

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



Département d'Electronique

Mémoire de projet de fin d'études

pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en électronique

Étude et Implémentation d'un Système dédié à l'Agriculture de Précision

Mohamed Nabil BOUHDJAR

Sous la direction de **M. Rabah SADOUN** Dr.

Présenté et soutenu publiquement le (14/10/2018)

Composition du Jury :

Président	M. Adel BELOUHRANI,	Prof.	ENP
Promoteur	M. Rabah SADOUN,	Dr.	ENP
Examineur	M. Mourad ADNANE,	Dr.	ENP

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



Département d'Electronique

Mémoire de projet de fin d'études

pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en électronique

Étude et Implémentation d'un Système dédié à l'Agriculture de Précision

Mohamed Nabil BOUHDJAR

Sous la direction de **M. Rabah SADOUN** **Dr.**

Présenté et soutenue publiquement le (14/10/2018)

Composition du Jury :

Président	M. Adel BELOUHRANI,	Prof.	ENP
Promoteur	M. Rabah SADOUN,	Dr.	ENP
Examineur	M. Mourad ADNANE,	Dr.	ENP

DÉDICACE

Je dédis ce modeste travail

À mes parents qui ont toujours été là pour moi

À ma famille et à toute personne qui m'a encouragé

Tout au long de mon parcours

REMERCIEMENTS

Je voudrais remercier, mon encadreur M. Rabah SADOUN, pour avoir accepté de m'encadrer, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils.

Je remercie également les membres du jury, M. Adel BELOUHRANI et M. Mourad ADNANE, pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail en acceptant de l'examiner et de l'enrichir par leurs propositions.

Je voudrais aussi remercier ma famille et mes amis, qui m'ont encouragé lors de la préparation de ce mémoire.

ملخص

تواجه الإنسانية تحديات كبيرة، أحد هذه التحديات هو توفير الغذاء لسكان العالم الحاليين و المستقبلين. من المتوقع أن تجلب الزراعة حلاً، ولتحقيق ذلك، يجب تطويرها باستخدام الأدوات التكنولوجية الأكثر تقدماً مع ضمان تنمية مستدامة، وهذا هو سياق مشروعنا.

إن التطور التكنولوجي الحالي، من خلال إنترنت الأشياء وامتدادها للبيانات الضخمة والذكاء الاصطناعي، يقدم حلاً للمشاكل الموجودة في الزراعة التقليدية.

يركز مشروعنا على دراسة وتنفيذ نظام على أساس شبكة استشعار و تحكم لاسلكية مخصص للزراعة الدقيقة. الكلمات الدالة: تكنولوجيا الزراعة، الزراعة الدقيقة، شبكة الاستشعار اللاسلكية، شبكة الاستشعار و التحكم اللاسلكية، إنترنت الأشياء.

Abstract

Providing food for the current and future world population is one of the major challenges that is facing humanity today. Agriculture is expected to bring a solution, and to do so, it must develop using the most advanced technological tools while ensuring sustainable development.

The current technological development, through IoT and their extension by big data and artificial intelligence, undeniably offers a solution to the constraints posed by classical agriculture. This is where our work comes in.

Our project focuses on the study and implementation of a precision agriculture system based on wireless sensor and actuator network.

Key words: agtech, precision agriculture, WSN, WSAN, IoT

Résumé

L'humanité fait face à des défis majeurs dont celui de pourvoir une alimentation pour la population mondiale actuelle et future. L'agriculture doit répondre à ces contraintes. Pour se faire, elle doit se développer en utilisant les moyens technologiques les plus avancées tout en assurant un développement durable.

Le développement technologique actuel, à travers les objets connectés (IoT) et leur prolongement constitué par le couple big data et intelligence artificielle, offre indéniablement une solution aux contraintes posées par l'agriculture classique. C'est dans ce contexte que s'inscrit notre travail.

Notre projet porte sur l'étude et l'implémentation d'un système dédié à l'agriculture de précision à base de réseau de capteurs et d'actionneurs sans fil.

