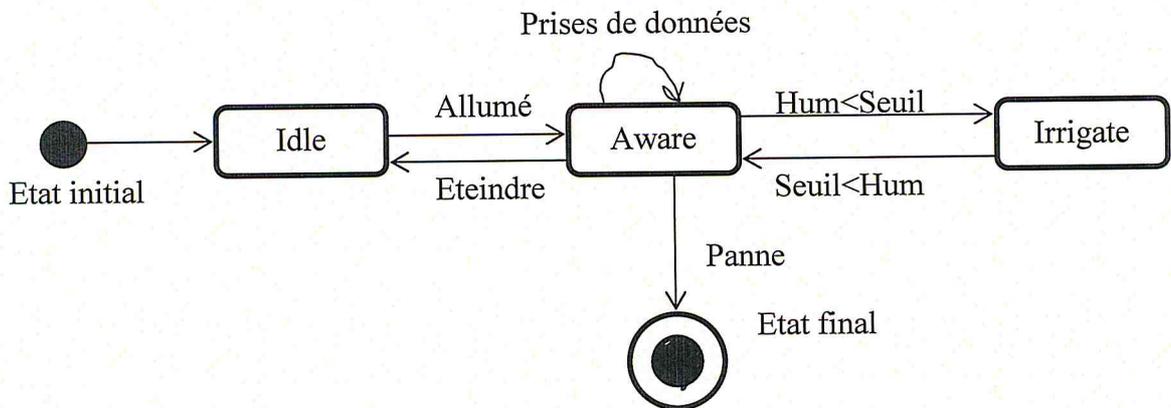


Figure 38 : Diagramme d'états-transitions du système

Ce système peut et se doit de fonctionner sans intervention humaine. Pour ce faire il doit être conçu comme un système asservi.

On dit qu'un système est **asservi** lorsque la variable de sortie est prélevée (par un capteur), puis utilisée pour élaborer un signal de retour qui est comparé au signal d'entrée. L'écart trouvé entre les deux est utilisé pour faire évoluer le système dans le sens d'une réduction de cet écart.

Pour notre système, la **consigne** sera le seuil que l'utilisateur aura choisi, le **régulateur** sera le serveur qui en fonction des données reçues actionnera ou stoppera la vanne qui elle joue le rôle d'**actionneur**, ainsi en sortie on aura de nouvelles données prises sur le terrain qui seront ramenées dans le système par le capteur. Par perturbations on désigne l'ensemble des perturbations météorologiques

Chapitre III: Conception et réalisation du système d'irrigation automatique

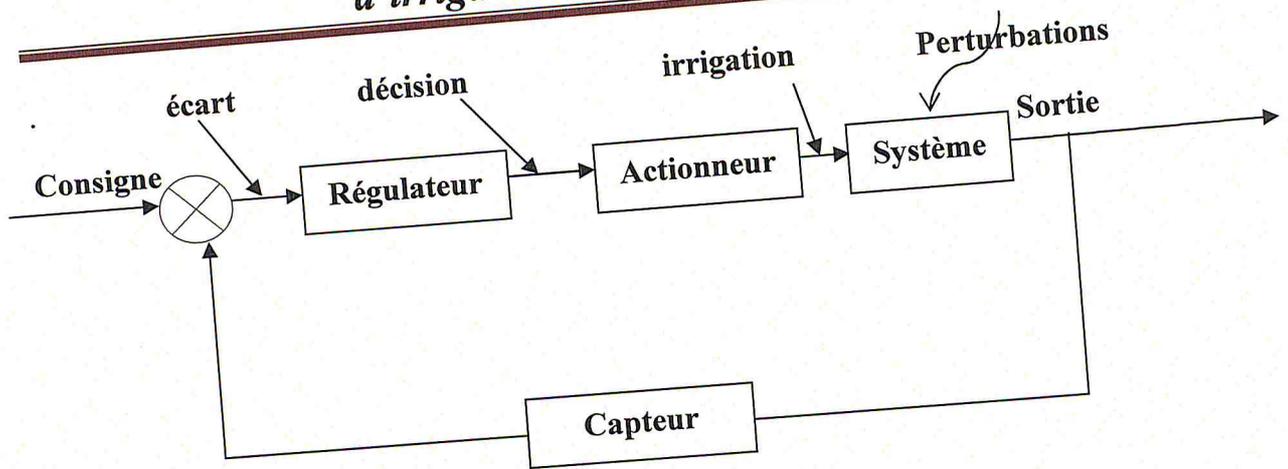


Figure 39 : Représentation du système en un système asservi

Chapitre III: Conception et réalisation du système d'irrigation automatique

Pour décrire le fonctionnement de notre fonction de régulation on utilise un organigramme (fig 40).

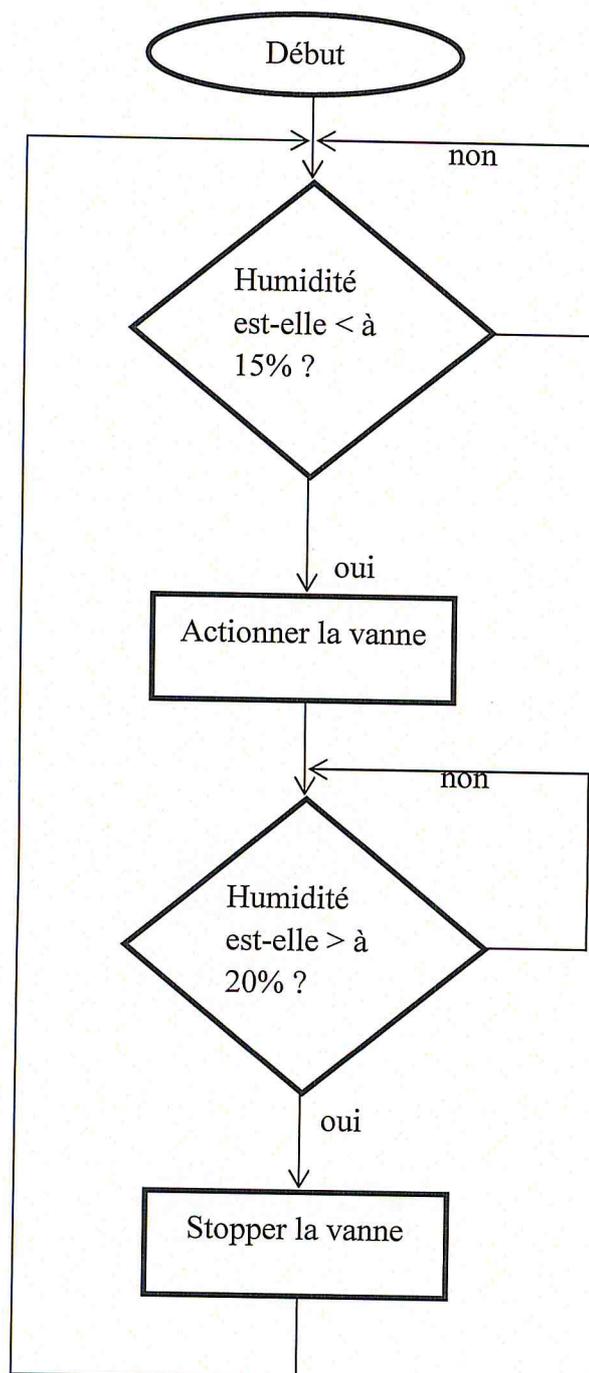


Figure 40 : Organigramme du système en ne considérant que l'humidité

Chapitre III: Conception et réalisation du système d'irrigation automatique

En ne considérant que l'humidité on se retrouve avec un système biaisé. En effet il a été démontré que c'est avec une humidité supérieure à 20% et la température entre 25° et 30° que l'on considère un sol comme étant humide. Dans d'autre cas le sol est sec. On devrait plutôt avoir l'organigramme suivant comme base de travail :

