

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : TECHNOLOGIE

Département : ELECTRONIQUE

Domaine : SCIENCES ET TECHNIQUES

Filière : TELECOMMUNICATIONS

Spécialité : RESEAUX ET TELECOMMUNICATIONS

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

**Réalisation d'un Réseau de Capteurs Sans Fil pour la
Surveillance de l'Agriculture Céréalière**

Présenté par : *Boulkroune Ramzi*

Encadrant : *Doghmane Noureddine*

Professeur

UMB ANNABA

Jury de Soutenance :

Benmoussa Samir	M.C.A	UMB ANNABA	Président
Doghmane Noureddine	Prof	UMB ANNABA	Encadrant
Zermi Narima	M.C.A	UMB ANNABA	Examineur

Année Universitaire : 2021/2022

ميدان زراعة الحبوب يعتبر قطاع حساس وهام بالنسبة للأمن الغذائي للعديد من الدول والشعوب بما فيها الجزائر، ورغم الجهود المبذولة من الدولة إلا أنه يوجد عجز كبير في إنتاج هاته المواد الحيوية، وهذا راجع لعدة أسباب، من أهمها الخلل في عملية الري، ولهذا ارتأينا أن نستعمل تكنولوجيات حديثة وفعالة ومن هنا جاءت الفكرة في استخدام شبكات الحساسات اللاسلكية "WSN"، المزودة خصيصا بحساسات الرطوبة والحرارة، وذات متحكمات خاصة، لتساعد ليس فقط مهني القطاع على معرفة حالات الأراضي الزراعية بالتدقيق، ولكن أيضا المساعدة في عقلنة استخدام مياه السقي وزيادة من حجم الإنتاج .

الكلمات المفتاحية: الحبوب، الأمن الغذائي، الري السيء، WSN

Abstract

The field of cereal cultivation is considered as a sensitive and important sector for the food security of many countries and peoples, including Algeria. Despite the efforts made by the state, there is a significant shortfall in the production of these vital needs, and this is due to several reasons, the most important of which is the defect in the irrigation process, and for this we decided to use Modern and effective technologies, hence the idea of using wireless sensor networks (WSN), which are specially equipped with humidity and temperature sensors, and with special micro-controllers, to help the sector's professionals know the agricultural land conditions, by auditing, and to help rationalize the use of irrigation water and increase the volume of production.

Key words : Cereals, Food Security, Defects of Irrigation, WSN

Résumé

Le domaine de la culture céréalière est considéré comme un secteur sensible et important pour la sécurité alimentaire de nombreux pays et peuples, dont l'Algérie. Malgré les efforts déployés par l'Etat, il existe un déficit important dans la production de ces produits vitaux, et cela est dû à plusieurs facteurs, dont le plus important est le défaut du processus d'irrigation. Nous avons donc décidé d'utiliser des technologies modernes et efficaces, à l'instar des réseaux de capteurs sans fil (WSN), spécialement équipés de capteurs d'humidité et de température, et avec des microcontrôleurs spéciaux, pour aider non seulement les professionnels du secteur à connaître avec précision les conditions des terres agricoles, mais aussi pour aider à rationaliser l'utilisation de l'eau d'irrigation et augmenter le volume de production.

Mots clés : Céréales, Sécurité Alimentaire, Mauvaise Irrigation, WSN

Remerciements

Avant tout je remercie DIEU le Tout Puissant et le Tout Miséricordieux, de m'avoir permis d'accomplir ce travail ainsi que la force et le courage pour dépasser tous les obstacles et les difficultés.

J'adresse mes sincères remerciements à mon Professeur et mon Encadreur Pr. Doghmane pour sa disponibilité, son aide, ses conseils et ses encouragements.

Je tiens également à remercier tout le personnel du Centre de recherche en Environnement dirigé par la Professeure Bouzlama

J'aimerais aussi remercier tout le personnel du département d'électronique et en particulier mes professeurs et mes promotionnaires, de la Filière Télécommunications

Et Enfin, mes sincères remerciements vont également à toutes les personnes avec lesquelles j'ai collaboré durant mon travail

Dédicaces

Je dédie ce travail en premier lieu à ma famille

A mes parents, ma femme, mes enfants, mon frère et ma sœur

*Ainsi qu'à ma grande famille, A mes amis, Aux personnes qui
sont chères à mon cœur*

Liste des figures

Figure	Titre	Page N°
Fig1.1	Rendement qx/ha (2015-2019) –Algérie	02
Fig1.2	Répartition de la Production céréalière en 2019 –Algérie	03
Fig1.3	Absorption d'eau du grain de blé lors de la germination	04
Fig1.4	Cycle Végétal du Blé	05
Fig1.5	La sensibilité au Stress Hydrique du blé	06
Fig1.6	Carte de pluviométrie annuelle de l'Algérie du nord (année 2012)	07
Fig2.1	Model typique d'agriculture utilisant les IoT	11
Fig2.2	Schéma de principe d'un RCSF	12
Fig2.3	Architecture des différents types de Nœuds dans un RCSF	14
Fig2.4	Exemple de topologie basée sur des clusters	16
Fig3.1	Photo du Nœud capteur	20
Fig3.2	Schéma électrique du Nœud de capteur	20
Fig3.3	Bloc diagramme fonctionnel du Nœud capteur	23
Fig3.4	Photo du Nœud Puits	24
Fig3.5	Schéma électrique du Nœud Puits	24
Fig3.6	Bloc diagramme fonctionnel du Nœud Puits	27
Fig3.7	Photo de l'Application Android « AgriWSN » créée	28
Fig3.8	Programme bloc de l'application « AgriWSN » créée	29
Fig4.1	Schéma de principe du montage pour la mesure de la consommation énergétique	31
Fig4.2	Photographie du montage pour la mesure de la consommation énergétique	31
Fig 4.3	Photo du graphe de la consommation électrique en mode mise en veille	32
Fig 4.4	Photo du graphe de la consommation électrique DHT11	33
Fig 4.5	Photo du graphe de la consommation électrique du capteur humidité du Sol	33
Fig 4.6	Photo du graphe de la consommation électrique du capteur qualité d'air	34
Fig 4.7	Photo du graphe de la consommation électrique Avec module de transmission	34
Fig 4.8	Photo du graphe consommation électrique totale du Nœud capteur	35

Liste des tableaux

Tableau	Titre	Page N°
Tableau1.1	Rendement du blé sous condition sec/Irrigation complémentaire	05
Tableau 3.1	caractéristiques techniques des différents composants du Nœud capteur	21-22
Tableau 3.2	caractéristiques techniques des différentes composants du Nœud Puits	25-26
Tableau 4.1	Résumé pour les différentes consommations énergétiques	35

Liste des Symboles

AI : Artificial Intelligence

AO : Analog Output

CCTV : closed-circuit television

DO : Digital Output

EEPROM : electrically erasable programmable read-only memory

E/S : Entrée/Sortie

FHSS : Frequency-Hopping Spread spectrum

GND : Ground

GPS : Global Positioning System

GSM : Global System for Mobile Communications

HAP : hydrocarbures aromatiques polycycliques

HART : Highway Addressable Remote Transducer

IoT : Internet of Things

ISA: International Society of Automation

ISM : industrial, scientific, and medical radio band

I2C : Inter-Integrated Circuit.

i/p : Input

LCD : liquid crystal display M2M : Machine to machine

Lora : Long Range

MCU : Microcontroller Unit

MIT : Massachusetts Institute of Technology

NC : Noeud collecteur o/p : Output

NR : Noeud relais

NS : Noeud source

PWM : Pulse-width modulation

RCSF : Réseau de Capteurs Sans Fil

RF : Radio Frequency

SPI : Serial Peripheral Interface

SRAM : static random access memory

TTL : Transistor-transistor logic

UPS : Universal Power Supply

USART : Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter

USB : universal serial bus

UWB (Ultra wideband)

VoIP : Voice over Internet Protocol

WAN : Wide Area Network

WI-FI : Wireless Fidelity

WSN : Wireless Sensor Network

Table des matières

Introduction Générale	1
Chapitre I : Agriculture Céréalière.....	2
1. Introduction	2
2. Statistiques agricoles en Algérie	2
3. Céréales	3
a. Blé	3
b. Histoire du blé, cette plante du genre Triticum.....	3
c. Différentes espèces de blés	4
d. Cycle de vie du blé.....	4
e. Irrigation des champs du Blé	5
f. Exigences Climatiques des champs de blé.....	6
4. Conclusion	7
Chapitre II : Agriculture de Précision	8
1. Introduction	8
2. Définition	8
3. Historique de l'agriculture de précision	8
4. Enjeux de l'agriculture de précision	9
5. Moyen pratique de l'agriculture de précision	9
a. IoT « Internet of Things »	10
b. Application des IoT dans l'agriculture.....	10
c. Réseau de capteurs sans fils :.....	11
d. Historique des RCSF.....	12
e. Enjeux des RCSF	12
f. Principe de fonctionnement d'un RCSF	13
g. Modèle de Nœud d'un RCSF	13
h. Plates-formes des RCSF.....	14
i. Matériels	15
ii. Logiciels.....	15
i. Architectures d'un RCSF	15
i. La topologie en étoile.....	15
ii. La topologie point par point.....	16
iii. La topologie maillée.....	16
iv. L'architecture de groupe.....	16
v. La topologie hybride	16

j. Optimisation énergétique	17
Conclusion :	18
Chapitre III : Réalisation pratique d'un RCSF pour la Surveillance de l'Agriculture Céréalière	19
1. Introduction	19
2. Présentation générale de notre RCSF	19
a. Partie Nœud capteur ou source	19
b. Schéma électrique et caractéristiques du Nœud de capteur	20
c. Bloc diagramme fonctionnel du Nœud de capteurs ou source :.....	23
d. Partie Nœud puits « sink »	23
e. Schéma électrique et caractéristiques du Nœud Puits.....	24
f. Bloc diagramme fonctionnel du Nœud Puits :.....	27
g. Partie Utilisateur final « application Android ».....	28
3. Conclusion	29
Chapitre IV : Consommation Energétique de Notre Nœud capteur.....	30
1. Introduction	30
2. Formes de dissipation d'énergie	30
a. Energie de capture.....	31
b. Energie de traitement	31
c. Energie de communication.....	31
3. Etude Energétique de notre Nœud capteur	31
a. Consommation électrique du module Arduino en mode mise en veille.....	32
b. Consommation électrique du Arduino+DHT11	32
c. Consommation électrique du Arduino + Humidité de sol.....	33
d. Consommation électrique du Arduino + capteur qualité d'air.....	33
e. Consommation électrique du Arduino + module de transmission	34
f. Consommation électrique totale du Nœud capteur	35
4. Conclusion	36
Conclusion Générale.....	37

Introduction Générale

L'agriculture céréalière est un domaine stratégique qui touche à la sécurité alimentaire de la population pour de nombreux pays parmi eux l'Algérie, mais malgré les efforts déployés dans cette filière, on enregistre des insuffisances en terme de production. Ceci est dû à différentes causes en particulier les mauvaises herbes, les conditions climatiques et surtout les mauvaises irrigations ...etc.

Dans nos jours, la technologie ne cesse de se développer à une vitesse incroyable, dans tous les domaines (Industrie, Agriculture, Transport, Médecine, Télécommunication, ...). Dans ce contexte, notre travail consiste à passer de l'agriculture traditionnelle ou classique à l'agriculture moderne ou Agriculture de précision. Il s'agit surtout d'utiliser des informations récoltées sur les terres agricoles, à les traiter numériquement pour ensuite prendre des décisions et ordonner des actions, d'une manière automatisée et optimisée.

Pour pallier à deux causes principales qui engendrent des pertes significatives de point de vue rendement de la production céréalière, une technologie des Réseaux de capteurs sans fil (RCSF) ou WSN (Wireless Sensor Network) dans l'agriculture de précision est utilisée. Cette technologie permet de récolter des informations concernant, entre autres, le sol et l'environnement des terrains cultivés, et aide les agriculteurs à prendre les bonnes décisions d'une manière efficace et rationnelle et maintenir les exigences et les besoins en eau sans pour autant excéder où gaspiller cette précieuse ressource naturelle qui devient de plus en plus rare et coûteuse.

L'objectif principal de ce projet est de concevoir un réseau de capteurs sans fil à basse consommation électrique pour récolter les informations de température, d'humidité de l'air, d'humidité du sol et même la qualité de l'air et envoyer ces données à l'utilisateur final à travers une application Androïde via le réseau Bluetooth.

Ce projet WSN utilise des cartes Arduino programmables pour recevoir le signal d'entrée i/p de modification des conditions d'humidité du sol via un dispositif de détection. Le module Arduino est donc programmé pour capter et acquérir les signaux traduisant les différentes conditions climatiques, environnementales et d'humidité du sol via des dispositifs de détection. Ce processus est accompli lorsque le microcontrôleur prend les signaux, il produit un signal de sortie o/p via l'émetteur radio fréquence pour envoyer les données vers le récepteur d'une station de base constituée principalement d'une autre carte Arduino, un afficheur LCD et un module Bluetooth pour transmettre enfin les informations récoltées à l'utilisateur final.

De plus, ce projet peut être développé en interfaçant un module GSM et également un site web qui pourra être mis à jour d'une manière continue par les nouvelles données acquises.

CHAPITRE I

Agriculture Céréalière

Chapitre I : Agriculture Céréalière

1. Introduction

La filière Céréale est classée parmi les plus anciennes agricultures au monde et surtout parmi les plus importantes car ses produits occupent une place stratégique dans le régime alimentaire de la majorité des pays et considérés comme des éléments vitaux et cruciaux de la sécurité alimentaire.

L'agriculture céréalière plus précisément « le blé » avec ses deux variantes dur et tendre est qualifiée de stratégique pour notre pays car c'est un produit vital pour la population locale, et il s'avère paradoxalement que notre région est loin d'être la première en termes de production à l'échelle régional et international, d'après les chiffres officiels il y'a seulement 29% en terme de disponibilité de ce produit en Algérie [1].

La filière Céréale regroupe plusieurs espèces et plantes telles que : épeautre, orge, avoine, millet, maïs, riz, seigle, blé, ... etc.

2. Statistiques agricoles en Algérie

Au cours des périodes 2000-2009 et 2010-2017, la surface céréalière occupait un taux annuel de 40% de la surface agricole utile.

La superficie enssemencée en céréales au cours de la décennie 2000-2009 est estimée à environ 3200930 hectares, le blé dur et l'orge occupant la majeure partie de cette superficie, soit environ 74% de la superficie totale en céréales.

Au cours de la période 2010-2017, la moyenne de cette superficie s'est élevée à 3385560 hectares, soit une augmentation de 6% par rapport à la période précédente (2000-2009).

Le taux de production céréalière durant la période 2010-2017 est estimé à 41,2 millions de quintaux, soit une augmentation de 26% par rapport à la décennie 2000-2009 où le taux de production est estimé à 32,6 millions de quintaux.