Mots clés: agtech, agriculture de précision, WSN, WSAN, IoT

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DE FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

ABRÉVIATIONS

INTRODUCTION GÉNÉRALE

	11
CHAPITRE 1 L'agriculture de précision	13
1.1 Introduction	13
1.1 Définition de l'agriculture de précision	13
1.2 Technologies mises en oeuvre	14
1.2.1 Télédétection	14
1.2.1.1 Définition	14
1.2.1.2 Plateformes utilisées	14
1.2.1.3 Indices de végétation (<i>Vegetation Indices _VI</i>)	16
1.2.1.4 Processus de validation d'un indice de végétation	17
1.2.1.5 Les applications les plus utilisées de la télédétection en agriculture	17
1.2.1.6 Indice de végétation, effet atmosphérique et réflexion du sol	20
1.2.2 Robots agricoles	20
1.2.2.1 Robots de labourage	21
1.2.2.2 Robots d'analyse du sol	22
1.2.2.3 Robots pour le semis et la transplantation des plantes	23
1.2.2.4 Robots de surveillance des cultures	25
1.2.2.5 Robots pour la récolte	27
1.2.3 Réseaux de capteurs sans fil (<i>Wireless Sensor Networks_WSN</i>)	27
1.2.3.1 <i>Irrigation</i>	28
1.2.3.2 <i>Fertilisation</i>	28
1.2.3.3 <i>Lutte contre les ravageurs</i>	29
1.3 Notre Modèle générique d'un système dédié à l'agriculture de précision	29
1.4 Conclusion	30
CHAPITRE 2 Conception et réalisation d'un nœud dédié à l'agriculture de précision	33
2.1 Introduction	33
2.2 Réseau de capteurs sans fil	33
2.2.1 Définition	33
2.2.2 Réseau de capteur et actionneur sans fil	33
2.2.3 Architecture générale d'un nœud d'un réseau de capteurs et actionneurs sans fil	34
2.3 Conception d'un nœud d'un système d'irrigation dédié à l'agriculture de précision	35

2.3.1	Microcontrôleur utilisé	35
2.3.2	Module de communication	38
2.3.2.1	Choix du module de communication: RFM9xW	38
2.3.2.2	Circuit d'interfaçage avec le module de communication	39
2.3.3	Module énergie	39
2.3.3.1	Circuit de recharge de la batterie	40
2.3.3.2	Circuit du régulateur de 3.3V	43
2.3.3.3	Circuit d'alimentation de l'actionneur	44
2.3.4	Module capteur	44
2.3.5	Module actionneur	47
2.3.5.1	Actionneur utilisé	47
2.3.5.2	Circuit de control	49
2.4	Réalisation et test du nœud	50
2.5	Conclusion	51
CHAPITRE 3	Plateforme d'agrégation de données	53
3.1	Introduction	53
3.2	Définitions	53
3.3	Architecture de Sentilo	53
3.3.1	Serveur Pub/SUB	54
3.3.2	Application Catalog Web	56
3.3.3	Agents	57
3.4	API Rest de Sentilo	57
3.5	Structure de Sentilo	58
3.6	Interfaçage avec Sentilo	58
3.6.1	Ajouter un provider	58
3.6.2	Ajouter les capteurs nécessaires	60
3.6.3	Envoi de données	61
3.6.4	Réception des commandes pour les actionneurs	62
3.7	Conclusion	63
CHAPITRE 4	Modèle continu des données du sol	65
4.1	Introduction	65
4.2	Modélisation de la surface d'intérêt et interpolation	66
4.2.1	Définitions	66
4.2.1.1.1	Processus Gaussien	66
4.2.1.1.2	Stationnarité	66
4.2.1.1.3	Isotropie	66
4.2.2	Modélisation	66
4.2.3	Application du modèle	68

4.3	Optimisation des emplacements des capteurs	68
4.4	Implémentation	69
4.5	Conclusion	71
	Conclusion Générale	72
	BIBLIOGRAPHIE	73