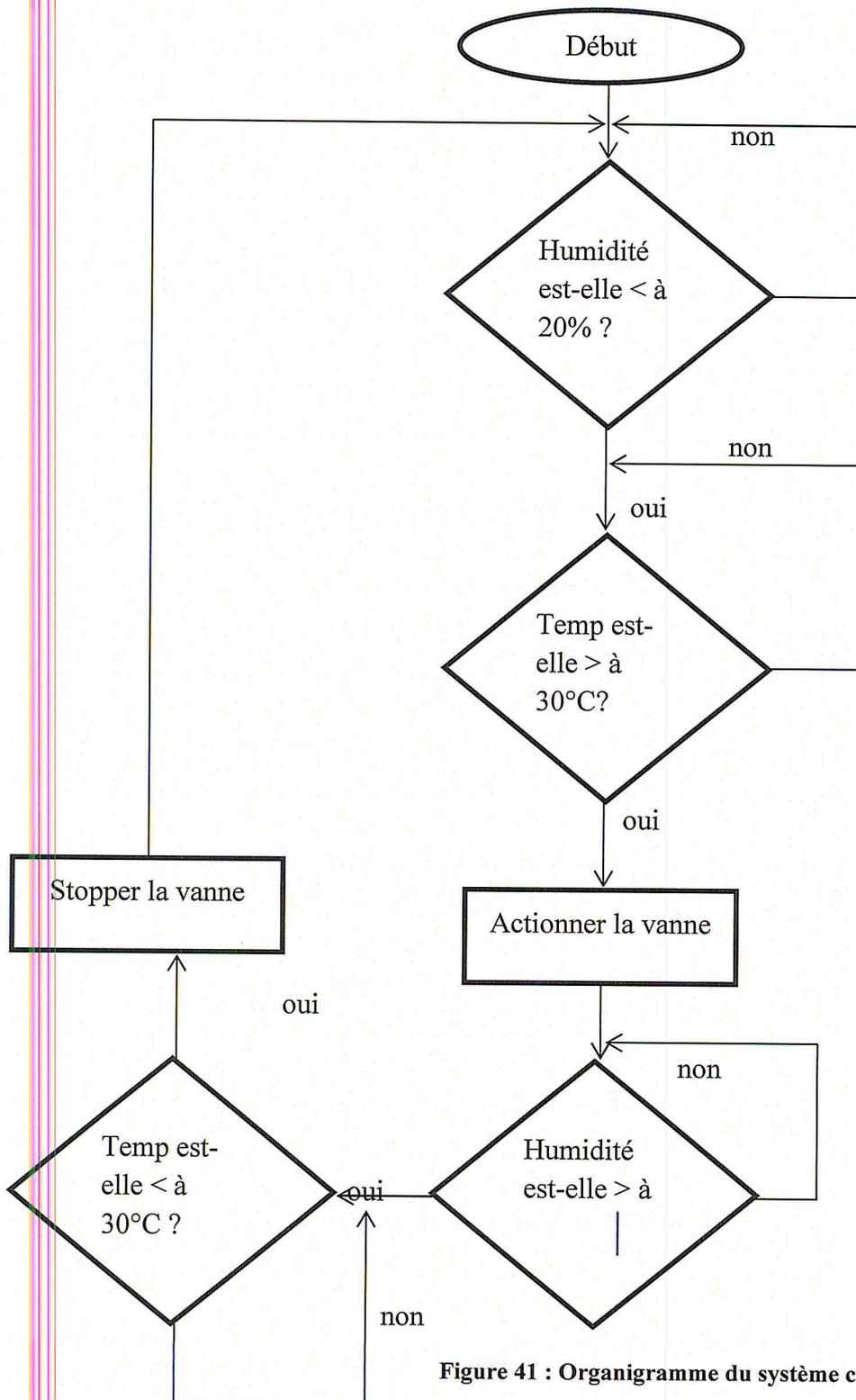


Figure 41 : Organigramme du système considérant l'humidité et la température

Chapitre III: Conception et réalisation du système d'irrigation automatique

III.4: Description du système physique

Le but de ce projet est de concevoir et de réaliser un système capable de gérer l'irrigation d'une plantation agricole tout en ayant un déploiement facile sur le terrain et aussi ne coûtant pas les yeux de la tête. Le prototype sur lequel nous avons travaillé réunit ces deux grandes conditions : le dispositif physique (une fois les branchements entre le microprocesseur et les capteurs effectués) est facile à disposer sur le terrain et pour ce qui est du coût il est relativement bas avec un coût total avoisinant les 45 à 50 dollars américains.

Le prototype ayant été conçu n'a besoins que de peu d'équipements :

- Une carte Arduino Uno ;
- Un module wifi à connecter à la carte Arduino pour pouvoir se connecter à internet à l'aide d'une connexion wifi et pouvoir envoyé les données des capteurs au serveur ;
- Un dispositif contenant les capteurs de température, d'humidité ambiante, d'humidité du sol et de luminosité ;
- Enfin un ordinateur ou un appareil mobile se connectant à internet pour communiquer avec le serveur hébergeant les pages web servant d'interface mais aussi les données transmises par les capteurs via la carte Arduino.

Nous parlerons un peu plus loin de la modélisation effectuée dans la conception du système informatique, pour l'heure, expliquons un peu le rôle de chaque composant ainsi que du pourquoi de l'utilisation de ces composants.