La production est constituée principalement de blé dur et d'orge, qui représentent respectivement 51% et 29% du taux de production céréalière totale 2010-2017 [1]



Fig1.1 Rendement qx/ha (2015-2019) –Algérie [1]

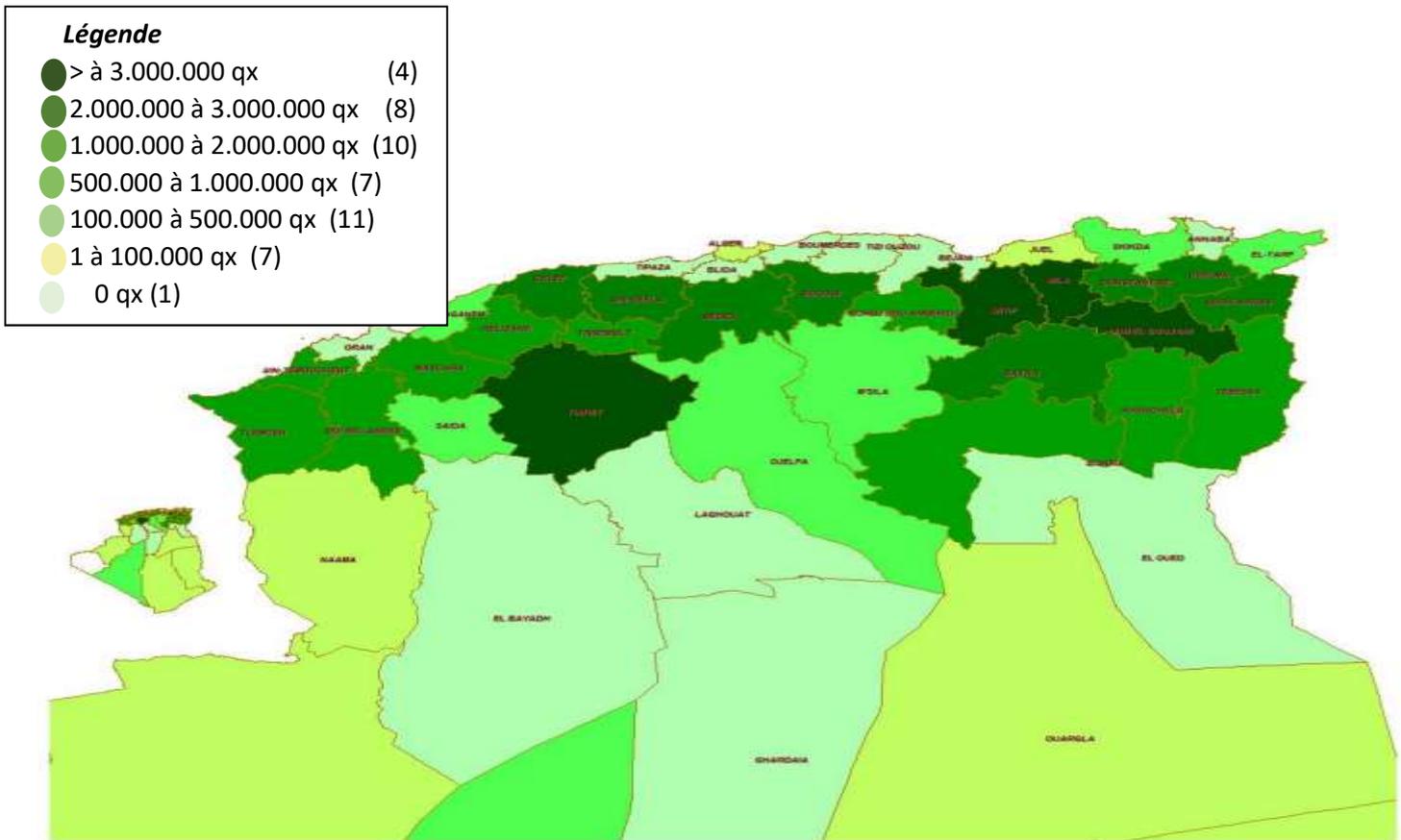


Fig1.2 Répartition de la Production céréalière en 2019 –Algérie [1]

3. Céréales

Par définition, une céréale est une plante cultivée principalement pour ses graines utilisées pour l'alimentation humaine et animale. Il s'agit quasi exclusivement de plantes de la famille des graminées. On y associe aussi certaines plantes d'autres familles botaniques, comme le sarrasin (polygonacées), le quinoa ou l'amarante (Chénopodiacées). [2]

Les plus répandues, et aussi les plus cultivées dans le monde, sont le blé, l'orge, le maïs ou le riz. Nous allons nous intéresser dans la suite uniquement par le blé, le produit à large consommation dans notre pays.

a. Blé

Le blé est une céréale de la famille des Graminées dont la graine sert à l'alimentation humaine.

b. Histoire du blé, cette plante du genre *Triticum*

Historiquement, au Moyen Âge, le mot blé faisait référence aux cultures annuelles. Au XVIIIe siècle, le terme « blé » désignait toute plante cultivée dont les graines pouvaient être réduites en farine pour l'alimentation humaine. Aujourd'hui, le blé est considéré comme étant une plante monocotylédone du genre *Triticum*. Du point de vue génétique, le blé est une plante hexaploïde; elle doit provenir d'une hybridation entre des blés tétraploïdes cultivés et des espèces sauvages diploïdes. [3]

c. Différentes espèces de blés

Plusieurs espèces appartiennent au genre *Triticum* [3] :

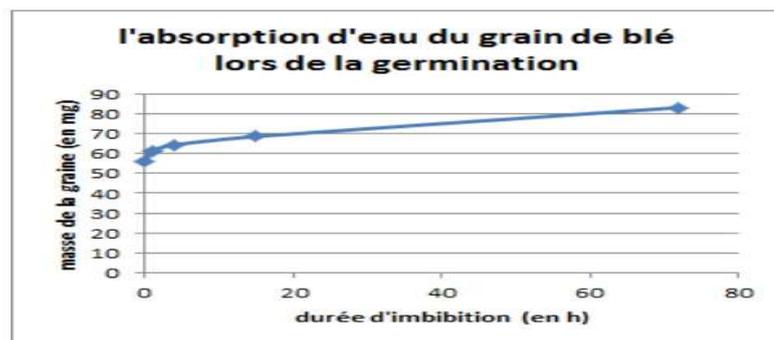
- *Triticum aestivum*, ou blé tendre, aussi appelé froment, qui est couramment utilisé pour le pain ;
- *Triticum durum*, ou blé dur, qui sert pour les pâtes et le couscous ;
- *Triticum spelta*, ou épeautre, un blé « vêtu » (en allemand Spelz fait référence à l'enveloppe) ;
- *Triticum monococcum*, pour le petit épeautre ou engrain ;
- *Triticum dicoccum*, pour l'amidonner. Avant l'apparition de l'agriculture, l'amidonner sauvage était récolté.

d. Cycle de vie du blé

Le cycle de vie du blé passe par les étapes suivantes [4][5] :

- ✓ Le semis : Début octobre, semis des grains de blé
- ✓ La germination : (Novembre/Décembre) le germe contenu dans la graine de blé se développe au contact de l'humidité de la terre

Le grain à l'état sec (seulement 10 à 15% d'eau) doit tout d'abord se procurer l'eau nécessaire à sa reprise d'activité, c'est l'imbibition.



[Hervé Levesque, Ifé-ENS Lyon]

Fig1.3 Absorption d'eau du grain de blé lors de la germination [4]

- ✓ La levée : (Décembre/janvier) apparition des petites pousses
- ✓ Le tallage : à la fin d'hiver, la plante se ramifie pour former une touffe.

Les deux stades précédemment mentionnés ou il y'a la fonction d'enracinement au sol, la racine exerce une fonction d'absorption des éléments minéraux (eau, gaz et ions minéraux dissous).

- ✓ La montaison : Fin Avril, la plante commence à grandir
- ✓ L'épiaison : fin avril début mai l'épi de blé apparait.
- ✓ La moisson : les grains de l'épi de blé grossissent et mûrissent en juin (le début de la moisson).

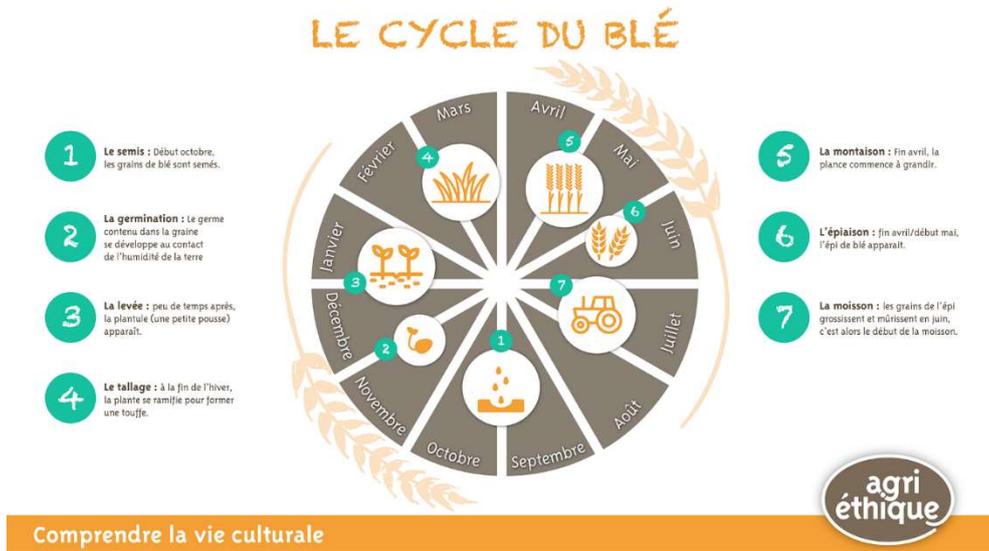


Fig1.4 Cycle Végétal du Blé [5]

e. Irrigation des champs du Blé

Le manque d'eau affecte négativement le rendement, les besoins en eau du blé varient selon les :

- La variété de blé utilisé ;
- Durée du cycle de croissance ;
- La nature de la terre cultivée ;
- Conditions climatiques.

Les deux-tiers de la superficie réservée pour la céréale en Algérie se caractérisent par un manque et/ou mauvaise irrigation pluviale durant les différentes saisons.

Souvent un stress hydrique coïncide avec les étapes critiques du développement du blé qui nécessite beaucoup d'eau, ce qui engendre un faible rendement.

D'après les experts en agriculture de blé, chaque 10mm d'eau rajouté va augmenter le rendement de 2 à 2.5 qx/ha. [6]

	Conditions sec	Irrigation complémentaire
Quantité d'eau	/	80mm
Rendement	10-18qx/ha	59.4qx/ha

Tableau 1.1 Rendement du blé sous condition sec/Irrigation complémentaire [6]

Source : Station Khemiss Meliana (ITGC)

La consommation quantitative de l'eau par le blé est entre 450-600mm pendant toute la période végétale pour avoir un rendement supérieur 60qx/ha. [6]

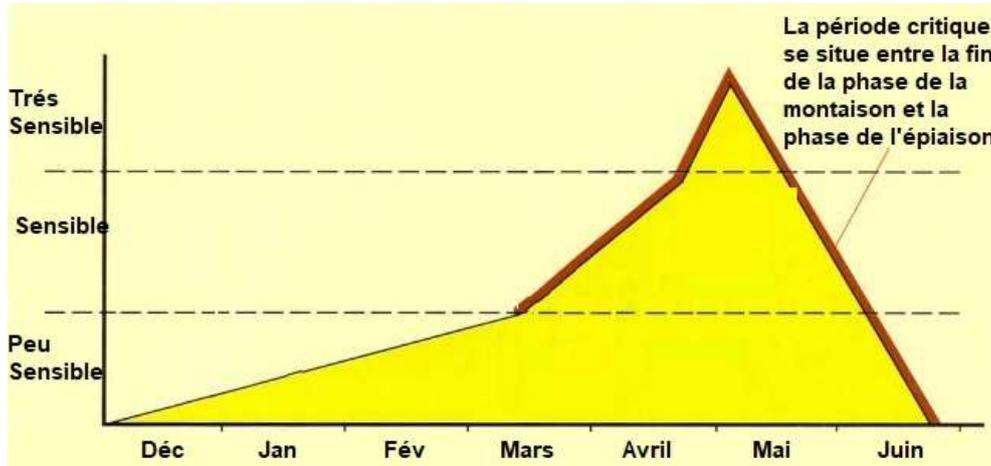


Fig 1.5 La sensibilité au Stress Hydrique du blé [6]

Source : Station khmiss Meliana (ITGC)

f. Exigences Climatiques des champs de blé

Un bon rendement des champs de blé n'est pas associé seulement à la variété du blé utilisé mais aussi aux conditions climatiques dominantes des champs agricoles du blé parmi eux nous pouvons citer :

- La pluviométrie qui est un facteur clé pour l'irrigation des champs ;
- La température ambiante qui est considérée comme l'un des éléments d'influence pour le développement du blé, la température optimale varie de 20 à 22 °c, jusqu'à un maximum de 35 °c (Eliard, 1974 ; Boyldieu, 1982) [7].

Selon Vilain (1987), le blé dur requiert une somme de température pour ses différentes phases physiologiques qui sont réparties ainsi [7] :

- ✓ Semi-levée (150 °c),
- ✓ Levée-fin tallage (500°c),
- ✓ Montaison-floraison (850 °c),
- ✓ Floraison-maturation (800°c), faisant un total de 2300°c pour tout le cycle.