TABLE DE FIGURES

Figure 1.1. Les cinq opérations majeures en agriculture	21
Figure 1.2. Tracteur autonome à base de Yanmar EG65	22
Figure 1.3. Iseki PZ60 transplantation du riz	24
Figure 1.4. Robot Bonirob	25
Figure 1.5. Modèle d'un système dédié à l'agriculture de précision	30
Figure 2.1. Architecture générale d'un nœud	34
Figure 2.2. Pinout de ATmega32U4	36
Figure 2.3. Partie du circuit relative au microcontrôleur	37
Figure 2.4. Circuit d'interfaçage avec le module RFM95W	39
Figure 2.5. Circuit de recharge de la batterie	40
Figure 2.6. Circuit d'isolation du circuit de recharge de la batterie	41
Figure 2.7. Circuit de mesure de la tension de batterie	42
Figure 2.8. Circuit de protection de court circuit	43
Figure 2.9. Circuit de régulation 3.3V	43
Figure 2.10. Circuit d'alimentation de l'actionneur	44
Figure 2.11. Solénoïde à verrouillage à 2 voies de IrriRich	48
Figure 2.12. Solénoïde à verrouillage à 2 voies de IrriRich utilisé avec une valve d'irrigation	48
Figure 2.13. Circuit de contrôle de l'actionneur	49
Figure 2.14. La carte réalisée	50
Figure 2.15. Image du nœud en fonctionnement	51
Figure 3.1. Architecture de Sentilo	54
Figure 3.2. Couche de transport du serveur PubSub de Sentilo	55
Figure 3.3. Couche de service du serveur PubSub de Sentilo	56
Figure 3.4. Interface pour ajouter un provider	59
Figure 3.5. Interface montrant le provider créé	59
Figure 3.6. Interface de gestion de type de capteurs de d'actionneur	60
Figure 3.7. Interface de gestion de type de component	60
Figure 3.8. Visualisation de données temporelles d'un capteur de température simulé	62
Figure 4.1. Emplacement des capteurs	70
Figure 4.2. Distribution de la température sur la surface d'intérêt	71

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1. comparaison entre la majorité des satellite en orbite	15
Tableau 1.2. Travaux connexes sur l'étude automatisée de détection du sol en temps réel	23
Tableau 1.3. Divers travaux sur des robots agricoles pour les opérations d'ensemencement et de transplantation	24
Tableau 1.4. Autres travaux connexes sur la détection et l'élimination des mauvaises herbes	26
Tableau 2.1. Comparaison entre les modules de la famille RFM9xW	38
Tableau 2.2. Comparaison entre différents capteurs en relation avec le sol	45
Tableau 2.3. Comparaison de différents capteurs relatifs aux plantes/feuille Comparaison de différents capteurs relatifs aux plantes/feuille	46
Tableau 2.4. Comparaison de différents capteurs relatifs à l'environnement	47

ABRÉVIATIONS

WSN: Wireless Sensor Network

WSAN: Wireless Sensor and Actuator Network

REST API: REpresentational State Transfer Application Programming Interface

HTTP : HyperText Transfer Protocol

LiDAR: Light Detection And Ranging

UAV: Unmanned Aerial Vehicle

UAS: Unmanned Aerial System

VI: Vegetation Index

NDVI: Normalized Difference Vegetation Index

GPS: Global Positioning System

DGPS: Differential Global Positioning System

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'agriculture a joué un rôle clé dans le développement de la civilisation humaine[1]. L'agriculture moderne requiert une forte croissance de production pour accommoder la demande croissante en nourriture du fait d'une démographie élevée. la population mondiale est estimée à 9 milliards d'individus en 2050, nécessitant une augmentation de la production de l'ordre de 60% par rapport à la production actuelle [2].

De plus, les changements climatiques récents sont alarmants et affectent négativement la productivité des terres agricoles [3,4], ainsi que la pénurie d'eau [5-7], et les conséquences négatives sur l'environnement de l'application anarchique des fertilisants [8,9], nécessitent des solutions permettant une prise de décision intelligente. Parmi ces solutions on trouve la télédétection, la robotique et l'automatisation, les réseaux de capteurs sans fil, la technologies à taux variables, le GPS qui ont connues de plus en plus d'applications pratiques dans le domaine de l'agriculture.