Chapitre III: Conception et réalisation du système d'irrigation automatique

III.4.1: La carte Arduino Uno

Arduino est un projet créé par une équipe de développeurs, composée de six individus : Massimo Banzi, David Cuartielles, Tom Igoe, Gianluca Martino, David Mellis et Nicholas Zambetti. Cette équipe a créé le "système Arduino". C'est un outil qui permet aux débutants, amateurs ou professionnels de créer des systèmes électroniques plus ou moins complexes. [ESK 12]

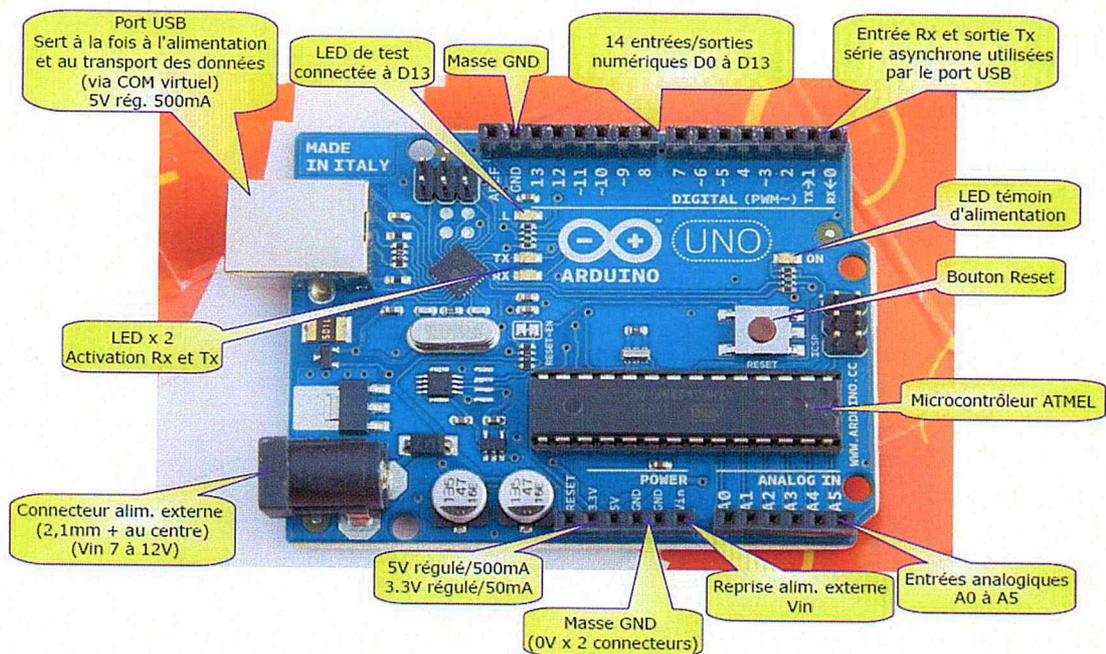


Figure 42: Image de la carte Arduino

Le système Arduino, nous donne la possibilité d'allier les performances de la programmation à celles de l'électronique. Le gros avantage de l'électronique programmée c'est qu'elle simplifie grandement les schémas électroniques et par conséquent, le coût de la réalisation, mais aussi la charge de travail à la conception d'une carte électronique. L'utilité est sans doute quelque chose que l'on perçoit mal lorsque l'on débute, mais une fois que vous serez rentré dans le monde de l'Arduino,

Chapitre III: Conception et réalisation du système d'irrigation automatique

vous serez fasciné par l'incroyable puissance dont il est question et des applications possibles!

Le système Arduino nous permet de réaliser un grand nombre de choses, qui ont une application dans tous les domaines ! L'étendue de l'utilisation de l'Arduino est gigantesque. Pour vous donner quelques exemples, vous pouvez :

- contrôler les appareils domestiques
- fabriquer votre propre robot
- faire un jeu de lumières
- communiquer avec l'ordinateur
- télécommander un appareil mobile (modélisme)

Les principales raisons qui nous ont poussés à choisir le système Arduino par rapport aux autres disponibles sur le marché comme les microcontrôleurs « PIC » du fabricant Microchip sont :

- ❖ **Le prix :** En vue des performances qu'elles offrent, les cartes Arduino sont relativement peu coûteuses, ce qui est un critère majeur pour le débutant. Celle que nous utiliserons pour la suite du cours a un prix qui tourne aux environs de 3000da ce qui est un bon rapport qualité/prix.
- ❖ **La liberté :** Le logiciel est gratuit et open source, développé en Java, dont la simplicité d'utilisation relève du savoir cliquer sur la souris. Le matériel quant à lui est un ensemble de cartes électroniques dont les schémas sont en libre circulation sur internet. Cette liberté a une condition : le nom « Arduino » ne doit être employé que pour les cartes « officielles ». En somme, vous ne pouvez pas fabriquer votre propre carte sur le modèle Arduino et lui assigner le nom « Arduino ». Les cartes non officielles, on peut les trouver et les

Chapitre III: Conception et réalisation du système d'irrigation automatique

acheter sur Internet et sont pour la quasi-totalité compatibles avec les cartes officielles Arduino.

- ❖ **La compatibilité :** Le logiciel, tout comme la carte, est compatible sous les plateformes les plus courantes (Windows, Linux et Mac), contrairement aux autres outils de programmation du commerce qui ne sont, en général, compatibles qu'avec Windows.
- ❖ **La popularité :** La communauté Arduino est impressionnante et le nombre de ressources à son sujet est en constante évolution sur internet. De plus, on trouve les références du langage Arduino ainsi qu'une page complète de tutoriels sur le site « arduino.cc ».

La description du logiciel associé à la carte Arduino se fera dans le chapitre suivant.

III.4.2: Le module wifi ESP8266

a. Présentation du module

Ce tout petit module, extrêmement bon marché, est un module de communication permettant d'instaurer une liaison Wifi complète et autonome avec votre microcontrôleur Arduino ou Raspberry Pi.

Chapitre III: Conception et réalisation du système d'irrigation automatique

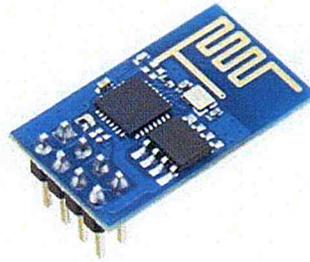


Figure 43 : Le module wifi ESP8266

Un Module série Wifi fonctionne en effet dans les 2 sens : il utilise une liaison série TX/RX pour recevoir et envoyer des données, et se comporte donc comme un hôte pour des applications Wifi, mais il peut également confier toutes les fonctions liées au réseau Wifi à un autre processeur d'application. En utilisant des commandes série, on peut également modifier les configurations du module série Wifi. Toutes ces fonctionnalités sont accessibles avec seulement 2 câbles à relier entre votre carte à microprocesseur (Arduino, Nucleo, Seeduino, raspberry Pi, etc.) et le module série Wifi ESP8266 (pins TX et RX) . Le branchement est donc assez simple. Le module ESP8266 répond d'autant mieux aux besoins des créateurs de projets électroniques qu'il permet, avec sa grande compacité, une intégration dans des objets connectés de petite taille (montre, bracelet, etc.). Il dispose cependant d'une excellente capacité de stockage des données, et d'un processeur embarqué suffisamment puissant pour permettre un temps de réponse minimal. Ainsi, on l'intègre aisément dans des projets incluant capteurs et autres dispositifs d'applications spécifiques, grâce à ses pins GPIO.

b.Spécifications techniques du module Wifi ESP8266

Les spécificités du module ESP8266 sont les suivantes :

- ✓ Protocole TCP/IP intégré
- ✓ Wifi direct (P2P), soft-AP
- ✓ 802.11 b/g/n
- ✓ Switch TR, balun, LNA, amplificateur de puissance et réseau d'adaptation intégrés