L'Algérie est dominé par une forte disparité du climat entre les régions, de type méditerranéen au littoral jusqu'au l'Atlas Tellien qui se caractérise par un été chaud et sec et un hiver frai et humide, de type semi-aride sur les hauts plateaux et désertique après l'Atlas saharien

Le nord du pays plus particulièrement le nord-est reçoit une moyenne annuelle de précipitation entre 600 et 1150mm par contre le nord-ouest reçoit uniquement entre 250 et 500mm [8]

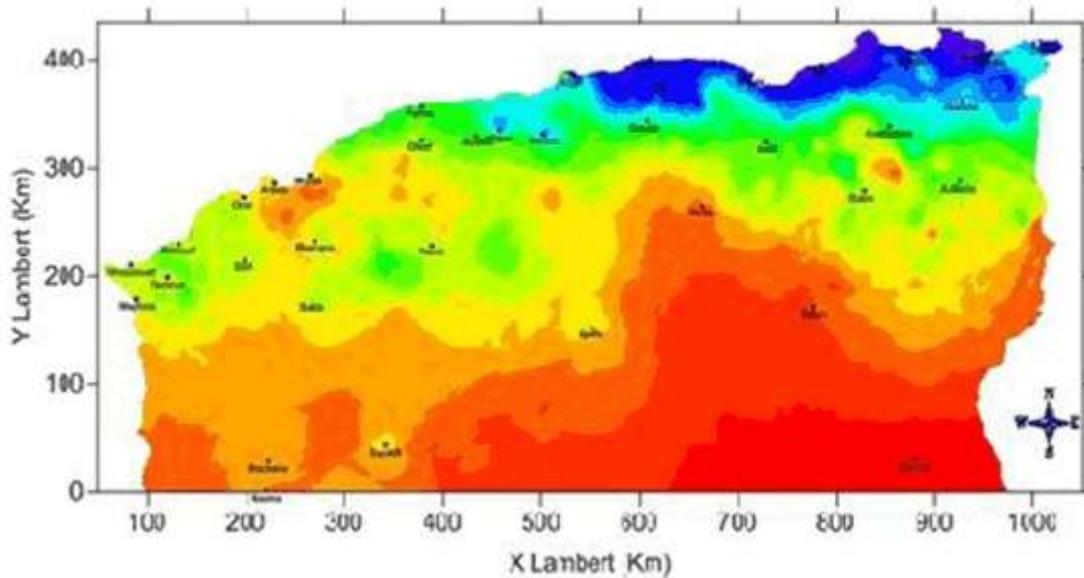


Fig 1.6 Carte de pluviométrie annuelle de l'Algérie du nord (année 2012)

Source : M. Mahmoud, ONM 2012

4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'essentiel d'une filière stratégique pour notre pays, qui est l'agriculture céréalières et plus précisément le blé, nous avons évoqué l'insuffisance productible de ce dernier et les causes qui influent sur le rendement telles que les mauvaises irrigations et les conditions climatiques engendrant des pertes considérables pour les agriculteurs et pour le pays, d'où la nécessité d'introduire d'autres technologies pour améliorer le rendement et l'efficacité des pratiques agricoles telles que les réseaux de capteurs sans fils.

CHAPITRE II

Agriculture de Précision

Chapitre II : Agriculture de Précision

1. Introduction

L'importance de l'Agriculture céréalière a engagé l'homme à fournir des efforts supplémentaires pour améliorer la production de ce produit vital, en faisant appel aux nouvelles technologies dans l'agriculture et en se basant sur des outils d'aide à la décision pour mieux surveiller les champs agricoles et mieux utiliser les ressources. Autrement dit, passer de l'agriculture classique à l'agriculture de précision.

Une technologie très répandue actuellement en agriculture est l'utilisation des techniques basées sur les réseaux sans fils équipés de capteurs, appelés « Réseaux de capteurs sans fil » ou en anglais (Wireless Sensor Network). Cette technologie fut utilisée initialement par les militaires dans le domaine de la Reconnaissance et l'espionnage, puis dans les autres applications sécuritaires et civiles. Le besoin d'utiliser de telles technologies vient de la facilité de la mise en œuvre, l'adaptation aux différentes situations et aussi les très larges superficies couvertes pour avoir un certain type de données.

2. Définition

L'agriculture de précision est fondée sur l'utilisation des nouvelles technologies tel que l'AI et l'IoT, pour aider l'agriculteur à améliorer et augmenter le rendement, la production et les performances des exploitations agricoles tout en optimisant les charges comme l'eau d'irrigation, la consommation électrique et d'autres intrants.

L'agriculture de précision est aussi un moyen plus conservateur à l'environnement en se basant sur des informations collectées sur l'état de lieu des plantes afin de rationaliser et mettre fin aux gaspillages et aux utilisations excessives des ressources naturelles et/ou produits chimiques.

En d'autres termes l'agriculture de précision est de produire plus avec moins de ressources. [10]

3. Historique de l'agriculture de précision

L'agriculture de précision a vu ses fondements aux États-Unis dans les années 1980 [12]. En 1985, des chercheurs de l'Université du Minnesota, font varier les apports d'amendements calciques sur des parcelles agricoles. On cherche ensuite à moduler les apports de certains intrants (azote, phosphore, potassium) dans certaines grandes cultures très consommatrices d'énergie et d'intrants (maïs, betteraves sucrières par exemple) [13].

C'est à cette époque qu'apparaît la pratique du « grid-sampling » (un échantillonnage sur un maillage fixe d'un point par hectare).

Vers la fin des années 1980, grâce aux prélèvements ainsi échantillonnés, les premières « cartes de rendement de production » puis « cartes de préconisation » pour les apports modulés en éléments fertilisés et pour les corrections de pH font leur apparition. Ces pratiques sont ensuite diffusées au Canada et en Australie, puis avec plus ou moins de succès selon les pays en Europe [14], d'abord au Royaume-Uni [15] et en Allemagne et peu après en France, puis en Asie dans le cadre des suites de la révolution verte.

En Algérie, la Crise alimentaire internationale de 2007-2008, a poussé l'état à faire des efforts pour développer le domaine d'agriculture en mettant en œuvre la loi d'orientation agricole de 2008 et encourager les professionnels à augmenter leur production en utilisant des nouvelles méthodes et technologies.

4. Enjeux de l'agriculture de précision

Le but principal de l'agriculture de précision est d'avoir le maximum de production agricole en utilisant le minimum possible de ressources énergétique, hydrique et d'autres intrants tel que les engrais et les phytosanitaires. Il s'agit d'optimiser la gestion d'une parcelle d'un triple point de vue [16] :

- **Agronomique** : mécanisation agricole conjointe à un ajustement des pratiques culturales en se rapprochant mieux des besoins de la plante (exemple : satisfaction des besoins azotés) ; la précision agronomique vise à améliorer l'efficacité intrants/rendements, y compris par le choix de souches et variétés plus adaptées au contexte édaphique ou phytosanitaire. Contrairement au principe d'homogénéité et d'homogénéisation des parcelles prônées aux débuts de la révolution verte, l'agriculture de précision cherche à s'adapter à la variabilité des conditions naturelles du milieu aux échelles intra-parcellaires, ce qui est devenu encore plus nécessaire dans les pays industriels et dans les régions de grandes cultures en raison d'une tendance marquée et constante à l'augmentation de la taille de chaque parcelle.
- **Environnemental** : réduction de l'empreinte écologique de l'activité agricole (par exemple en limitant le lessivage d'azote excédentaire). Il s'agit aussi de diminuer certains risques pour la santé humaine et l'environnement (en particulier en diminuant la diffusion dans l'environnement des nitrates, phosphates et pesticides, en cherchant à appliquer la juste dose, quand il faut et où il faut). Ce souci de l'environnement apparaît surtout à partir des années 1999 marquées par le Sommet de la Terre de Rio et les premiers constats d'impacts environnementaux et sanitaires négatifs de la révolution verte initialement basée sur la mécanisation et un usage peu mesuré des engrais et pesticides, ou du drainage et de l'irrigation.
- **Économique** : augmentation de la compétitivité par une meilleure efficacité des pratiques. Il a été estimé aux États-Unis dans les années 1990 que gaspiller moins d'intrants permettait à un agriculteur d'économiser environ 80 \$ par hectare grâce à la modulation de la fumure N, P et K₂ (ce calcul qui ne vaut pas pour l'Europe où l'agriculture était moins industrielle).

De plus, l'agriculture de précision met à la disposition de l'agriculteur de nombreuses informations qui peuvent :

- Constituer une véritable mémoire de l'exploitation ;
- Aider la prise de décision ;
- Aller dans le sens des besoins de traçabilité ;
- Améliorer la qualité intrinsèque des produits agricoles (exemple : taux de protéines pour les blés panifiables) ;
- Améliorer les intrants des différentes parcelles.

5. Moyen pratique de l'agriculture de précision

L'agriculture de précision se différencie par rapport à l'agriculture classique par l'utilisation des nouvelles technologies pour mieux gérer les pratiques agricoles en mettant en place des systèmes de collecte et de transfert d'information tels que les réseaux de capteur sans fils en encore plus les IoTs.

a. IoT « Internet of Things »

L'Internet of Things ou en français l'Internet des objets est une description du réseau de terminaux physiques appelés « Things » ou « Objet ». Ces derniers incorporent plusieurs technologies matérielles et logicielles telles que les capteurs et les ordinateurs connectés entre eux sur Internet en vue d'échanger des informations.

Ces dernières années, des technologies modernes ont pu être développées plus que jamais ce qui a rendu l'utilisation de telles technologies, à l'instar des « IoT », indispensables, pour la vie quotidienne. Parmi ces technologies on peut citer [11]:

- Capteurs fiables à faible consommation énergétique et à des coûts modiques, ce qui a rendu l'utilisation des IoT rentable pour beaucoup de domaines comme l'agriculture ;
- Connectivité : Le développement des nouveaux protocoles réseau a facilité avec efficacité la connexion des capteurs au cloud et à d'autres terminaux ;
- Plates-formes cloud. Accès facile aux plates-formes cloud par différents utilisateurs, sans pour autant avoir à s'occuper de sa gestion.
- Machine learning et analyses. Ce progrès effectué dans les domaines du machine learning et des analyses, a permis aux utilisateurs d'obtenir de très grandes quantités de données diversifiées stockées dans le cloud, plus rapidement et plus facilement.
- Intelligence artificielle (IA) conversationnelle Les progrès effectués en matière de réseaux neuronaux ont permis aux terminaux IoT de gérer le traitement du langage naturel (avec notamment les assistants digitaux personnels tels qu'Alexa, Cortana et Siri), et les ont rendus attrayants, abordables et viables pour une utilisation domestique.

Dans ce monde Hyper-connecté les systèmes digitaux peuvent enregistrer, surveiller et ajuster chaque interaction entre les objets connectés. Le monde physique rencontre le monde digital, et ils coopèrent.

b. Application des IoT dans l'agriculture

Notre monde est numériquement connecté et les données sont un atout essentiel.

Les données des appareils peuvent guider les décisions des agriculteurs, en les aidant à cultiver de manière plus intelligente et plus sûre et à s'adapter plus rapidement aux conditions changeantes.

La capacité de surveiller à distance les conditions et les infrastructures de la ferme peut libérer du temps, de la main-d'œuvre et des capitaux à investir, permettant aux agriculteurs de se concentrer sur d'autres choses.

Connecter les ressources physiques des exploitations agricoles à Internet favorise :

- Surveillance à distance des conditions et des infrastructures de la ferme, gain de temps et de main-d'œuvre lors des contrôles de routine de la ferme
- Améliorer la prise de décision des producteurs grâce à l'analyse des données
- Des informations plus rapides à partir de données en temps réel sur l'ensemble de la chaîne de valeur, aidant les agriculteurs à répondre aux attentes du marché
- L'efficacité dans la façon dont nous produisons des aliments pour garantir moins de gaspillage, la rapidité de mise sur le marché et une meilleure traçabilité.
- Renforcer les capacités de répondre aux technologies nouvelles et émergentes et investir dans la recherche et le développement pour contribuer à l'innovation continue et à l'amélioration de la productivité.

Les applications IoT les plus courantes dans l'agriculture de précision sont :

- Systèmes basés sur des capteurs pour surveiller les cultures, le sol, les champs, le bétail, les installations de stockage ou, fondamentalement, tout facteur important qui influence la production.
- Véhicules agricoles intelligents, drones, robots autonomes et actionneurs.
- Des espaces agricoles connectés comme les serres intelligentes ou la culture hydroponique.
- Systèmes d'analyse, de visualisation et de gestion des données.
- Modélisation prédictive et planification.

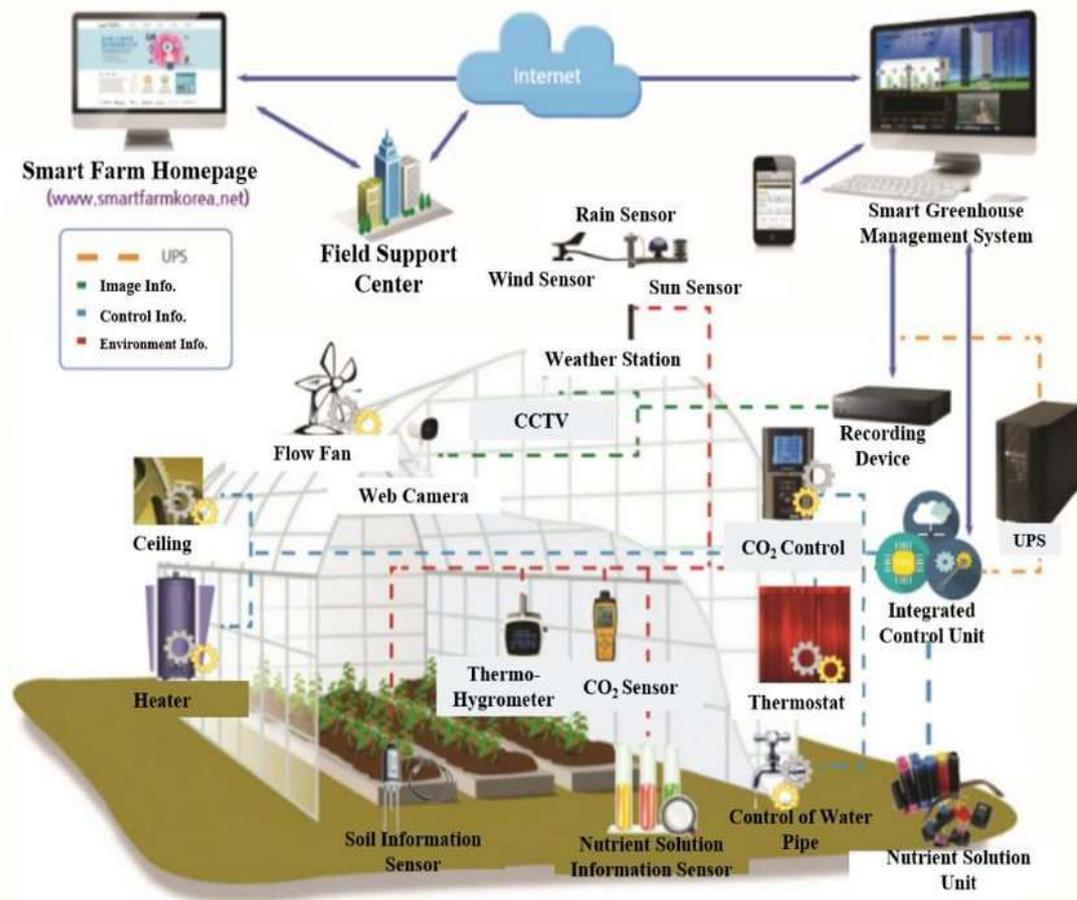


Fig 2.1 Model typique d'agriculture utilisant les IoT [17]

L'agriculture intelligente ou appeler agriculture de précision basant sur les technologies IoT voir exemple (Fig2.1) ; utilisant des capteurs avec une technique de collecte, de transfert et traitement des données connus sous le nom de « réseau de capteurs sans fils ou en anglais wireless Sensor Network ».

c. Réseau de capteurs sans fils :

Un réseau de capteurs sans fils ou wireless sensor network « WSN » en anglais est un type particulier de réseau sans fil ad-hoc composés d'un ou plusieurs nœuds équipés de capteurs autonomes pour récolter et transmettre automatiquement des données. Ces nœuds sont déployés dans une zone cible appelée « zone ou champ de captage ».