L'utilisation des réseaux de capteurs et leur déclinaison en objets connectés (IoT) dans l'assistance des pratiques agricoles est dans une direction très positive [10,11]. Les avancées technologiques permettant la réduction de la taille des capteurs et la disponibilité de capteurs à des prix abordables, ont permis des applications très prometteuses, particulièrement dans le contexte du big data et de l'intelligence artificielle. Commenant une nouvelle vague de révolution en agriculture de précision, communément appelée agriculture 4.0.

Dans ce mémoire, on commencera par définir l'agriculture de précision, suivie d'une vue d'ensemble des différentes technologies utilisées dans l'agriculture de précision ainsi que quelques recherches notables, par la suite on procédera à détailler la conception et la réalisation d'un système d'irrigation, qui a pour objectif de faciliter l'irrigation en plus de fournir un moyen permettant d'actionner les contrôleurs de façon programmable en se basant sur des données agrégées du sol ou récupérées d'une tierce source.

On passera par la suite à étudier Sentilo, qui est le lien entre le réseau de capteurs et actionneurs sans fil et les applications exploitant les données. Le but étant de faire un pas vers la réalisation d'un système d'agriculture de précision de bout en bout.

On procédera par la suite à détailler une méthode de modélisation d'un paramètre physique du sol de la surface d'intérêt ou de l'environnement locale, qui permettrait d'extrapoler ces données discrètes sur toute la surface d'intérêt.

CHAPITRE 1

CHAPITRE 1 L'agriculture de précision

1.1 Introduction

L'agriculture est l'ensemble des travaux et des processus pour l'exploitation agricole des terres et la domestication des animaux pour produire de la nourriture [2]. Lorsqu'on parle d'agriculture dans ce document, on entend la première partie de la définition.

L'agriculture des temps modernes a connu quatre révolutions qui ont permis d'augmenter de façon significative la production et la qualité des produits agricoles:

- L'introduction du premier tracteur par l'entreprise Waterloo Gasoline Engine en 1893 a marqué la première révolution, cette évolution technologique a permis une croissance significative sur les méthodes utilisées jusqu'alors basées sur l'utilisation des animaux.
- La deuxième révolution est venue de découvertes en chimie, permettant d'utiliser des produits nutritifs pour la culture, ainsi que de la protéger des dangers naturels avec l'introduction des pesticides.
- Les travaux de Norman Borlaug sur la modification génétique des plantes ont conduit à une importante amélioration du rendement en agriculture dans plusieurs régions du monde, évitant la mort de millions de personnes à cause de la famine. Ces résultats lui valurent le prix Nobel de paix en 1970.
- La quatrième révolution dans l'agriculture moderne concerne l'agriculture de précision, qu'on abordera dans le reste de ce chapitre.

1.1 Définition de l'agriculture de précision

L'agriculture de précision est un concept de gestion de parcelles agricoles, fondé sur le constat de l'existence de variabilité intra-parcellaires.

On estime généralement que l'agriculture de précision, est née aux Etats-Unis dans les années 1980. En 1985, des chercheurs de l'Université de Minnesota, font varier les apports d'amendements calciques sur des parcelles agricoles.

L'évolution de l'agriculture de précision a été possible grâce l'émergence de technologies telle que le GPS, l'imagerie par satellite, les drones à des prix abordables, les réseaux de capteurs et

l'environnement informatique en grille. Ce qui a permis l'acquisition de données précises sur les variabilités existantes sur le sol et leur traitement afin de tirer des recommandations utiles pour l'agriculteur.

Le développement de la technologie à taux variable a permis aussi d'agir sur les informations obtenues à grande échelle.

Le développement de la robotique promet également une amélioration de l'efficacité dans la réalisation des tâches agricoles.

1.2 Technologies mises en œuvre

Durant ces dernières années, on peut constater un intérêt croissant pour l'application des différents outils technologiques dans l'agriculture de précision. Dans cette section, les différents travaux réalisés sont divisés en trois sous-groupes principaux :

- Télédétection.
- robots et machines autonomes.
- Les réseaux de capteurs sans fil.

Une définition est donnée pour chaque sous-groupe ainsi qu'un aperçu des différents travaux réalisés dans le domaine. Cette section ne prétend pas être un aperçu exhaustif des différentes technologies existantes.