Chapitre III: Conception et réalisation du système d'irrigation automatique

- ✓ PLL, régulateurs, DCXO et unités de gestion de l'alimentation intégrés
- ✓ Puissance de sortie : +19,5 dBm en mode 802.11b
- ✓ Mise hors tension pour un courant de fuite inférieur à 10uA
- ✓ Processeur 32-bit faible puissance intégré, pouvant être utilisé comme un processeur d'application
- ✓ SDIO 1.1/2.0, SPI, UART
- ✓ STBC, MIMO 1x1, MIMO 2x1
- ✓ Agrégation A-MPDU et A-MSDU, 4 ms d'intervalle de garde
- ✓ Réveil et transmission de paquets en moins de 2 ms
- ✓ Consommation en mode veille inférieure à 1 mW (DTIM3)
- ✓ Dimensions : 21,1 x 13,2 mm. [ROB]

c. Branchements avec la carte Arduino

Le module wifi ESP8266 est composé de 8 broches:

- GND : la masse (Ground)
- Tx : pour la transmission de données
- Rx : pour la réception de données
- Vcc : pour l'alimentation (une alimentation limitée à 3,3V)
- RST : pour l'initialisation
- CH_PD : pour la mise à zéro
- GPIO0 et GPIO2 : pour la communication avec la carte Arduino. [FAR 14]

Chapitre III: Conception et réalisation du système d'irrigation automatique

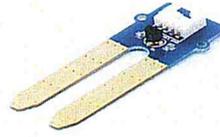


Figure 45 : Le capteur SEN92355P

- ✓ **SEN11301P** : c'est un capteur d'humidité et de température ambiante.

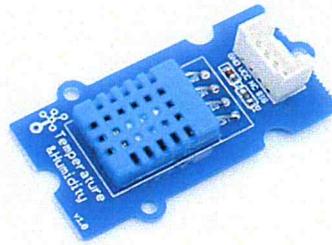


Figure 46 : Le SEN11301P

Connecté aussi à notre arduino, ce capteur multifonction va nous renseigner à la fois sur la température et sur l'humidité relative actuelle.

Il utilise un capteur de type DHT11 qui peut répondre à un large spectre de besoins de mesures. Il fournit une lecture fiable lorsque le degré d'hygrométrie ambiante est compris entre 20 % RH et 90 % RH, et lorsque la température est comprise entre 0°C et 50°C.

- ✓ **Capteur de luminosité :**

Chapitre III: Conception et réalisation du système d'irrigation automatique

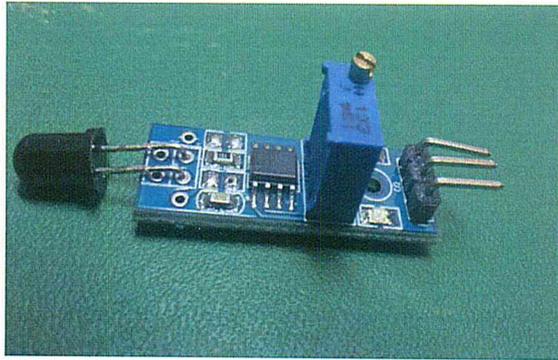


Figure 47 : Un capteur de luminosité

Ce capteur va nous renseigner sur le taux de luminosité actuel.

- ✓ **GPS** : on aurait dû se procurer d'un module GPS pour localiser l'ensemble de nos dispositifs du point de vue longitude et latitude mais la possession de ce dernier oblige l'autorisation administrative très sévère. Durant notre travail, on aura à utiliser des données pas vraiment réelles pour désigner la longitude et la latitude.

III.4.4: Accessoires

Pour faire communiquer l'ensemble de nos matériels cités si haut, on aura besoin de quelques fils et câble.

- Câble USB : Permettant de brancher notre carte arduino à un Ordinateur
- Des fils de connexion : Permettant de connecter nos différents capteurs à la carte arduino
- Une breadbaord pour partager les connexions entre composants

Chapitre III: Conception et réalisation du système d'irrigation automatique

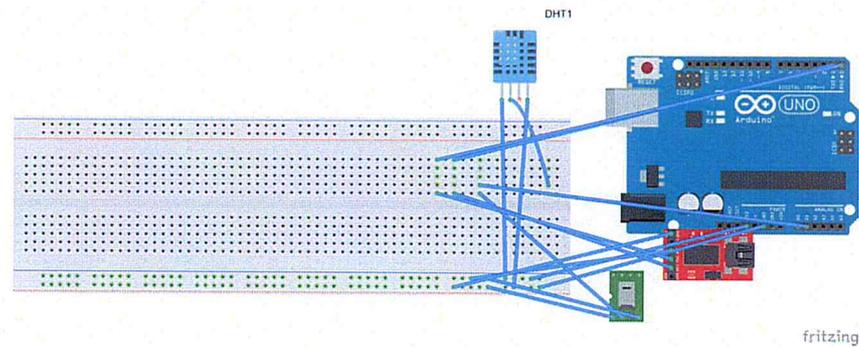


Figure 18 : Vue réelle du montage

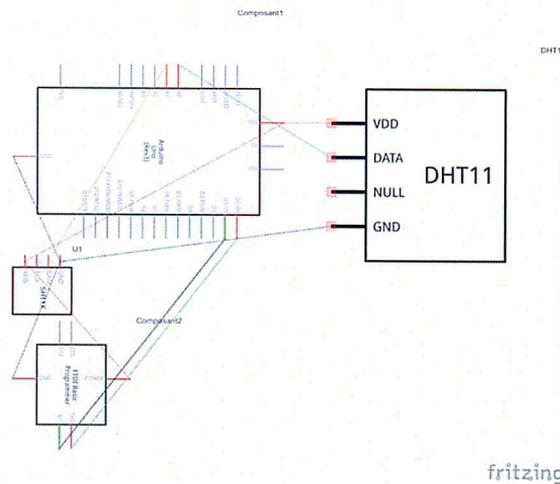


Figure 49 : Vue schématique du montage

Du côté logiciel, l'arduino est le cœur de notre système, c'est lui qui assure presque tout le contrôle, il interroge l'ensemble des capteurs, analyse les données et prend la décision d'actionner ou ne pas actionner les valves.

En principe, pour qu'une carte arduino assure un contrôle, elle doit être programmée et c'est le cas pour notre carte arduino. En effet, l'arduino possède son environnement de programmation et cet environnement est constitué de 3 grandes principales parties.

Voici une structure minimale d'un programme arduino :

En tête : déclaration des variables, des constantes, indication de l'utilisation de bibliothèques etc...

Chapitre III: Conception et réalisation du système d'irrigation automatique

Un **setup** (ou initialisation) cette partie n'est lue qu'une seule fois, elle comprend les fonctions devant être réalisées au démarrage (utilisation des broches en entrées ou en sortie, mise en marche du port série etc.....)

Une **loop** (ou boucle) : cette partie est lue en boucle ! C'est ici que les fonctions sont réalisées.

Après que la carte arduino soit programmée, nous avons aussi développé quelques pages web à base du HTML, PHP, XML ainsi que du JavaScript qui permettront à l'utilisateur (client web) de consulter l'état du système et d'agir sur lui. L'éditeur de texte Notepad++ nous a beaucoup servi au cours du développement de nos pages web.