Les nœuds de capteurs sans fils ont pour objectif la surveillance d'une zone cible et l'envoi des données collectées à l'utilisateur final à travers un réseau de communication (Bluetooth, GSM, internet, satellite, ...) pour l'aider à prendre des décisions.

Les réseaux de capteurs sans fils voient leurs applications se diversifier dans de nombreux domaines notamment pour des applications militaires, agricoles, environnementales, industrielles et autres.

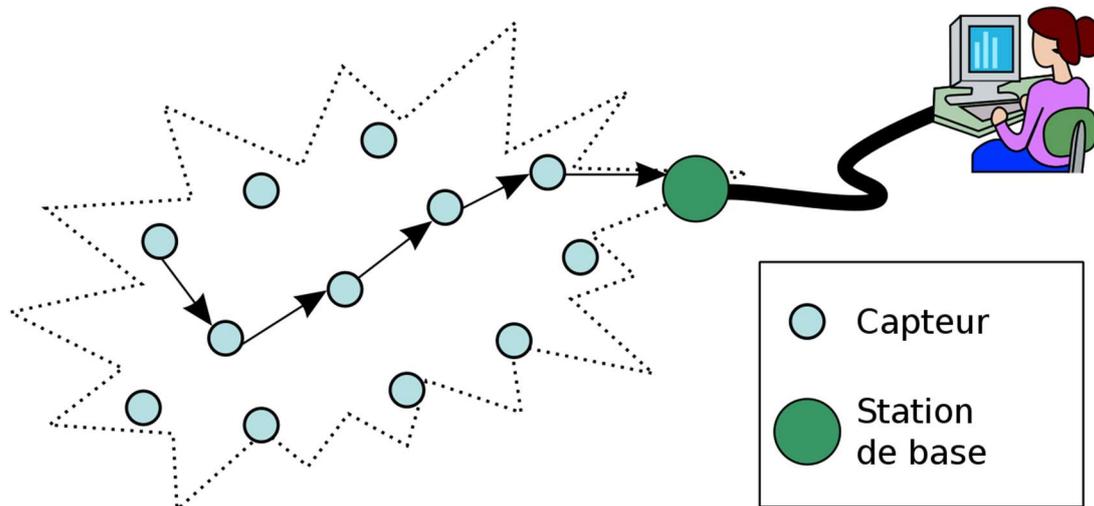


Fig 2.2 Schéma de principe d'un RCSF

d. Historique des RCSF

Avant les années 1990 les applications à base des réseaux de capteurs sans fils ont été développées essentiellement pour le domaine militaire, de la recherche scientifique et quelques applications radio.

Au fur et mesure de l'avancement technologique, de nouvelles applications à base d'RCSF ont vu le jour, notamment dans le domaine de l'environnement, l'agriculture et de l'industrie. Aujourd'hui, grâce aux récents progrès des techniques sans-fil, de nouveaux produits exploitant des réseaux de capteurs sans-fil sont employés pour récupérer des données environnementales et autres.

e. Enjeux des RCSF

Les Réseaux de capteurs sans fil sont considérés parmi les technologies les plus prometteuses et les plus utilisées dans le monde d'aujourd'hui et dans un futur proche comme l'indique le magazine Technology Review du MIT « le réseau de capteurs sans fil est l'une des dix nouvelles technologies qui bouleverseront le monde et notre manière de vivre et de travailler » [18]. Ils répondent à l'émergence ces dernières années, d'un besoin accru de contrôle de phénomènes physiques et biologiques complexes, dans différents domaines :

- Industriels, techniques et scientifique (monitoring de la température, la pression, l'hygrométrie, la luminosité, contrôle qualité d'une chaîne de fabrication, etc.),
- Écologie et environnement (surveillance des ultraviolets, de la radioactivité, de polluants tels que les HAP, les métaux lourds, ou de l'ozone ou du NO₂, du risque sismique ou d'explosion d'un volcan, ou encore le suivi étendu d'émissions de CO₂ et d'autres gaz à effet de serre),
- Santé (suivi de malades, capteurs sur le corps humain, veille éco-épidémiologique et épidémiologique,
- Transports : contrôle du trafic routier, urbain, ferroviaire, portuaire, etc., prévention des accidents, optimisations diverses,

- L'automatisation des bâtiments domotique,
- Gestion d'hôpitaux, etc.
- Sécurité (ex : détection et surveillance d'incendies de forêts, d'avalanches, d'ouragans, de risque de défaillance d'équipement de grande envergure (ex barrage, réseau de digue, réseau routier en cas de tremblement de terre, etc.),
- Usages militaire : l'exemple parfois cité de « poussière intelligente » pouvant protéger des terrains militaires ou la périphérie de navire de guerre semble encore relever de la science-fiction mais « l'intelligence ambiante » et l'« Internet des objets » sont concrètement développés dans de nombreux domaines.

Ces réseaux peuvent être évolutifs [19] et dans une certaine mesure faire preuve de capacités de résilience « auto-guérison » et d'auto-organisation [20], grâce à la capacités des capteurs ou des nœuds du réseau à « coopérer entre eux »[21] et éventuellement à capter et conserver [22] de l'énergie dans leur environnement à partir du vent, du soleil, de l'hydrodynamique, via des micro-générateurs [23], à base de systèmes piézoélectriques ou autres.

L'enjeu est aussi économique, puisque selon un rapport Wireless Sensor Networks 2012-2022 publié par IDTechEx (société de veille industrielle) le marché des réseaux de capteurs sans fil pesait déjà environ 450 millions de dollars en 2012, ce rapport prévoyant qu'il atteigne 2 milliards de dollars avant 2022[24]. Selon un second rapport, si des normes (y compris éthiques) et des technologies associées adaptées (Wireless HART, ZigBee, standard ISA 11.11a...) apparaissent pour surmonter certains obstacles à leur déploiement, ce marché pourrait être encore plus important[25].

f. Principe de fonctionnement d'un RCSF

Le capteur sans fils transfère les données acquises à travers un protocole de routage multi-saut (cas de plusieurs nœuds de capteur) vers un capteur principal considéré comme un point de collecte, appelé nœud-puits (ou sink). Ce dernier peut être connecté à l'utilisateur via un réseau (GSM, Internet, Satellite ou un autre système). L'utilisateur peut adresser des requêtes aux autres nœuds du réseau, précisant le type de données requises et ainsi récolter les données voulus captées par le biais du nœud puits.

Le développement technologique de la micro-électronique, des technologies de télécommunication sans fil et des applications logicielles ont permis de produire des capteurs miniaturisés « des micro-capteurs » à prix très économiques et raisonnables, qui ont la possibilité de fonctionner en réseaux

Ces petits micro-capteurs sont donc de véritables systèmes embarqués.

Le déploiement de plusieurs d'entre eux, en vue de collecter et transmettre des données voulus tel que les paramètres environnementaux vers un ou plusieurs points de collecte, d'une manière autonome, forme un réseau de capteurs sans fil (Wireless Sensor Network ou WSN).

g. Modèle de Nœud d'un RCSF

Il existe plusieurs types des Nœuds dans un RCSF selon l'application et la tâche voulus [9] :

- **Un Nœud régulier** : qui intègre deux unités (traitements et transmission).

L'unité de traitement est chargée du traitement des données transités dans le nœud, elle est structurée en mémoire et un microcontrôleur doté d'un logiciel dédié, tandis que l'unité de transmission est responsable de l'émission et la réception des données à travers un support de communication sans fil.

Le nœud est autonome en énergie électrique grâce à une batterie intégrée qui peut être rechargeable par le biais d'un module générateur d'énergie (cellule photovoltaïque, etc.), en plus de ses unités, on peut trouver d'autres modules supplémentaires comme le GPS.

- **Un Nœud capteur** : appelé aussi Nœud source c'est un Nœud régulier équipé d'une unité de captage chargée de capter des grandeurs physiques (chaleur, humidité, vibrations, rayonnement...) et d'un convertisseur Analogique/Numérique pour les transformer en grandeurs numériques.
- **Un Nœud actionneur** : appelé aussi Robot c'est un Nœud régulier équipé d'une ou plusieurs unités pour réaliser des tâches bien spécifiques comme le déplacement ou la commande d'un interrupteur.
- **Un Nœud puits** : c'est un Nœud régulier qui contient une seconde unité de communication sans fil qui sert à transférer les données réceptionnées au utilisateur via un deuxième support de communication (Bluetooth, WI-FI, GSM, ...).
- **Un Nœud passerelle** : appelé aussi gateway en anglais, c'est presque comme le Nœud puits mais relie les données sur le même canal de communication.

On peut aussi classer les Nœuds selon le rôle exercé dans un RCSF [9]:

- **Nœud Source « NS »** : qui a le rôle d'acquisition des données puis les transmettre directement ou indirectement au utilisateur final.
- **Nœud Relais « NR »** : qui a le rôle de transférer les données réceptionnées du Nœud Source ou d'un autre Nœud relais à un autre nœud relais ou an Nœud collecteur.
- **Nœud Collecteur « NC »**: appelé généralement Cluster-Head dans une architecture hiérarchique qui a pour rôle principal de collecter les données en provenance du Nœud source

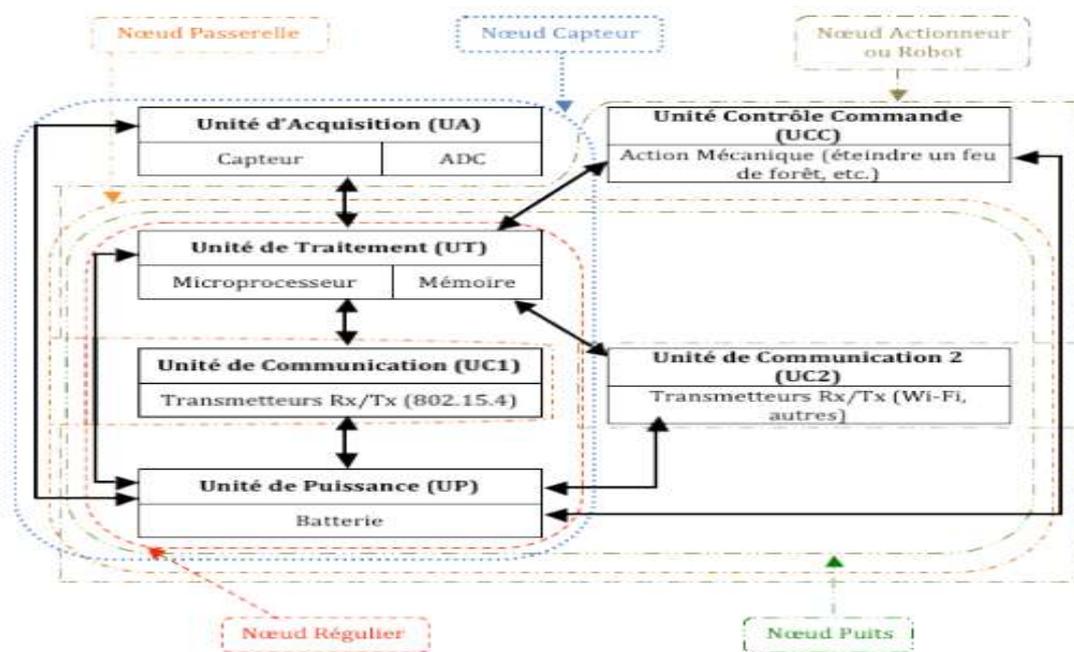


Fig 2.3 Architecture des différents types de Nœuds dans un RCSF [9]

h. Plates-formes des RCSF

Parmi les standards les plus aptes à être exploités dans les réseaux de capteurs sans-fil, la double pile protocolaire Bluetooth / ZigBee.

- Le Bluetooth, dont Ericsson a lancé le projet en 1994, a été standardisé sous la norme IEEE 802.15.1 et a comme but la création et le maintien de réseaux à portée personnelle, PAN (Personal Area Network). Un tel réseau est utilisé pour le transfert de données à bas débit et à faible distance entre appareils compatibles. Malheureusement, le grand défaut de cette technique est sa trop grande consommation d'énergie et ne peut donc pas être utilisée par des capteurs qui sont alimentés par une batterie et qui idéalement devraient fonctionner durant plusieurs années.
- Le ZigBee combiné avec IEEE 802.15.4 offre des caractéristiques répondant encore mieux aux besoins des réseaux de capteurs en termes d'économies d'énergie. ZigBee offre des débits de données moindres, mais il consomme également nettement moins que Bluetooth. Un faible débit de données n'est pas un handicap pour un réseau de capteurs où les fréquences de transmission sont faibles.

Les constructeurs tendent à employer des « techniques propriétaires » ayant l'avantage d'être spécifiquement optimisées pour une utilisation précise, mais avec l'inconvénient de ne pas être compatibles entre elles.

i. Matériels

De nouvelles techniques influenceront l'avenir des réseaux de capteurs. par exemple, UWB (Ultra wideband) est une technique de transmission permettant des consommations extrêmement basses grâce à sa simplicité matérielle. De plus, l'atténuation du signal engendré par des obstacles est moindre qu'avec les systèmes radio à bande étroite conventionnels.

ii. Logiciels

Le domaine des capteurs sans fil semble promis à un grand essor. De nombreux nouveaux produits logiciels sont attendus, y compris dans le domaine de l'open source avec par exemple TinyOS développé à l'Université de Berkeley ; un système d'exploitation "open source" conçu pour les capteurs embarqués sans-fil qui est déjà utilisé (en 2009) par plus de 500 universités et centres de recherche dans le monde. La réalisation de programmes sur cette plateforme s'effectue exclusivement en NesC (dialecte du C). Cet OS a notamment pour particularité une taille extrêmement réduite en termes de mémoire (quelques kilooctets).

i. Architectures d'un RCSF

Il existe plusieurs topologies pour les réseaux à communication radio. Nous discutons ci-dessous des topologies applicables aux réseaux de capteurs.

i. La topologie en étoile

Dans cette topologie une station de base envoie ou reçoit un message via un certain nombre de nœuds. Ces nœuds peuvent seulement envoyer ou recevoir un message de l'unique station de base, il ne leur est pas permis de s'échanger des messages.

Les réseaux en étoiles sont utilisés pour connecter des capteurs isolés capables de transmettre une information dès la mesure du phénomène, ce qui représente la majorité des applications d'avertissement tel que les alarmes (ex: capteur de courant Intens'O LoRaWAN, détecteur de fumée Smokeo). Ils ont l'avantage de simplifier les équipements aux niveaux des nœuds et de nécessiter peu d'infrastructure.

Avantage : simplicité et faible consommation d'énergie des nœuds, moindre latence de communication entre les nœuds et la station de base.