1.2.1 Télédétection

1.2.1.1 Définition

La télédétection consiste à obtenir des informations sur l'objet de mesure sans avoir à être en contact directe avec le dit objet. Le porteur d'information, dans ce cas, est l'onde électromagnétique à différentes fréquences.

Deux types de capteurs existent pour ces applications :

- Capteurs passifs c'est-à-dire des capteurs qui captent, convertissent, détectent les radiations incidentes, émises ou réfléchies par l'objet.
- Capteurs actifs, capteurs qui émettent leurs propres radiations et détectent la réflexion de ceux-ci par l'objet d'intérêt.

Souvent, ce sont les capteurs passifs qui sont utilisés.

Il est connu que la réflectance des plantes change selon le type de plante, la quantité d'eau contenue dans les tissus de la plante ainsi que d'autres facteurs intrinsèques.

1.2.1.2 Plateformes utilisées

Différentes plateformes sont utilisées dans la télédétection pour leur application dans l'agriculture de précision. On trouve la télédétection utilisant les satellites. Les avantages de l'utilisation des satellites est la grande couverture spatiale. Ceci permet l'extraction de données

sur une longue période de temps avec des données consistantes et comparables. Il y a aussi des plateformes satellites qui offrent des images multi spectrales gratuitement telles que Landsat 7-8 ou SPOT. Cependant ces derniers sont de faibles résolutions en pixel (30m² par pixel pour Landsat), de longs intervalles entre deux visites sur la même zone (*revisit time*) et une longue période d'orbite (16 jours pour Landsat et 26 jours pour SPOT).

Plus récemment, de nouveaux satellites à haute résolution en pixel ont été lancés tels WorldView-2 et -3 (Digital Globe). WorldView-2 était le premier satellite commercial à haute résolution à fournir des images spectrales dans le spectre visible et le spectre proche infrarouge.

Il faut noter aussi que les images à hautes résolution provenant des plateformes commerciales restent chères pour une application sur le long terme.

Un autre problème lié à l'utilisation de la télédétection satellitaire est le temps de revisite qui reste très grand, surtout en rapport avec les applications qui visent à fournir les nutriments et l'irrigation aux plantes en temps optimal, en plus du fait que les capteurs passifs ne peuvent pas pénétrer les nuages, ce qui réduit leurs efficacité.

Tableau 1.1. comparaison entre la majorité des satellite en orbite

Satellite (année de lancement)	bandes spectrales (résolution spatiale)	Temps de revisite(jours)
Landsat 1 (1972)	G, R, two IR (56 79 m)	18
AVHRR (1978)	R, NIR, two TIR (1090 m)	1
Landsat 5 TM (1984)	B, G, R, two NIR, MIR, TIR (30 m)	16
SPOT 1 (1986)	G, R, NIR (20 m)	2-6
IRS 1A (1988)	B, G, R, NIR (72 m)	22
ERS-1 (1991)	Ku band altimeter, IR (20 m)	35
JERS-1 (1992)	L band radar (18 m)	44
LiDAR (1995)	VIS (RMSE vertical 10 cm)	N/A
RadarSAT (1995)	C-band radar (30 m)	1-6
IKONOS (1999)	Panchromatic, B, G, R, NIR (1-4 m)	3
SRTM (2000)	X-band radar (30 m)	N/A
Terra EOS ASTER (2000)	G, R, NIR and 6 MIR, 5 TIR bands (15-90 m)	16
EO-1 Hyperion (2000)	400-2500 nm, 10 nm bandwidth (30 m)	16

QuickBird (2001)	Panchromatique, B, G, R, NIR (0.61-2.4 m)	1-4
EOS MODIS (2002)	36 bandes dans VIS-IR (250-1000 m)	1-2
RapidEye (2008)	B, G, R, red edge, NIR (6.5 m)	5.5
GeoEye-1 (2008)	Panchromatic, B, G, R, NIR1, NIR2 (1.6 m)	2-8
WorldView-2 (2009)	P, B, G, Y, R, red edge, NIR (0.5 m)	1.1

On trouve aussi Planet Labs qui est une entreprise américaine qui fabrique et exploite des nano-satellites de type CubeSat prenant des images depuis l'orbite. Elle dispose d'un grand nombre de satellites formant une constellation ; ce qui lui permet de couvrir toute la surface de la terre et de fournir des images satellites quotidiennes avec une résolution de 3-5m.