III.4.5: Fonctionnement du système

Après avoir détaillé précédemment le matériel et logiciel constituant notre système d'irrigation intelligente, abordons maintenant son fonctionnement tout en vous précisant que c'est un système qui travaille en boucle ; c'est-à-dire qu'une fois lancé, il tourne continuellement sans arrêt sauf en cas de panne ou lorsque l'utilisateur le souhaite.

a. Le cœur ou cerveau du système

Comme nous l'avons déjà précédemment dit, c'est la carte arduino qui est considérée comme étant le cœur de notre système car c'est à elle qu'appartient le control de celui-ci. Une fois en panne, tout le système est hors service. Ou, elle peut être considérée comme étant le cerveau du système, nous vous rappelons qu'une carte arduino est un microcontrôleur programmable. Alors c'est grâce à ce programme qui tourne sur elle, qu'elle fait des calculs et prendre une décision selon les résultats du calcul, la décision à prendre dans notre cas c'est actionner ou ne pas actionner une valve à eau.

Parlons maintenant de comment cette carte fait ses calculs qui lui permettent la prise de décision.

Chapitre III: Conception et réalisation du système d'irrigation automatique

Tout d'abord avant le lancement du système, celui-ci aura besoin des paramètres et ces paramètres seront en réalité transmis à la carte arduino. Nous appellerons ces paramètres des « seuils ». Donc, la carte arduino recevra pour chacune des mesures : température et humidité ambiante, humidité du sol, taux de luminosité un seuil de référence qui lui permettra de savoir s'il est temps ou pas d'actionner la valve.

Au début de cette partie du fonctionnement de notre système, nous avons dit que ce dernier travaille en boucle; cela se justifie par le fonctionnement de notre carte arduino que nous avons programmé de telle manière qu'elle interroge les capteurs en boucle après une période de temps de 30 secondes puis les données récoltées seront stockées temporairement et séparément selon l'unité de mesure de chacune des données pour enfin envoyer une moyenne (la moyenne pour chaque mesure) au serveur de dix prises consécutives c'est-à-dire après 5 minutes. C'est cette « moyenne » qui sera comparée au « seuil » pour enfin prendre la décision de déclencher ou pas l'arrosage du champ ou du jardin.

De quelle moyenne le système se référera t-il pour déclencher l'arrosage?

Nous tenons à vous préciser que notre système d'irrigation n'est pas dédié à un seul type de plantation ou de culture, mais par contre il peut être adapté à toute sorte de culture ; ce pendant, c'est à l'agronome ou le propriétaire du champ de préciser la mesure (soit la température, humidité ...) qui arrangerait le plus sa culture et de fixer aussi le seuil via une interface que nous vous présenterons par la suite. Une fois la mesure précisée, sa moyenne sera prise en considération par le système comme moyenne de référence pour activer la valve.

Une dernière chose à préciser est que lorsque l'arrosage des plantes est activé, il le restera pendant une durée de 10 minutes et pendant tout ce temps là, notre microcontrôleur (la carte arduino) ne continuera pas à interroger les capteurs c'est après les dix minutes d'arrosage qu'il reprendra son travail habituel d'interroger les différents capteurs. Nous ajouterons également que l'arrosage peut être déclenché volontairement par l'utilisateur du système après avoir consulté les données

Chapitre III: Conception et réalisation du système d'irrigation automatique

climatiques actuelles via une interface que nous présenterons prochainement, il peut aussi stopper l'arrosage lorsqu'il le juge nécessaire via la même interface.

b. Le reste du système

Dans cette partie nous parlerons du reste du fonctionnement du système à part celui que nous venons de présenter qui concerne le déclenchement automatique d'arrosage. Sans trop tarder, parlons des différents capteurs que nous disposons.

Notre système fonctionne à base des capteurs qui jouent un rôle très important dans le bon fonctionnement de celui-ci ; sans leur présence, le système n'aura pas de référence pour actionner la valve, ce qui veut dire que la fiabilité de notre système d'irrigation dépend forcément des données envoyées par les capteurs, une fois erronées notre système sera défaillant. Les capteurs utilisés par notre système d'irrigation sont au nombre de trois :

- ✓ capteur d'humidité du sol,
- ✓ capteur de température et d'humidité ambiante ainsi que
- ✓ le capteur de luminosité.

Chaque capteur a une seule et unique tâche qui est de capturer l'état actuel de l'environnement selon la spécialité de chacun d'entre eux et d'envoyer les données capturées à l'arduino à la demande de celui ci.

Dès que l'arduino a reçu toutes données qu'il désirait, il les traite et les envoie au serveur, à lui seul il ne pourra pas y arriver ; c'est par là qu'intervient le module wifi *ESP8266* qui est un composant capable de scanner les réseaux wifi disponibles, s'y connecter, recevoir et transmettre les données à un lieu indiqué, il peut aussi être configuré en station de base ou à un point d'accès. Notre travail était de le configurer

Chapitre III: Conception et réalisation du système d'irrigation automatique

en mode point d'accès afin que différents dispositifs puissent se connecter à lui et ainsi créer un réseau sans fils un peu vaste.

Expliquons maintenant la communication entre la carte arduino et le module wifi, les deux composants ont deux broches en commun qui nous ont permis d'établir la communication entre eux, c'est le TX qui est une broche de « transmission de données » et le RX qui est une broche de « réception de données ». Lors du branchement, il nous a fallu connecter le TX de l'arduino au RX du module wifi et le RX de l'arduino au TX du module wifi; cela s'explique par le fait que lorsque la carte arduino envoie les données, elle les envoie à travers le TX et notre module wifi les recevra par sa broche RX et dans le sens contraire lorsque le module wifi à son tour envoie les données à la carte arduino c'est toujours à travers le TX et la carte les recevra par sa broche RX et ainsi le transfert de données est établi dans les deux sens. La communication par adresse IP (Internet Protocol) est à son tour utilisée lors de la communication entre le module wifi et le serveur afin de répondre aux requêtes du client web.

Avant de finir, nous aimerions parler sur l'outil qui joue aussi un rôle important « **la valve** ». Cet outil, son rôle est de laisser couler l'eau une fois il est activé ou stopper l'écoulement de l'eau au cas où il est arrêté. Son activation ou désactivation se fait à distance soit par l'utilisateur via une interface web ou automatiquement par le système.

III.5: Conclusion

Avec ce chapitre nous avons entamé la partie pratique dans laquelle on y développe les procédés utilisés dans la conception et l'implémentation du prototype de notre système d'irrigation intelligente.

Dans ce chapitre nous y avons décrit le dispositif physique en s'attardant sur la carte Arduino et le module wifi.

Chapitre IV : Tests

The screenshot displays the 'Smart Irrigation System' web interface. At the top, there is a navigation menu with 'Accueil', 'A propos', and 'Contact'. Below the menu, the title 'Irrigation Intelligente et Internet des Objets' is centered. The main content area is titled 'Dispositifs disponibles' and contains a table with the following data:

Dispositif	Adresse ip	Adresse Mac	Latitude	Longitude
Dispositif1	192.168.2.3	A2:DA:0D:06:36*30*14"	Nord 2°51'44" Est	
Dispositif2	192.168.2.1	A2:DA:0D:03:36*30*15"	Nord 2°51'44" Est	
Dispositif3	192.168.2.2	A2:DA:0D:08:36*30*14"	Nord 2°51'45" Est	
Dispositif4	192.168.2.4	A2:DA:0D:10:36*30*14"	Nord 2°51'46" Est	

Below the table, there are four control panels, each labeled 'dispositif 1' through 'dispositif 4'. Each panel contains two buttons: a green 'On' button and a red 'Off' button.