Inconvénient : la station de base est vulnérable, car tout le réseau est géré par un seul nœud.

ii. La topologie point par point

Dans ce cas (dit « communication multi-sauts »), tout nœud peut échanger avec n'importe quel autre nœud du réseau (s'il est à portée de transmission). Un nœud voulant transmettre un message à un autre nœud hors de sa portée de transmission, peut utiliser un nœud intermédiaire pour envoyer son message au nœud destinataire.

Avantage : Possibilité de passer à l'échelle du réseau, avec redondance et tolérance aux fautes.

Inconvénient : une consommation d'énergie plus importante est induite par la communication multi-sauts. Une latence est créée par le passage des messages des nœuds par plusieurs autres avant d'arriver à la station de base.

iii. La topologie maillée

Les réseaux maillés sont employés dans les réseaux de capteurs plus denses. Ils consistent à interconnecter tous les nœuds ensemble selon le degré d'interconnexion voulu. Ils sont très utilisés dans la domotique ou l'industrie pour la communication entre équipements (M2M) car ils sont très peu sujets aux pannes et extensibles [61]. Ils sont plus complexes à mettre en place, notamment dû au nombre de liaisons nécessaires : pour N terminaux il faut $N*(N-1)/2$ liaisons.

iv. L'architecture de groupe

L'architecture de groupe consiste à hiérarchiser les équipements du réseau : à chaque groupe de nœuds (cluster) on associe un nœud chef (cluster-head « cercle de couleur bleu sur la figure 2.4 »). À l'intérieur d'un groupe, les nœuds membres (cercle de couleur verte sur la figure 2.4) n'ont que la capacité de communiquer avec un nœud chef (CH). Seul le nœud chef peut communiquer avec la station de base (dans un routage d'étoile à étoile) ou avec d'autres nœuds chefs (routage inter-cluster). Dans cette configuration, la panne d'un objet de niveau supérieur entraîne celle des objets situés en dessous.

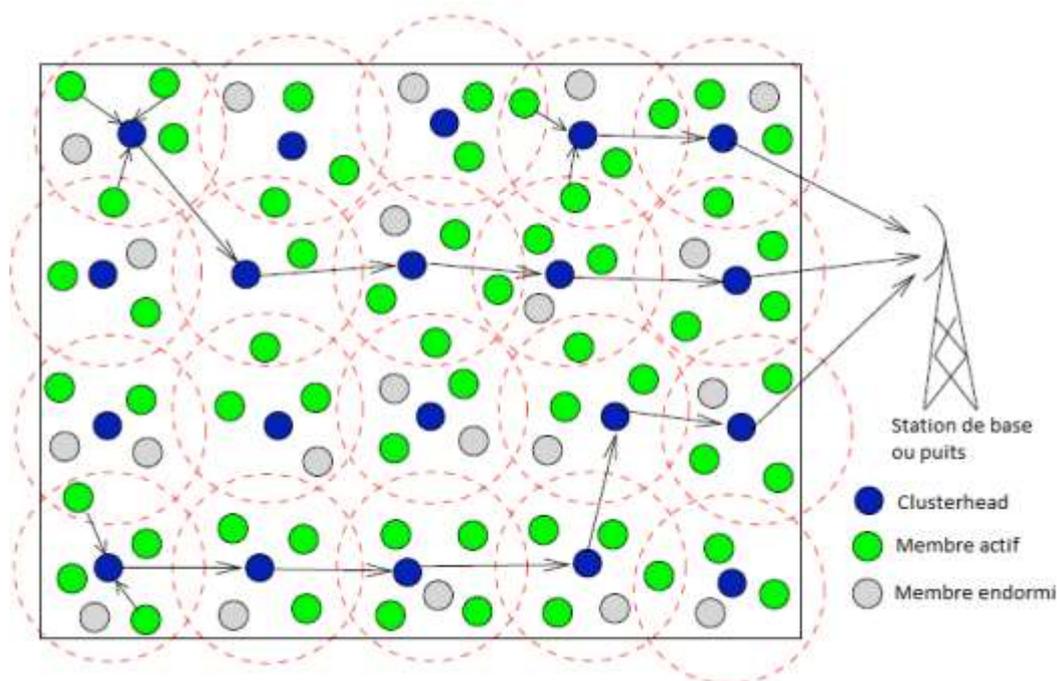


Fig 2.4 Exemple de topologie basée sur des clusters [9]

v. La topologie hybride

Une topologie hybride entre celle en étoile et en grille fournit des communications réseau robustes et diverses, en assurant la minimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs. Dans ce type de

topologie, les nœuds capteurs autonomes en énergie ne routent pas les messages, mais il y a d'autres nœuds qui ont la possibilité de faire le routage des messages. En général, ces nœuds disposent d'une source d'énergie externe.

j. Optimisation énergétique

L'optimisation de la consommation énergétique est le fait de nombreux travaux de recherches, elle dépend à la fois de l'électronique, du moyen de transport des données et de l'organisation du réseau. On peut les classer en cinq catégories :

- L'optimisation de la communication radio
- Le fonctionnement par cycle d'activité
- La réduction des données
- Le routage efficace de l'information
- Le réapprovisionnement de la batterie

L'optimisation de la communication radio concerne un large panel de méthodes qui permettent de réduire la consommation des nœuds tout en gardant une bonne connectivité. Parmi elles, on peut citer :

- Le contrôle de la puissance de transmission : les protocoles de communication existant intègrent généralement une fonction d'adaptation de la puissance,
- La communication coopérative qui se base sur le principe de sur-écoute pour augmenter la portée et améliorer la qualité du signal,
- L'utilisation d'antennes directionnelles qui ont la particularité d'émettre dans une ou quelques directions à la fois,
- La radio cognitive qui adapte dynamiquement ses paramètres comme la fréquence porteuse, la puissance de transmission, la modulation ou la bande passante.

Le fonctionnement par cycle d'activité consiste à faire fonctionner le nœud selon différents modes au cours de sa durée de fonctionnement. On va chercher notamment à remplacer le mode inactif par le mode sommeil durant les périodes où le nœud ne communique pas. Dans un fonctionnement par cycle d'activité idéal, le nœud reste en mode sommeil la majeure partie du temps et se réveille uniquement au moment de la transmission/réception de données.

La réduction des données a pour objectif de réduire la quantité de donnée transmise à la station de base afin de diminuer l'énergie nécessaire à la transmission et à la réception des messages. Elle peut consister en :

- L'agrégation des données qui consiste à relayer les données de plusieurs nœuds à la fois,
- La compression des données qui consiste à les encoder de manière à réduire leur taille,
- La prédiction des données, basée sur un modèle du phénomène physique capturé, qui consiste à éviter les transmissions redondantes.

Le routage efficace de l'information est crucial pour l'optimisation énergétique du réseau de capteur sans fil (RCSF) : un choix de routage approprié permet de limiter les risques de collision de données et le coût énergétique de chaque transmission. Parmi ces stratégies, on distingue les RCSF non-hiérarchisés, où chaque nœud exécute la même tâche, des RCSF hiérarchisés où chaque nœud se voit attribuer un rôle qui va déterminer l'architecture du réseau.

Conclusion :

Ce chapitre présente un moyen technologique très efficace « le réseau de capteurs sans fils » qui est considéré non seulement comme un outil d'aide à la décision pour les professionnels de l'agriculture dans leurs travaux et besoin quotidien, mais aussi la possibilité de fonctionnement autonome d'une façon automatique, cela permis de passer de la méthode classique à une agriculture intelligente de précision.

Les réseaux de capteurs utilisés dans l'agriculture permettront de rentabiliser au maximum la production tout en utilisant rationnellement les ressources, surtout celle qui devient de plus en plus rare comme l'eau d'irrigation, et celle qui présente un danger pour la santé et la nature comme les pesticides.

CHAPITRE III

Réalisation pratique d'un RCSF pour la
Surveillance de l'Agriculture Céréalière

Chapitre III : Réalisation pratique d'un RCSF pour la Surveillance de l'Agriculture Céréalière

1. Introduction

Nous allons présenter la partie pratique de notre réseau de capteurs sans fils utilisé pour une application de l'agriculture céréalière, qui est la surveillance des paramètres qui affecte le rendement de la production céréalière tel-que l'eau d'irrigation et les paramètres climatiques (température et humidité de l'air) et aussi la surveillance de la qualité de l'air qui peut être affecter par l'activité de l'agriculture céréalière. Nous expliquerons aussi les avantages et les limites dans notre projet.

2. Présentation générale de notre RCSF

Nous avons vue dans les chapitres précédents non seulement l'importance de l'irrigation des champs agricoles céréalière pour l'amélioration du rendement de cette dernière mais aussi le gaspillage de cette ressource hydrique qui devient de plus en plus rare et précieuse, et aussi le contrôle des paramètres météorologique qui impacte la plante de céréale, et d'autre part l'activité de l'agriculture céréalière (utilisation des produits chimiques et principalement l'azote) qui engendre la pollution de l'air avec des gaz tel que (NO₃, NH₃). C'est dans ce contexte que nous avons pensé à la réalisation de notre RCSF.

L'objectif principal de notre RCSF est de contrôler la présence de l'eau dans le sol, mesurer la température et l'air ambiant et contrôler la qualité de l'air.

Notre RCSF est structuré en trois parties principales, Un nœud capteur « Nœud source », un nœud puits « sink » et l'utilisateur final « application Android » :

a. Partie Nœud capteur ou source

La partie Nœud capteur ou nœud source est la partie responsable de l'acquisition des données voulues : la qualité de l'air, température et humidité de l'air et l'humidité du sol, puis transmettre ces données à la partie nœud puits, et elle est composée de quatre unités voire la figure 3.1:

- Unité de traitement : réalisé à base d'un Arduino Uno programmé à l'aide du software « Arduino 1.8.19 ».
- Unité de captage : cette unité est réalisée avec trois capteurs « humidité du sol, humidité et température de l'air et qualité de l'air »
- Unité de transmission : cette unité est réalisée avec un module de transmission Radiofréquence compatible avec la carte Arduino.
- Unité de l'énergie électrique : l'alimentation électrique est assurée par une pile 9V.

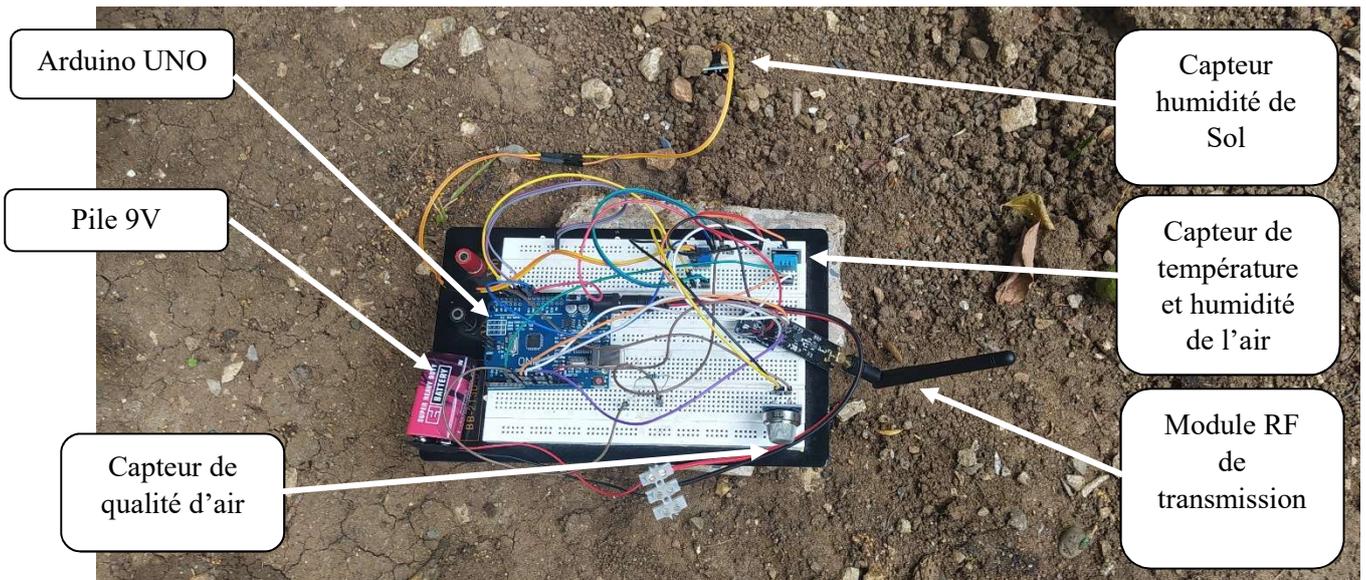


Fig 3.1 Photo du Nœud de capteurs

b. Schéma électrique et caractéristiques du Nœud de capteur

Le schéma électrique de notre partie nœud de capteurs est montré dans la figure 3.2 suivantes :

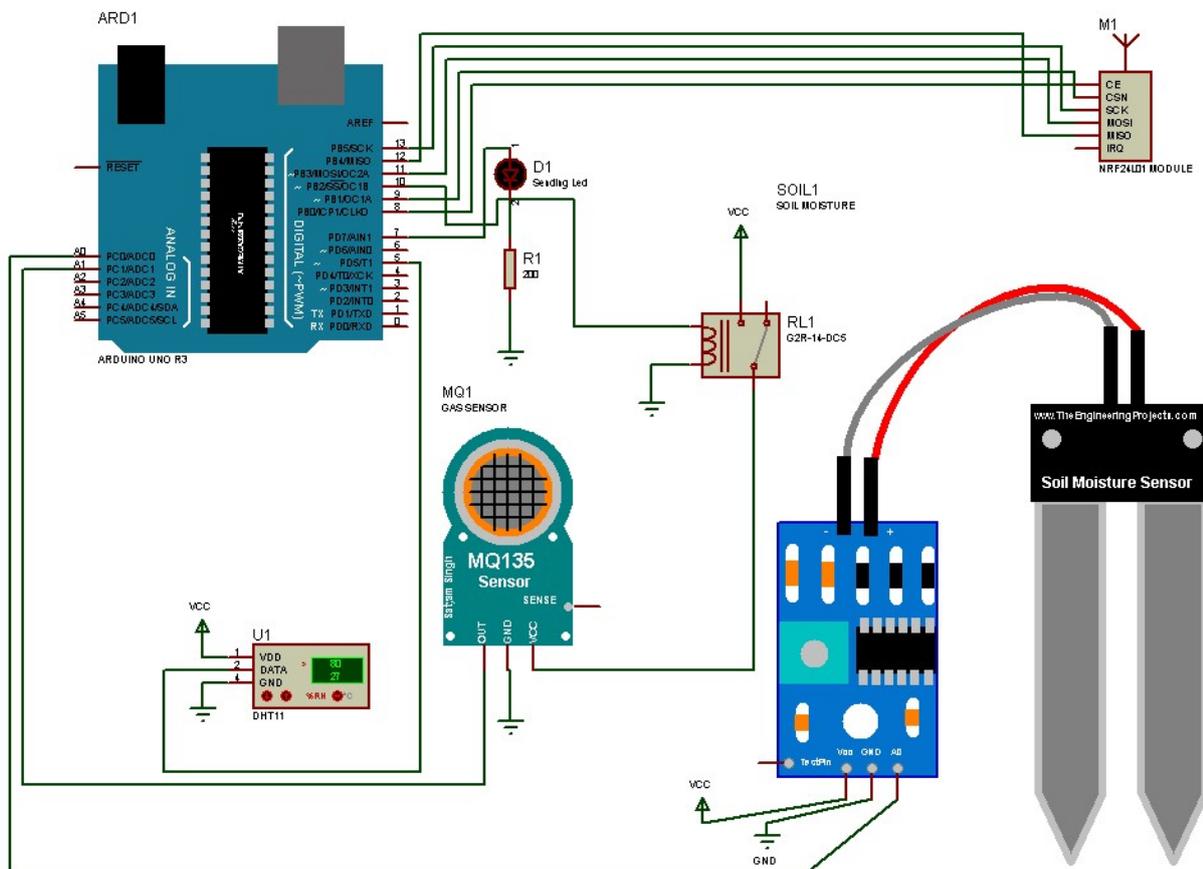


Fig 3.2 Schéma électrique du Nœud de capteur

Les caractéristiques techniques des différents composants du Nœud capteur sont montrées dans le tableau suivants :