IV.1: Introduction

Après la phase de conception, passons à l'étape des tests de notre système d'irrigation intelligente qui nous permet d'arroser automatiquement nos plantations selon les conditions climatiques environnantes de la plante (la température et l'humidité ambiantes, humidité du sol, la luminosité) ou selon que l'utilisateur le juge nécessaire.

IV.2: Tests du système

Les tests sur notre dispositif ont été effectués dans une pépinière au niveau d'El Harrach plus exactement à Beaulieu. La superficie du terrain est de 120m² divisé en deux parties : une partie utilisant le dispositif et une partie sans. La plante utilisée pour conduire les tests est la luzerne.

La luzerne est une plante herbacée fourragère de la famille des fabacées, très productive, très résistante à la sécheresse, très riche en protéines, riche en vitamines et en sels minéraux et aussi utilisé en diététique.

IV.2.1: Description de la culture et de son cycle

La luzerne est une plante pluriannuelle. La plante pousse d'avril à octobre. Au printemps le départ en végétation est plus tardif que celui des graminées (exigence en lumière élevée).

La luzerne accomplit plusieurs cycles de production au cours de l'année. Mis à part en automne la luzerne fleurit à chaque cycle. Pour valoriser au mieux la productivité de la luzerne il est nécessaire de procéder à plusieurs récoltes dans l'année, en général à chaque floraison. Ainsi la luzerne peut reconstituer ses réserves racinaires, gage d'une meilleure pérennité.

Chapitre IV : Tests

Comme toutes les légumineuses, la luzerne n'a pas besoin de fertilisation azotée, grâce à la fixation symbiotique de l'azote de l'air (symbiose avec la bactérie *Rhizobium meliloti* au niveau des nodules présents sur les racines).

La luzerne possède une racine pivotante pouvant descendre profondément dans le sol, lui conférant une bonne résistance à la sécheresse.

Une fois implantée, la culture peut être exploitée pendant 3 à 6 ans.

La luzerne s'adapte facilement à des milieux divers en terme de climat et pluviométrie. Elle a une bonne tolérance aux températures relativement élevées (jusqu'à 30°C). Toutefois elle donne les meilleurs rendements en terres profondes, sans obstacles à son enracinement, et saine, dans les sols dont le pH est supérieur à 6,5 (conditions nécessaires au bon fonctionnement de la symbiose avec le *Rhizobium meliloti*). Elle est mal adaptée aux sols lourds et engorgés d'eau qui limite le développement des nodules.

En cas d'implantation dans un sol n'ayant jamais reçu de luzerne, ou dont le pH est inférieur à 6, il sera nécessaire d'inoculer la semence de luzerne avec le *Rhizobium meliloti*.

De plus dans les sols dont le pH est inférieur à 6 il sera nécessaire d'apporter un amendement basique afin de relever le pH.

IV.2.2: Phase de test

Comme on l'a mentionné en haut nous avons testé notre dispositif sur un terrain de 60 m² en le comparant à un autre terrain adjacent de même taille mais n'utilisant pas notre dispositif.

Ces 60 m² ont été subdivisés en 4 zones de 15m² chaque. Chaque zone s'est vue doté d'un capteur d'humidité du sol et de température ambiante. Ces capteurs ont été placés au centre de chaque zone.

Les tests ont été conduits sur une période d'environ un mois allant du 21 juillet au 25 août.

Chapitre IV : Tests

Avant de commencer l'irrigation, on a fait une petite étude sur le comportement de notre capteur d'humidité du sol quand il est dans l'air, dans un sol sec, dans un sol humide et immergé dans l'eau.

	Min	Max	Unité
Tension	3,3	5	V
Courant	0	35	mA
Capteur dans l'air	0	0	-----
Capteur dans un sol sec	0	300	-----
Capteur dans un sol humide	300	700	-----
Capteur immergé dans l'eau	700	950	-----

Tableau II: Comportement du capteur

Vue que la luzerne ne supporte pas un sol trop humide, le résultat de 400 donné par notre capteur correspond bien un sol pas trop humide qui favorisera la croissance normale de la luzerne ; d'où le 400 a été fixé comme seuil d'arrosage cela signifie que lorsque le capteur indique un résultat inférieur à 400 l'arrosage sera déclenché automatiquement.

Voici maintenant un tableau comparatif des deux terrains en ce qui concerne la consommation journalière en eau. Les résultats indiqués sont ceux relevés une semaine après notre arrivée soit du 2/08/2015 au 25/08/2015.

	TAD	TAD	TAD	TSD	TSD	TSD
	Apport en eau (m ³ /j)	Temp (°C)	Humidité du sol	Apport en eau (m ³ /j)	Temp (°C)	Humidité du sol
2/ 08	0.3	28	474	0.45	28	--
3/08	0.29	28	472	0.45	28	--
4/08	0.31	28	473	0.45	28	--
5/08	0.31	28	473	0.45	28	--
6/08	0.31	29	471	0.45	29	--
7/08	0.33	29	472	0.45	29	--
8 /08	0.34	29	470	0.45	29	--
9/08	0.33	29	471	0.45	29	--

Chapitre IV : Tests

10/08	0.34	31	464	0.45	31	--
11/08	0.34	30	465	0.45	30	--
12/08	0.29	29	455	0.45	29	--
13/08	0.32	31	468	0.45	31	--
14/08	0.34	30	466	0.45	30	--
15/08	0.31	27	473	0.45	27	--
16/08	0.27	26	470	0.45	26	--
17/08	0.29	29	454	0.45	29	--
18/08	0.28	28	459	0.45	28	--
19/08	0.29	29	460	0.45	29	--
20/08	0.3	28	458	0.45	28	--
21/08	0.29	27	455	0.45	27	--
22/08	0.3	27	456	0.45	27	--
23/08	0.3	28	458	0.45	28	--
24/08	0.28	26	465	0.45	26	--
25/08	0.27	26	470	0.45	26	--

Tableau III: Comparaison des consommations journalières des deux terrains

Ici TAD signifie le Terrain Avec Dispositif tandis que TSD veut dire Terrain Sans Dispositif. L'humidité du sol du TSD n'a pas été pris en compte car aucun capteur n'y était connecté mais comme les terrains sont adjacents la température est resté la même sur les deux terrains. On remarque qu'avec notre dispositif, l'apport en eau qui est d'une moyenne d'environ $0.29 \text{ m}^3/\text{jour}$ a considérablement diminué par rapport à celle de l'autre terrain dont l'apport ne change pas et qui est de $0.45 \text{ m}^3/\text{jour}$. On constate alors un gain en eau d'irrigation de l'ordre de 40%. A noter ici l'utilisation d'un seul paramètre qui est l'humidité du sol. *attention*

IV.3: Les vues du système et interface utilisateur

Le moment est venu de vous présenter les différentes vues de notre système. Les vues que dispose notre système d'irrigation intelligente sont des pages web qui sont à leur tour développées à partir du HTML, PHP, JavaScript et le CSS pour la mise en forme de ces pages web.