Composant	Caractéristiques
<p>Arduino uno r3 atmega328p ch340</p>	<p>E/S terminaux d'entrée/sortie numériques 0 ~ 13.</p> <p>E/S bornes d'entrée/sortie analogiques 0 ~ 5.</p> <p>Soutenir la fonction de téléchargement d'isp.</p> <p>Tension d'entrée : connecté à l'ordinateur USB sans alimentation externe, alimentation externe 5 V ~ 9 V DC entrée de tension.</p> <p>Tension de sortie : sortie de tension cc 5 V et sortie de tension cc 3.3 V.</p> <p>Utilisation du contrôleur de microprocesseur Atmel Atmega328</p>
<p>Capteur d'humidité du sol YL 69</p>	<p>VCC: 3.3V-5V</p> <p>GND: GND</p> <p>DO: interface de sortie numérique (0 et 1)</p> <p>AO: interface de sortie analogique</p>
<p>Capteur de température et d'humidité dht11</p>	<p>Possibilité de déporter le capteur jusqu'à 20 m</p> <p>Alimentation +5V (3.5 – 5.5V)</p> <p>Température : de 0 à 50°C, précision : +/- 2°C</p> <p>Humidité : de 20 à 96% RH, précision +/- 5% RH</p>
<p>Capteur de la qualité d'air MQ135</p>	<p>Tension nominale: 5V</p> <p>2 Sorties : Analogique et numérique tout ou rien selon un seuil réglable</p> <p>Le module possède un indicateur LED de l'état de la sortie numérique</p> <p>Détecte NH3, NOx, alcool, benzène, fumée et CO2</p> <p>Haute sensibilité: 10 – 300ppm NH3, 10 – 1000ppm Benzène, 10 – 300 Alcool</p> <p>Plus la concentration est importante plus la sortie analogique est élevée</p>
<p>Module de transmission nrf24101 + pa + lna</p>	<p>Il utilise une bande ISM ouverte globale 2.4G, sans licence.</p>

	<p>La puissance de transmission est supérieure à +20 dbm Prend en charge la réception de données à six canaux. La vitesse de 2 Mbit / s permet une VoIP de haute qualité Faible</p> <p>Tension de fonctionnement: 2,7 à 3,6 V</p> <p>Points multifréquences: 125 points de fréquence répondent aux besoins des communications multipoints et des sauts de fréquence.</p> <p>Faible coût: intégré aux parties de traitement de signal à grande vitesse associées au protocole RF, telles que: renvoyer automatiquement les paquets perdus et générer un signal d'accusé de réception; L'interface SPI facilite la communication avec le port d'E / S MCU.</p> <p>Faciliter le développement pour les clients, sans partie RF de développement.</p> <p>La programmation logicielle est entièrement compatible avec les modules NRF24L01. Taille: 37,4 mm * 16,6 mm</p> <p>Portée théorique jusqu'à un rayon de 1km</p>
<p>Module Relais 5V 1 channel</p>	<p>Charge maximale: AC 250V / 10A, DC 30V / 10A</p> <p>Tension de fonctionnement : 5V DC</p> <p>Isolation photoélectrique</p>
<p>Pile 9V 6F22</p>	<p>Basée sur une chimie de type carbone-zinc</p> <p>Capacité : 400mAh</p> <p>Tension nominale : 9V</p>

Tableau 3.1 caractéristiques techniques des différents composants du Nœud capteur

c. Bloc diagramme fonctionnel du Nœud de capteurs ou source :

Le principe de fonctionnement de notre nœud capteur est illustré par l'organigramme suivant :

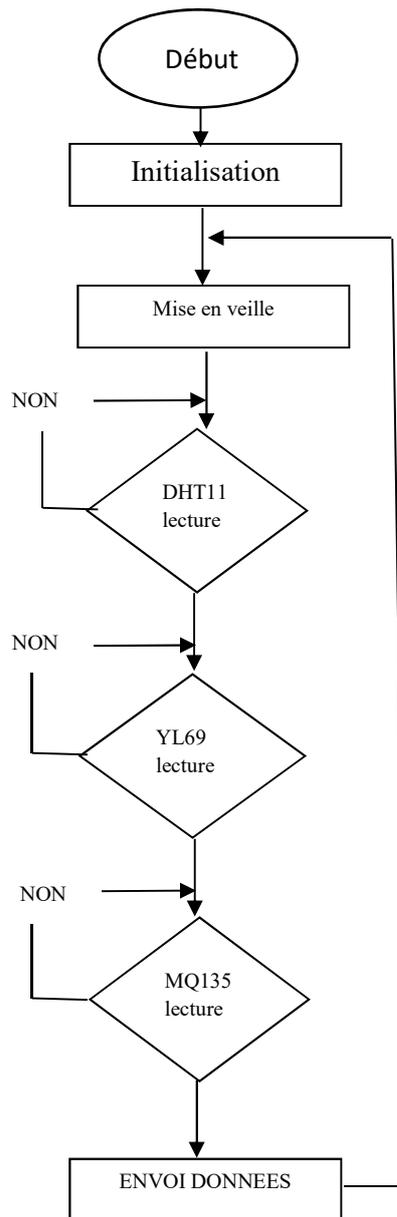


Fig 3.3 Bloc diagramme fonctionnel du Nœud de capteurs

d. Partie Nœud puits « sink »

La partie Nœud puits ou sink est la partie responsable de la réception des données transmises par le nœud capteur et puis faire l'affichage des données reçues et aussi les retransmettre via le support de communication Bluetooth, cette partie est composée de quatre unités voire la figure 3.4:

- Unité de traitement : réalisée à base d'un Arduino Mega programmé à l'aide du software « Arduino 1.8.19 ».
- Unité de transmission primaire: cette unité est réalisée avec un module de transmission Radiofréquence compatible avec la carte Arduino.
- Unité de transmission secondaire : cette unité est réalisée avec un module de transmission Bluetooth compatible avec la carte Arduino

- Unité d'affichage de données reçues : cette unité est réalisée avec un afficheur LCD compatible avec la carte Arduino.

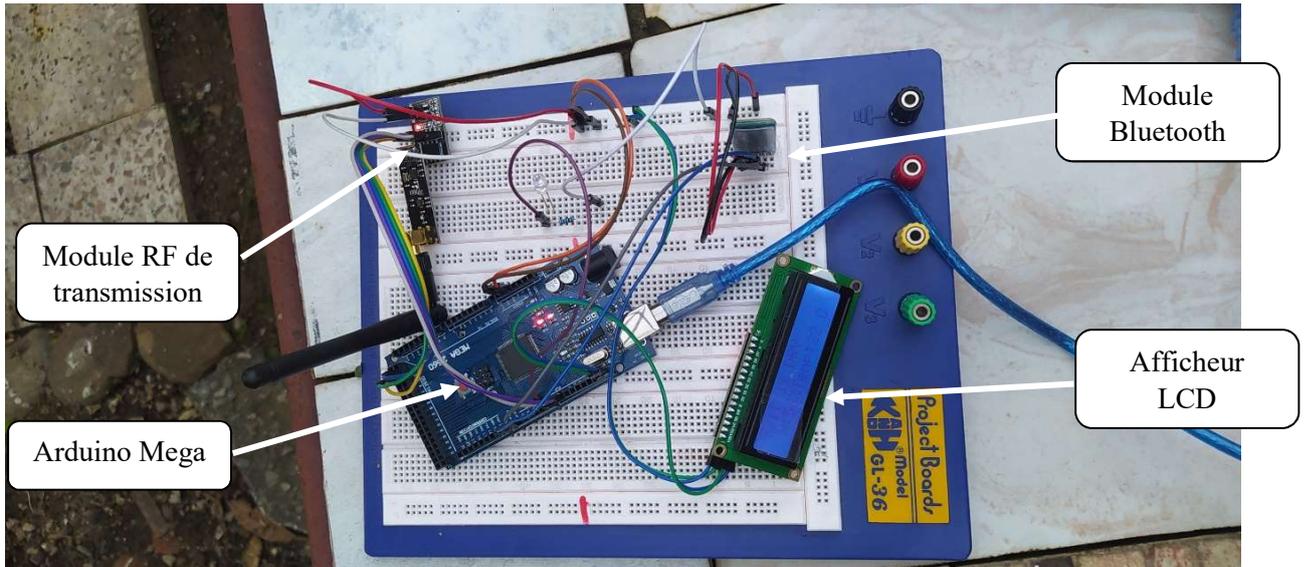


Fig 3.4 Photo du Nœud Puits

e. Schéma électrique et caractéristiques du Nœud Puits

Le schéma électrique de notre partie nœud Puits est montrée dans la figure 3.5 :

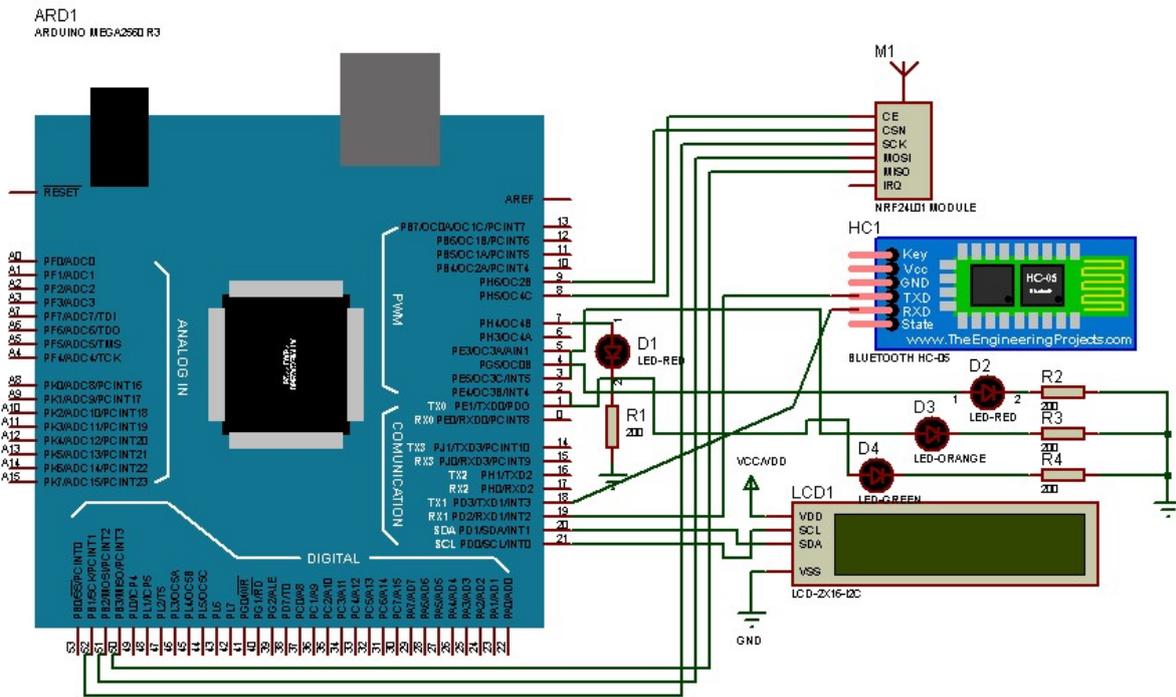


Fig 3.5 Schéma électrique du Nœud Puits

Les caractéristiques techniques des différents composants du Nœud Puits sont montrées dans le tableau suivants :

Composant	Caractéristiques
<p>Arduino Mega 2560 rev3</p>	<ul style="list-style-type: none"> _ Microcontrôleur ATmega1280 _ Tension de fonctionnement :5V _ Tension d'entrée (recommandée) : 7-12V _ Tension d'entrée (limites) 6-20V _ E / S numériques : 54 (dont 15 fournissent une sortie PWM) _ Pointes d'entrée analogiques 16 _ Courant CC par broche d'E / S 40 mA _ Courant CC pour la broche de 3.3V 50 mA _ Mémoire flash 128 Ko dont 4 Ko utilisés par bootloader _ SRAM 8 Ko _ EEPROM 4 Ko _ Vitesse de l'horloge 16 MHz
<p>Afficheur LCD 16 x 2 + Adaptateur I2C</p>	<ul style="list-style-type: none"> _ tension d'alimentation: 5 V
<p>Module de transmission nrf24l01 + pa + lna</p>	<p>Il utilise une bande ISM ouverte globale 2,4G, sans licence.</p> <p>La puissance de transmission est supérieure à +20 dbm Prend en charge la réception de données à six canaux. La vitesse de 2 Mbit / s permet une VoIP de haute qualité Faible</p> <p>Tension de fonctionnement : 2,7 à 3,6 V</p> <p>Points multifréquences : 125 points de fréquence répondent aux besoins des communications multipoints et des sauts de fréquence.</p> <p>Faible coût : intégré aux parties de traitement de signal à grande vitesse associées au protocole RF, telles que: renvoyer automatiquement les paquets perdus et générer un signal d'accusé de réception; L'interface SPI facilite la communication avec le port d'E / S MCU.</p> <p>Faciliter le développement pour les clients, sans partie RF de développement.</p>

	<p>La programmation logicielle est entièrement compatible avec les modules NRF24L01.</p> <p>Taille: 37,4 mm * 16,6 mm</p> <p>Porté théorique jusqu'à un rayon de 1km</p>
<p>HC 05-bluetooth pour Arduino</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Tension de fonctionnement : 4V to 6V (Typique+5V) -Courant de fonctionnement : 30mA -Couverture : <100m -Travail avec la communication série (USART) et compatible TTL -suit le protocole IEEE 802.15.1 -Utilise « Frequency-Hopping Spread spectrum » (FHSS) -opère en mode Master, Slave ou mode Master/Slave -baud rate: 9600,19200,38400,57600,115200,230400,460800.