Lorsque l'utilisateur web lance l'application, il est redirigé vers une page d'accueil qui lui donne la possibilité de choisir un dispositif à contrôler. Nous

Chapitre IV : Tests

désignons par dispositif, l'ensemble d'une carte arduino et tous ce qui est connecté sur elle (un module wifi, les capteurs...).

Voici la page d'accueil qui permet à l'utilisateur :

- ✓ de choisir le dispositif
- ✓ de mettre en marche le dispositif ou l'arrêter

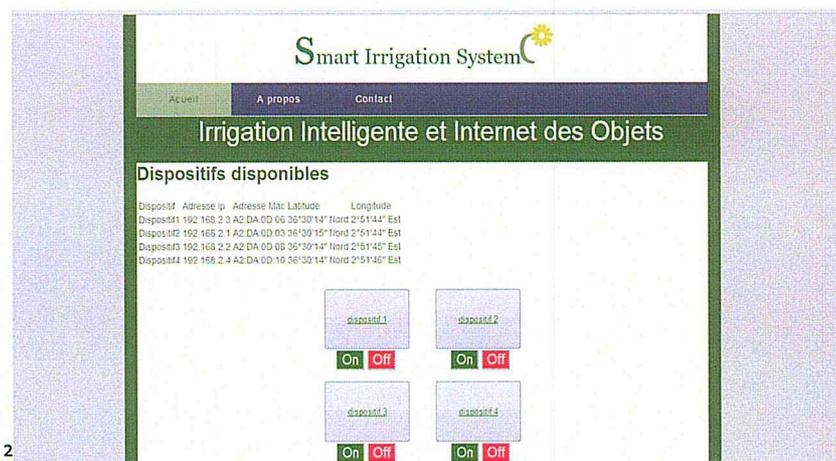


Figure 50 : Page d'accueil

Après avoir sélectionner le dispositif souhaité, l'utilisateur est redirigé cette fois ci sur une page qui englobe toutes les fonctionnalités du système. Sur cette même page, l'utilisateur peut :

- ✓ Actionner ou stopper une valve à volonté
- ✓ Interroger un capteur quelconque pour avoir les données actuelles
- ✓ Sélectionner une mesure de référence sur laquelle le système va travailler
- ✓ Préciser la valeur « seuil » correspondant à la mesure
- ✓ Visionner un graphique pour chaque mesure enregistrée depuis le lancement du système

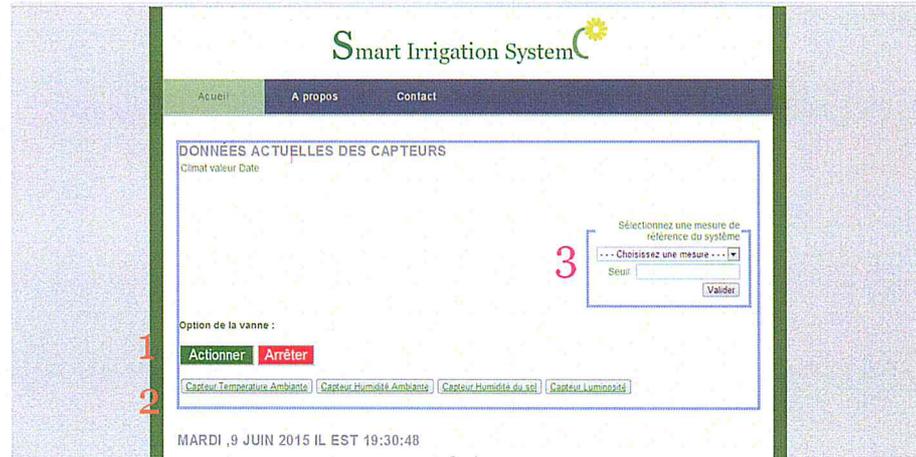


Figure 51 : Page web d'interaction avec le système

Sur la figure précédente, on remarque les chiffres 1,2 et 3, voici ce qu'ils représentent :

- 1 montre l'endroit où l'utilisateur peut actionner ou arrêter une valve
- 2 montre les boutons qui permettent à l'utilisateur d'interroger un capteur
- 3 montre l'endroit où l'utilisateur peut sélectionner une mesure de référence pour le système et indiquer la valeur du « seuil ».

L'image suivante nous montre la partie des graphes, cette partie figure sur la même page que l'image précédente.

Chapitre IV : Tests

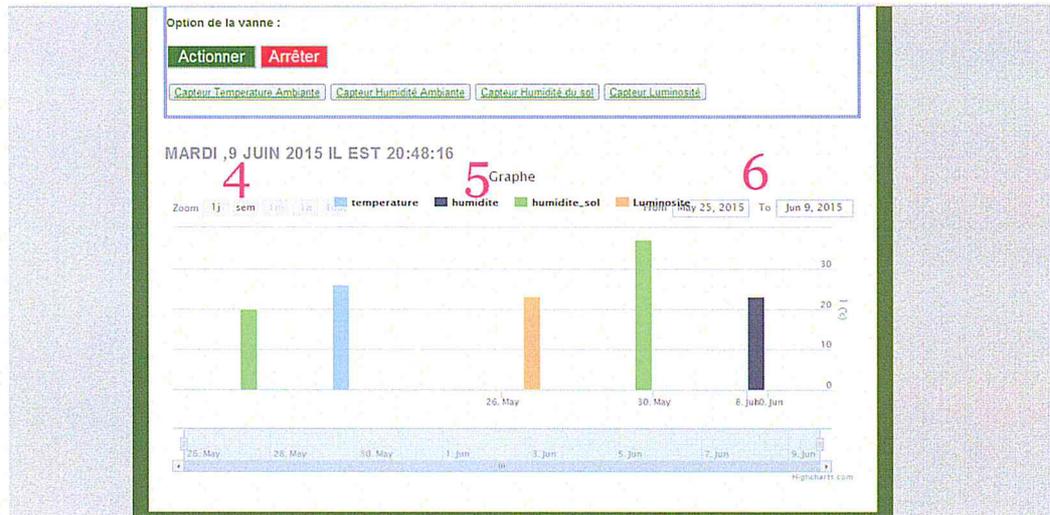


Figure 52 : Page des graphes

Sur cette figure, on remarque le chiffre « 4 », à cet endroit figure les options de visualisation d'un ou des graphe(s) sur un intervalle de temps :

- 1j : pour affiche un graphe correspondant aux données enregistrées en une journée
- Sem : pour affiche un graphe correspondant aux données enregistrées en une semaine
- 1m : pour affiche un graphe correspondant aux données enregistrées en un mois
- 1a : pour affiche un graphe correspondant aux données enregistrées en une année
- Tout : pour affiche un graphe correspondant à toutes les données enregistrées depuis le lancement du système.