Tableau 3.2 caractéristiques techniques des différents composants du Nœud Puits

f. Bloc diagramme fonctionnel du Nœud Puits :

Le principe de fonctionnement de notre nœud Puits est illustrés par le bloc diagramme suivant :

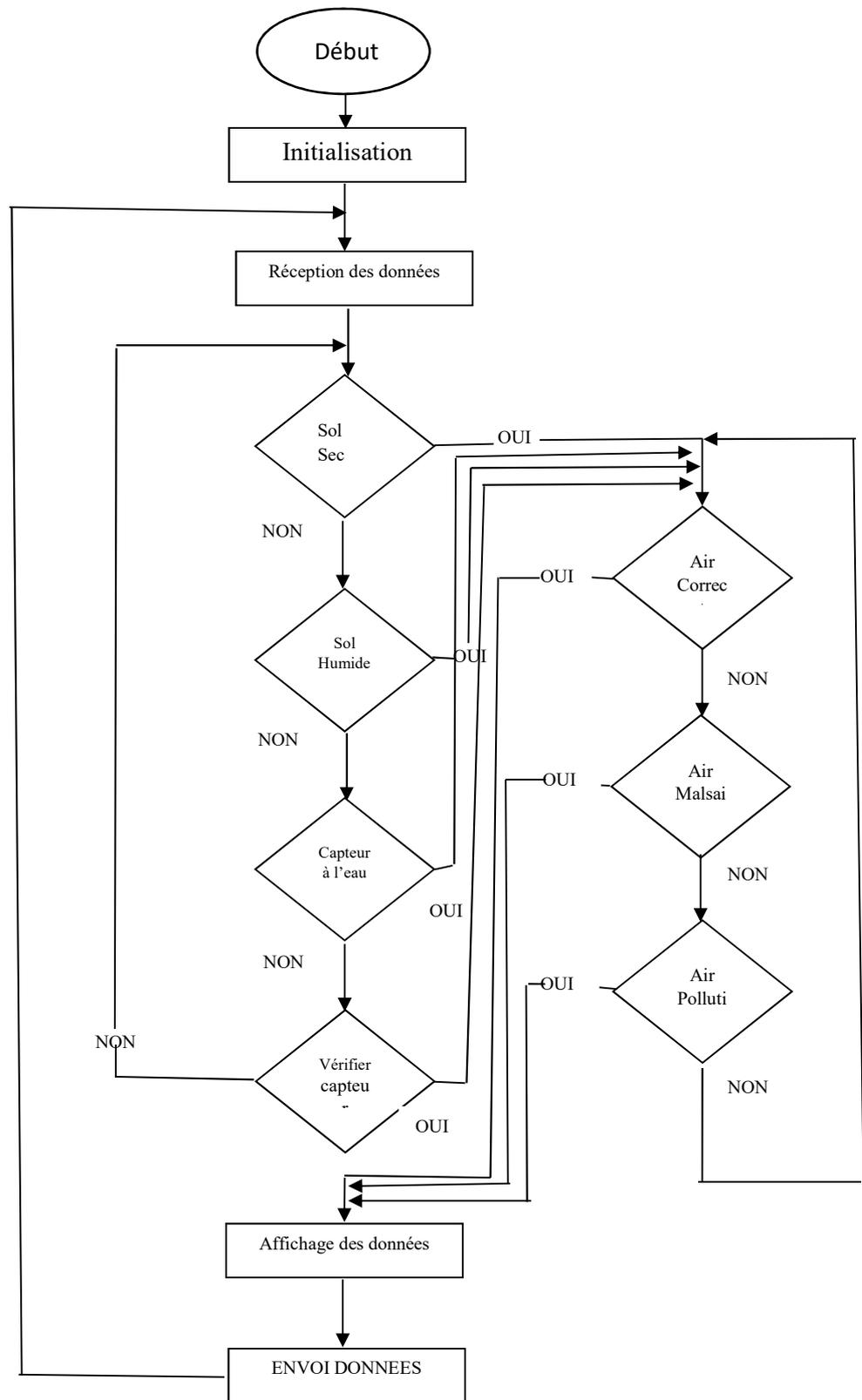


Fig 3.6 Bloc diagramme fonctionnel du Nœud Puits

g. Partie Utilisateur final « application Android »

La partie utilisateur final c'est la partie qui concerne par la réception et l'affichage des données captées. En plus de l'affichage sur l'écran LCD qui se trouve dans le Nœud Puits, les informations réceptionnées par ce dernier seront retransmises vers l'utilisateur final via la liaison Bluetooth, et pour cela on a créé une application Android dédiée à notre RCSF que nous avons nommé « AgriWSN » voir la figure 3.7.



Fig 3.7 Photo de l'Application Android « AgriWSN » créée

L'Application « AgriWSN » est une application d'affichage des données sur androïde mobile, elle a été créée en utilisant le site internet <https://appinventor.mit.edu/>. Voir la figure 3.8

AgriWSN est une application très facile à utiliser qui sert à afficher les données de l'état du sol, les paramètres météorologiques « température et humidité » et aussi la qualité d'air ambiant.

```

when Connect Bluetooth >> BeforePicking
do
  set Connect Bluetooth >> .Elements to BluetoothClient >> .AddressesAndNames

when Connect Bluetooth >> AfterPicking
do
  set Connect Bluetooth >> .Selected to call BluetoothClient >> .Connect
  address Connect Bluetooth >> .Selected
  set Connect Bluetooth >> .Text to "CONNECTED"

initialize global data to create empty list

when Clock >> .Timer
do
  if BluetoothClient >> .IsConnected and call BluetoothClient >> .BytesAvailableToReceive
  then
    set global data to split list call BluetoothClient >> .ReceiveText
    numberOfBytes call BluetoothClient >> .BytesAvailableToReceive
    at
    0 ?
    then
      length of list list get global data 0
      set Label0 >> .Text to select list item list get global data
      index 0
    1 ?
    then
      length of list list get global data 1
      set Label1 >> .Text to select list item list get global data
      index 1
    2 ?
    then
      length of list list get global data 2
      set Label2 >> .Text to select list item list get global data
      index 2
    3 ?
    then
      length of list list get global data 3
      set Label3 >> .Text to select list item list get global data
      index 3
  
```

Fig 3.8 Programme bloc MIT APP INVENTOR de l'application « AgriWSN »

3. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la réalisation pratique d'un réseau de capteurs sans fils à base des cartes Arduino, pour objective de suivre les paramètres nécessaires à l'agriculture céréalière. Ce système est considéré comme un moyen très efficace d'aide à la décision. Ce travail pratique illustre bien le principe de l'agriculture de précisions. Le travail peut avoir plusieurs axes de développement et d'utilisation.

CHAPITRE IV

Consommation Energétique de Notre Nœud Capteur

Chapitre IV : Consommation Energétique de Notre Nœud capteur

1. Introduction

Les Nœuds capteurs ont besoin pour leurs fonctionnements d'une énergie électrique et dans la plupart des cas, il s'agit d'utiliser une alimentation par « batterie ». Ce type d'alimentation par batterie doit garantir l'autonomie énergétique du nœud capteur sur une longue durée surtout dans les applications à ciel ouvert et dans des endroits isolés comme le domaine de l'agriculture. Toutefois, les nœuds capteurs sont alimentés par des batteries à énergie limitée difficilement remplaçable pour plusieurs causes :

- Déploiement aléatoire des capteurs,
- Placés dans un environnement isolé et hostile
- Nombre important des Nœuds capteurs...

De ce fait, une partie des données collectées sera perdue ce qui en résulte la mise hors service partielle du réseau. Maximiser la durée de vie du réseau constitue l'un des défis majeurs. Prolonger la durée de vie d'un réseau de capteurs revient donc à réduire les différentes consommations énergétiques des nœuds capteurs.

2. Formes de dissipation d'énergie

L'énergie consommée par un nœud capteur est due essentiellement aux opérations de capture, de traitement et de la transmission de données. Mais, pour mieux appréhender l'autonomie énergétique d'un nœud capteur sans fil en fonctionnement, il est nécessaire de bien définir ses différents modes de fonctionnement. Ainsi chaque mode de fonctionnement de ce nœud capteur aura sa propre consommation d'énergie. Une séquence de fonctionnement possible d'un nœud capteur présente généralement les modes de fonctionnement suivants, selon ses composants internes notamment l'unité de traitement, le module capteur et le module d'émission/réception.

- Le mode de fonctionnement " mesure ",
- Le mode de fonctionnement "traitement",
- Le mode de fonctionnement " émission ",
- Le mode de fonctionnement " réception ".

Chaque mode de fonctionnement a sa propre consommation d'énergie. Généralement, les modes de fonctionnement émission et réception sont les plus énergivores suivis du mode mesure, puis du mode traitement et enfin du mode veille où la consommation électrique est la plus faible. N'oublions pas qu'un courant consommé plus important ne signifie pas nécessairement une énergie consommée plus importante. En effet, cela va également dépendre de la durée temporelle de chaque mode. L'énergie consommée peut être estimée de manière générale en fonction des courants consommés lors des différents modes de fonctionnement par [28] [29] :

$$E \approx V \times (I_{sleep} T_{sleep} + I_{Tx} T_{Tx} + I_{Rx} T_{Rx} + I_{mes} T_{mes} + I_{proc} T_{proc}) \quad (1)$$

Où I_{sleep} est le courant consommé par le nœud capteur en mode veille pendant la période T_{sleep} , I_{Rx} est le courant consommé par le nœud capteur en mode de fonctionnement " réception ", pour la période T_{Rx} , I_{Tx} est le courant consommé par le nœud capteur pendant le mode de fonctionnement " émission " pour la période de temps T_{Tx} , I_{mes} est le courant consommé par le nœud capteur en mode de fonctionnement " mesure " pour la période de temps T_{mes} et I_{proc} est le courant consommé par le nœud capteur en mode de fonctionnement " traitement " pour le temps période T_{proc} et V est la tension invariante dans le temps basée sur l'alimentation. Ainsi, pour des mesures réelles de la consommation d'énergie d'un nœud capteur pendant n'importe quel mode de fonctionnement, comme le mode de traitement, il est nécessaire de mesurer le courant consommé pendant ce mode de fonctionnement ainsi que sa durée temporelle.

a. Energie de capture

L'énergie de capture est dissipée pour accomplir les tâches suivantes : Activation de la sonde, échantillonnage et conversion analogique/numérique.

b. Energie de traitement

L'énergie de traitement se divise en deux parties : l'énergie de commutation et l'énergie de fuite.

L'énergie de commutation est déterminée par la tension d'alimentation et la capacité totale commutée au niveau logiciel (en exécutant un logiciel).

Par contre l'énergie de fuite correspond à l'énergie consommée lorsque l'unité de calcul n'effectue aucun traitement.

c. Energie de communication

L'énergie de communication est l'énergie dissipée lors de transfert des données « réception et émission

3. Etude Energétique de notre Nœud capteur

Pour pouvoir étudier la consommation énergétique de notre Nœud de capteurs, nous avons monté une petite expérience dont le schéma de principe est représenté sur la FIG 4.1. La seconde figure (FIG 4.2) représente une photographie de l'expérimentation menée.

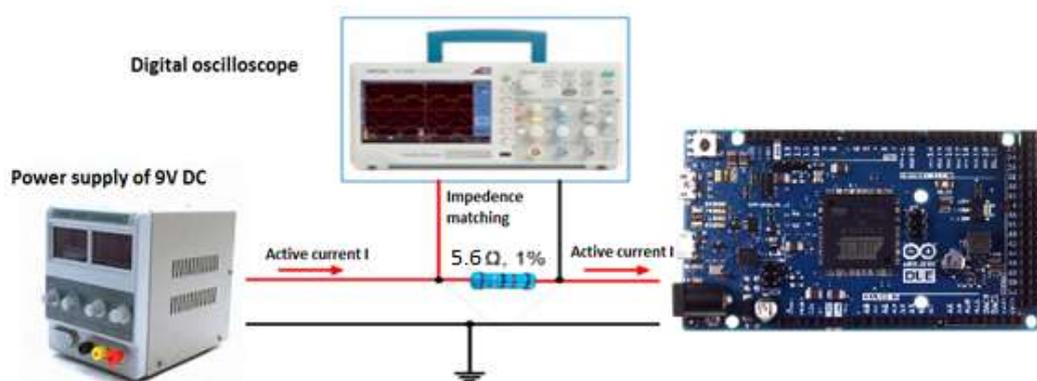


Fig 4.1 : Schéma de principe du montage pour la mesure de la consommation énergétique

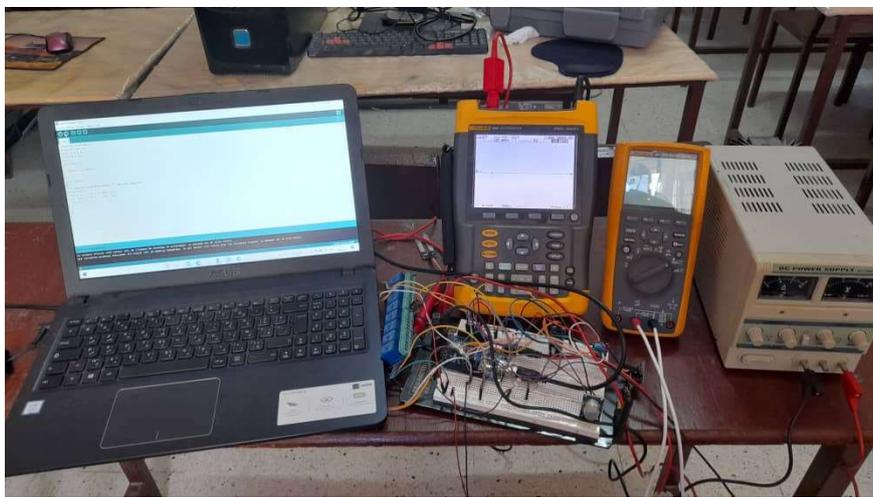


Fig 4.2 Photographie du montage pour la mesure de la consommation énergétique

Le Montage électrique pour la mesure de la consommation énergétique est composé de :

- Une Alimentation électrique DC « DF1730SC3A » : pour fournir une alimentation de 9V au nœud de capteurs.
- Un oscilloscope « FLUKE 192B » pour la visualisation des graphes de courant électrique
- Un multimètre « FLUKE 287 » pour la mesure de courant électrique
- Une résistance de précision de 5.6 Ohm.

La mesure de la consommation électrique du nœud de capteurs est divisée en plusieurs parties pour pouvoir analyser la consommation à chaque étape « du captage à la transmission ».

a. Consommation électrique du module Arduino en mode mise en veille

La consommation énergétique de la carte Arduino UNO en mode mise en veille, est mesurée à l'aide du montage de la figure Fig4.2., en chargeant uniquement le programme de mise en veille périodique « période de 1 seconde », et les résultats sont les suivants :

- Consommation électrique moyenne avec mise en vielle est de : 11.129mA.
- Consommation électrique moyenne sans mise en vielle est de : 22.478mA.

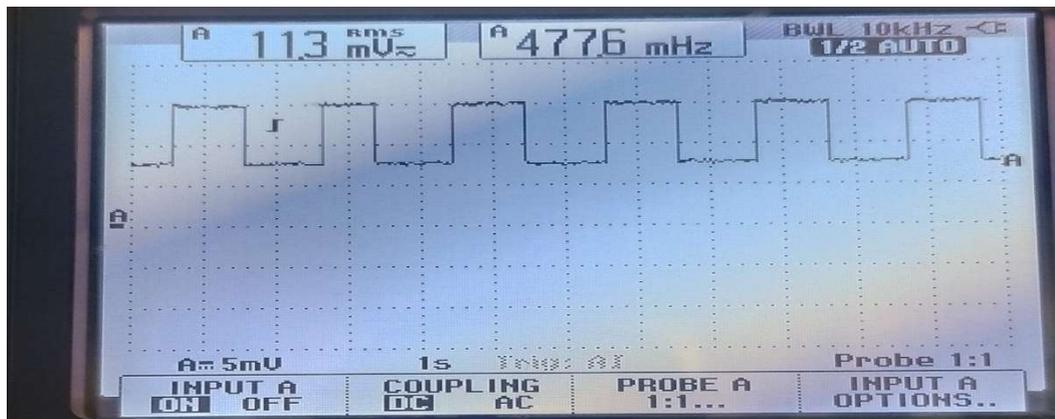


Fig 4.3 Photo du graphe de la consommation électrique en mode mise en vielle

La visualisation avec l'oscilloscope nous montre un signal périodique chaque 2 secondes fixé par le programme dans l'arduino ce qui signifie une consommation ordinaire moyenne de 22.478mA et elle va baisser jusqu'à une moyenne de 11.129mA lors d'activation du mode mise en veille.

b. Consommation électrique du Arduino+DHT11

La consommation électrique du processus de captage de la température et humidité de l'air, est mesurée à l'aide du montage de la figure Fig4.2. En chargeant uniquement le programme du capteur DHT11 avec des périodes de mise en veille, Et les résultats sont les suivants :

- Consommation électrique moyenne avec mise en vielle est de : 11.468mA.
- Consommation moyenne du DHT11 : 11.508mA

Remarque : Nous avons chargé un programme qui prend 50 mesures en même temps (ou presque) pour pouvoir les lire et les visualiser convenablement avec nos instruments, pas assez performants.



Fig 4.4 Photo du graphe de la consommation électrique DHT11

La figure 4.4 nous montre des pics périodiques très restreints dus à la rapidité de l'opération d'échantillonnage malgré la répétition de lecture dans le programme « 50fois », mais d'après les mesures le DHT11 ne consomme que peu d'énergie « quelque dizaine de micro-ampère ».

c. Consommation électrique du Arduino + Humidité de sol

On répète l'opération précédente, mais cette fois-ci on utilise uniquement le capteur d'humidité de sol, avec plusieurs lecture « 100fois », on obtient les résultats suivants :

- Consommation électrique moyenne avec mise en veille est de : 15.144mA.
- Consommation moyenne du capteur : 17.129mA.



Fig 4.5 Photo du graphe de la consommation électrique du capteur humidité du Sol

On remarque même chose que pour le DHT11 mais la différence remarquable c'est que la consommation électrique à augmenter un petit peu dans les deux mode « veille et échantillonnage ».

d. Consommation électrique du Arduino + capteur qualité d'air

Même opération pour le capteur qualité d'air mais cette fois si, on ne répète pas l'opération d'échantillonnage à cause de la caractéristique du capteur qui est alimentés en permanence en courant électrique de ce fait l'importance d'utiliser un relais pour contrôler la consommation énergétique de ce dernier, les résultats obtenus sont les suivants :

- Consommation électrique moyenne avec mise en veille est de : 11.497mA
- Consommation moyenne du capteur : 141.76mA.



Fig 4.6 Photo du graphe de la consommation électrique du capteur qualité d'air

Le graphe nous montre un signal carré périodique expliqués par le fait que le capteur consomme en permanence l'énergie électrique « la partie haut » et passe par des période mise en veille avec coupure de courant pour le capteur à travers un relais qui manage les période d'activation de ce dernier.

Le capteur d'air est gourmand en énergie électrique.

e. Consommation électrique du Arduino + module de transmission

Après avoir finaliser avec la partie captage, en passe à l'étape transmission des données ; cette étape est réalisée en ajoutons le module de transmission à la carte arduino et de la même manière mesurer la consommation électrique; les résultats obtenus sont les suivants :

- Consommation électrique moyenne avec mise en veille : 13.02mA
- Consommation moyenne avec module de transmission ON : 96mA.

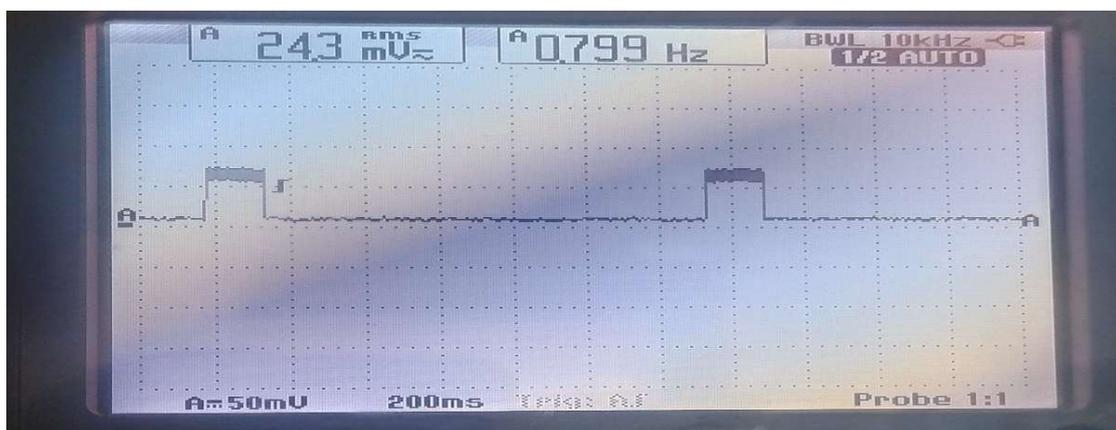


Fig 4.7 Photo du graphe de la consommation électrique Avec module de transmission

Cette étape de mesure nous montre que, l'envoi des données consomme d'avantage d'énergie.

Les opérations mathématiques consomment peu d'énergie, un test de série de 10000 opérations mathématique montre que la consommation moyenne est d'environ 800uA.

f. Consommation électrique totale du Nœud capteur

Dans cette dernière étape on va mesurer la consommation totale d'énergie électrique du Nœud de capteurs, et les résultats sont les suivants :

- Consommation électrique moyenne avec MQ135 OFF (relais actif) : 30.840mA
- Consommation électrique moyenne avec MQ135 ON (relais actif) : 200mA.



Fig 4.8 Photo du graphe consommation électrique totale du Nœud de capteurs

Le Nœud de capteurs que nous avons réalisé consomme en moyenne 30mA avec des périodes de pics de consommation en activant le capteur qualité d'air.

Pour mieux illustrer les consommations énergétiques dans les différentes phases de fonctionnement et pour les différents équipements associés à Arduino nous présentons ci-dessous un tableau récapitulatif :

Equipements	Phases de fonctionnements	Consommation électrique moyenne
Arduino en mode mise en veille	Avec Mise en veille	11.129mA
	Sans Mise en veille	22.478mA.
Arduino+DHT11	Avec Mise en veille	11.468mA.
	DHT11 ON	11.508mA.
Arduino+ Humidité de sol	Avec Mise en veille	15.144mA
	Capteur Humidité sol ON	17.129mA
Arduino + capteur qualité d'air	Avec Mise en veille	11.497mA
	Capteur qualité d'air ON	141.76mA
Arduino + module de transmission	Avec Mise en veille	13.02mA
	Module transmission ON	96mA
Nœud capteur complet	MQ135 OFF	30.840mA
	MQ135 ON	200mA

Tableau 4.1 Résumé pour les différentes consommations énergétiques

4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons abordé la problématique de l'alimentation électrique des nœuds capteurs, qui handicape lourdement les systèmes à base de nœuds capteurs sans fil ou RCSF. Nous avons donc monté une expérience relativement simple qui nous a permis de mesurer les courants consommés dans chacune des phases de fonctionnement du nœud capteur. A partir de ces courants mesurés et en connaissant les durées pour chaque courant consommé, nous pouvons déduire aisément les énergies de chaque mode de fonctionnement.

Conclusion Générale

Le secteur de l'agriculture céréalière étant considéré stratégique, surtout qu'il existe une certaine instabilité quant à la disponibilité de ce produit à l'échelle national et international. En effet dans le cadre de notre projet de fin d'études, nous avons réalisé un réseau de capteurs sans fils pour contrôler les paramètres importants de cette agriculture.

Cette technologie permettra de prendre des décisions rapides, efficaces et rationnelles, non seulement pour améliorer le rendement et préserver les ressources en eau d'irrigation qui deviennent de plus en plus rares, mais aussi cela va permettre de nous donner des informations importantes pour le contrôle des rejets nocifs pour la santé humaine comme la pollution atmosphérique.

Notre système possède une grande couverture allons jusqu'à un rayon de 1km et se caractérise par la flexibilité et la simplicité de déploiement.

Notre Projet suit aussi les risques de la pollution de l'air causés par les activités agricoles telles que les rejets azotés (comme le NH₃ et NO_x) qui présentent des risques pour la santé humaine.

Le travail que nous avons réalisé illustre bien le principe de l'agriculture de précisions.

Malgré toutes les avantages du travail réalisé, il reste ouvert à toute amélioration futur, et pour cela il se trouve plusieurs axes de développements, et d'optimisation.

Comme perspectives, nous pouvons suggérer d'implémenter d'autres modules de transmission des données dans la partie Nœud Puits comme les module GSM, et utiliser des module LORA de communication entre les nœuds pour augmenter le porté, et pour la partie Nœud de capteurs, on peut additionner d'autre type de capteur comme le capteur « MQ131 » qui nous donne des informations concernant le gaz d'ozone, ce paramètre important très influant sur le rendement de la production céréalière.

D'autres perspectives à ce travail concernent essentiellement l'étude de techniques et aussi de technologies permettant l'optimisation et la maximalisation de la durée de vie des nœuds capteurs.

Bibliographie

Références bibliographiques

- [1] <https://madr.gov.dz/>
- [2] Qu'est-ce-qu'une céréale ? | Passion Céréales (passioncereales.fr)
- [3] Définition | Blé | Futura Planète (futura-sciences.com)
- [4] https://html5.ens-lyon.fr/Acces/FormaVie/20130404/pdf/20130404_JF_Madre_H_Levesque1.pdf
- [5] Infographie : le cycle du blé - Agri-Éthique (agriethique.fr)
- [6] <https://www.itgc.dz/wp-content/uploads/2019/04/%D8%A7%D9%84%D8%B1%D9%8A-%D8%A7%D9%84%D8%AA%D9%83%D9%85%D9%8A%D9%84%D9%8A-%D9%84%D9%84%D9%82%D9%85%D8%AD0001.pdf>
- [7] F:\master these\2017\6-0005-17 (ensh.dz)
- [8] Météo Algérie (meteo.dz)
- [9] <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00650839/document>
- [10] Définition L'Agriculture de précision • Les Horizons
- [11] Qu'est-ce que l'Internet of Things (IoT) ? | Oracle France
- [12] L'agriculture de précision (archives-ouvertes.fr)
- [13] Robert PC (1997), Precision farming aux États-Unis, Perspectives agricoles, no 222, mars 1997, p. 44-47
- [14] D. Boisgontier, (1997), L'agriculture de précision en Europe, Une maîtrise plus ou moins grande selon les pays, Perspectives agricoles, no 225, juin 1997, p. 19-24
- [15] J Clark, Froment, M-A J. Stafford, M Lark, An investigation into the relationship between yield maps, soil variation and crop development in the UK. Precision agriculture, Proceedings of the 3rd International Conference, juin 23-26, 1996, Minneapolis, Minnesota, 433-442, ASA, CSSA, SSSA
- [16] Philippe Zwaenepoel & Jean-Michel Le Bars (1977), L'agriculture de précision [archive] ; Ingénieries EAT no 12, décembre 1997, p. 67 à 79
- [17] Typical existing smart farming model [23] | Download Scientific Diagram (researchgate.net)
- [18] Réseau de capteurs sans fil — Wikipédia (wikipedia.org)
- [19] S.N Pakzad, G.L Fenves, S Kim & D.E Culler (2008), “Design and implementation of scalable wireless sensor network for structural monitoring”, Journal of Infrastructure Systems, vol. 14, pp. 89–101
- [20] K. Sohrabi, J. Gao, V. Ailawadhi, and G. Pottie, “Protocols for selforganization of a wireless sensor network”, IEEE Personal Communications, vol. 7, pp. 16–27, oct. 2000.
- [21] N. Patwari, J. Ash, S. Kyperountas, I. Hero, A.O., R. Moses, and N. Correal, “Locating the nodes : cooperative localization in wireless sensor networks”, IEEE Signal Processing Magazine, vol. 22, pp. 54–9, jul. 2005.
- [22] R. Kacimi, Techniques de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, septembre 2009

- [23] M. Marzencki, Conception de microgénérateurs intégrés pour systèmes sur puce autonomes. PhD thesis, Université Joseph Fourier, March 2007.
- [24] Research and Markets: Wireless Sensor Networks 2012-2022 [archive], 11 mai 2012 AM Eastern Daylight Time
- [25] IdTechEx (2014)
- [26] V. Capella, A. Bonastre, R. Ors & M. Peris (2014) “A step forward in the in-line river monitoring of nitrate by means of a wireless sensor network”, *Sensors and Actuators, B: Chemical*, vol. 195, pp. 396–403
- [27] J.M. Rabaey, M.J. Ammer, J.L. da Silva Jr., D. Patel, S. Roundy, PicoRadio supports ad hoc ultra-low power wireless networking, *IEEE Computer Magazine* (2000) 42–48.
- [28] : T. Bouguera, J. F. Diouris, J. J. Chaillout, R. Jaouadi and G. Andrieux, Energy consumption model for sensor nodes based loRa and LoRaWAN, *Sensors* 18 (2018) 2104.
- [29] S. Khriji, A. Y. Kallel, S. Reedy, D. El Houssaini, I. Kammoun and O. Kanoun, Dynamic autonomous energy consumption measurement for a wireless sensor node, 2019 IEEE Int., Symp. Measurements & Networking (M&N), Catania, Italy, Italy, 2019, pp. 8–10.