Le chiffre « 5 » quant à lui, désigne l'endroit où l'utilisateur peut choisir quelle mesure à représenter graphiquement, chaque couleur désigne une mesure,

- ✓ Bleu représente la température ambiante
- ✓ Noire représente l'humidité ambiante

- ✓ Verte représente l'humidité du sol
- ✓ Orange représente la luminosité

Le dernier chiffre qui est « 6 » indique la date du premier jour où l'on a enregistré la première donnée et la date à laquelle la dernière donnée a été enregistrée.

IV.4: Conclusion

Tout au long de ce chapitre, nous avons parlé des tests effectués sur notre dispositif su terrain en le comparant à un terrain n'utilisant pas notre dispositif où on a pu constater un gain en eau d'irrigation de l'ordre d'environ 40%. Nous avons fini par la présentation de l'interface utilisée par le client web pour communiquer avec le système.

Conclusion générale

Dans le domaine agricole, pouvons-nous produire plus tout en utilisant moins de ressources ? C'est tout l'enjeu de notre projet de fin d'étude.

Une gestion durable de l'eau permet notamment d'assurer une production agricole de meilleure qualité. L'amélioration de la gestion de l'eau dans l'agriculture irriguée jouera donc un rôle clé afin de ralentir, si possible même de freiner la crise hydrique qui s'annonce.

Avec notre système d'irrigation intelligente que nous avons réalisé au cours de ce projet de fin d'étude, nous avons été en mesure de fournir aux agriculteurs les informations environnementales nécessaires dont ils auront besoin pour gérer l'eau avec précision lors de l'irrigation. Nous avons créé un système de gestion d'irrigation, un outil d'aide à la décision sensé optimiser l'utilisation de l'eau.

Pour y arriver, il nous a fallu prendre en main beaucoup de technologies comme par exemple l'arduino et son langage de programmation. En premier lieu, nous avons commencé à faire une étude approfondie sur l'internet des objets dont le but était de comprendre ce que c'est, connaître ses standards et ses différents protocoles de communication. En second lieu, nous avons introduit le monde d'arduino où nous avons rencontré plusieurs difficultés liées à son aspect électronique, un domaine qui ne nous est pas vraiment familier. Mais avec une étude approfondie des différents composants utilisés nous avons pu surmonter ces obstacles. L'étape de conception et réalisation ont été développées en parallèle afin d'atteindre notre objectif final dans les meilleurs délais.

Les principaux objectifs atteints sont :

- ✓ Apporter à la plante et au bon moment l'eau nécessaire à son développement normal
- ✓ Utilisation très réduite des moyens financiers pour se procurer un tel système d'irrigation intelligente.
- ✓ La création d'un système qui peut fonctionner de manière autonome et qui peut également être contrôlée à distance par un utilisateur.

Conclusion générale

Vu le manque de temps, certains points n'ont pas été étudiés profondément. L'autonomie de la batterie doit être testé également sur une certaine période, ce qui malheureusement n'a pas été le cas vu donc le manque de temps.

La résistance du système aux différentes conditions climatiques n'a pas été étudiée.

Enfin la mise en boîtier n'a pas été faite, ce qui sera fait une fois le système testé et approuvé.

Bibliographie

1. [REP 15] : « Il n'y a pas de crise mondiale de l'eau » Entretien avec Asit K. Biswas, Elisabeth Schneider, Reporterre Le quotidien de l'écologie, 20 Mars 2015.
2. [HIL 14] : « Texture du sol et qualité de l'eau », C. Hilliard et S. Reedyk, Agriculture et Agroalimentaire Canada, 15 Décembre 2014.
3. [CBR 90]: « Méthodes d'irrigation », C.Brouwer, Gestion des eaux en irrigation, 1990.
4. [JED 14] : « Les techniques d'irrigation », Jean Dunglas, Académie d'agriculture de France, 2014.
5. [BAS 14] : « Comparing Smart Irrigation Technologies », Baseline Systems, Aout 2014.
6. [KAM 2014] : «Survey of Smart Irrigation System», H.N.Kamalaskar et Dr. P.H.Zope, International journal of engineering sciences & research technology, Juin 2014
7. [GAS 15] : «Design of Automatic Irrigation System for Small Farmers in Rwanda», Gasore Geoffrey, Munyaneza Jean de Dieu, Ngendabanga Jean Pierre et Twibanire Aimable, SciRes, Mars 2015.
8. [GNI 14] : « Internet des objets et interopérabilité des flux logistiques: état de l'art et perspectives », David R. Gnimpieba Z.1,Ahmed Nait-Sidi-Moh, David Durand, Jérôme Fortin, projet IndustriLab COM-SLoT, Université de Picardie Jules Verne (UPJV), 2014.
9. [WEI 10]: « L'Internet des objets : concept ou réalité ? », Mathieu WEILL et Mohsen SOUISSI, Réalités industrielles, Novembre 2010.
10. [COU 10] : « L'Internet des Objets : Un gisement à exploiter », Alain Coulon, La Lettre d'ADELI n°78, Hiver 2010.
11. [CITC 13] : « Analyse et perspectives d'avenir pour l'Internet des objets », Ali BENFATTOUM, Contactless Innovation Technologies Center (CITC), Février 2013.
12. [CLAP 14] : « Internet des objets : La révolution technologique en marche », Alain Clapaud, 24 Octobre 2014.
13. [ARL 13] : « La pile de protocoles IP se met au goût de l'Internet des objets », Pierrick Arlot, L'embarqué n°3 page 23 , 2013.

Références

14. [INH 14] : « Sécurité des objets connectés », Travaux de la 4e promotion (2013-2014) du Cycle « Sécurité des usages numériques », Institut national des hautes études de la sécurité et de la justice (INHESJ), Décembre 2014.
15. [LAN 09] : « 6LowPan », LANTERI Isabelle, CNAM 2008-2009.
16. [VIP 12] : « Utilisation du protocole COAP pour la découverte de ressources dans les réseaux de capteurs », Julien VIPRET, Mai 2012.
17. [EVA 11] : « L'Internet des objets : Comment l'évolution actuelle d'Internet transforme-t-elle le monde ? », Dave Evans, CISCO, Avril 2011.
18. [BEL 14] : « L'irrigation intelligente », Ilyasse Belkacem, Juillet 2014.
19. [OBS 14] : « Les nouvelles technologies se développent dans le monde mais les inégalités demeurent », Observatoire des inégalités, 25 février 2014.
20. [ESK 12] : « Arduino pour bien commencer en électronique et en programmation », Eskimon et Olyte, 2 Décembre 2012.
21. [ROB] : « Module Série Wifi ESP8266 », Génération Robots.
22. [FAR 14] : « ESP8266 Serial WiFi Module », Christine Farion, 26 Décembre 2014.
23. [INI 13] : « Conception et réalisation d'un composant d'affichage de citations pour Joomla », Fleury ININHAZWE et Livinus TUYISENGE, Mémoire de fin d'études pour l'obtention d'un diplôme de licence en génie des systèmes informatiques, Université Saad Dahlab de Blida, Juin 2013.
24. [MOC15] : « aruconetwork », Le magazine des objets connectés et de l'innovation Hardware, le 26 février 2015.