Une solution aux problèmes liés à l'utilisation des satellites pour la télédétection est l'utilisation des avions à pilote, et plus récemment les drones (*Unmanned Aerial Vehicle UAV*) à qui, on a recours plus souvent durant ces dernières années. ceci est dû au coût plus élevé lié à l'utilisation des avions à pilote ainsi qu'aux avancées technologiques liées aux drones qui sont utilisés avec des caméras qui captent des images dans le spectre visible, proche infrarouge, infrarouge thermique et LiDAR, auquel on fait référence comme *Unmanned Aerial System (UAS)*.

L'utilisation des UAS permet d'obtenir des images à haute résolution, permettant un grand nombre d'applications liées à l'agriculture de précision. Leurs désavantages restent le temps de vol court et une capacité limitée à supporter du poids.

On a aussi la détection à distance au sol qui se fait à l'aide de capteurs à main qui sont utiles lorsqu'il s'agit d'une petite surface d'intérêt [12], pour la détection d'un stress biotique et d'un stress abiotique ou pour une calibration d'autres mesures basées sur d'autres plateformes.

1.2.1.3 Indices de végétation (*Vegetation Indices* _VI)

L'indice de végétation est une transformation spectrale de deux bandes ou plus, conçue pour améliorer la contribution des propriétés de la végétation et permettre des comparaisons spatiales et temporelles fiables de l'activité photosynthétique terrestre et des variations structurelles de la canopée [13].

Plusieurs indices de végétation ont été développés afin de caractériser les caractéristiques biophysiques de la plante et ses besoins à partir de sa réflexion spectrale.

Leur utilisation en agriculture de précision est généralement dans les applications telles que la prévision du rendement, l'évaluation des besoins nutritifs des plantes (en détectant la concentration d'azote dans les plantes), la détection des maladies et des infections, l'évaluation des besoins de la plante en eau et la lutte contre les mauvaises herbes.

L'utilité d'un indice de végétation donné est déterminée par sa haute corrélation avec le

paramètre à estimer ainsi qu'une faible sensibilité aux facteurs qui peuvent biaiser cette interprétation de données comme la réflexion du sol et l'atmosphère.

Un exemple de l'un indice de végétation est le NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) [14] qui est le quotient de la différence et de la somme de la réflectance du NIR et de la bande du rouge. Les parties vertes de la plante reflètent intensément dans la bande NIR et absorbent la lumière rouge et bleue avec le chlorophyll.

L'indice NDVI est considéré comme l'indice de végétation le plus utilisé. Le plus souvent, il est utilisé pour déterminer la condition et le stade de développement et la biomasse des plantes cultivées. Il est utilisé également pour la prévision du rendement. D'autres indices ont été développés à la base du NDVI pour réduire l'impact de la réflexion du sol ainsi que celui de l'atmosphère.

1.2.1.4 Processus de validation d'un indice de végétation

Les informations tirées des images recueillies par les capteurs de télédétection sont généralement interprétées par les différences et le changement des caractéristiques spectrales des feuilles vertes des plantes et de la canopée. La méthode de validation la plus commune est à travers une corrélation directe ou indirecte entre les indices de végétation obtenus et la caractéristique de végétation d'intérêt mesurée sur le champ, telle que la couverture végétale, la biomasse et la croissance de la plante.

Des méthodes plus établies sont utilisées pour évaluer les VIs en utilisant des méthodes directes et géoréférencées, en surveillant des plantes sentinelles qu'on compare avec les VIs obtenues des mêmes plantes pour calibration.

Ce dernier processus est connu comme les mesures allométriques. Il nécessite des méthodes destructives pour scanner une surface spécifique de la totalité des feuilles de la plante ou l'arbre dans le cas de l'indice de surface foliaire (*Leaf Area Index LAI*).

1.2.1.5 Les applications les plus utilisées de la télédétection en agriculture

- Prévision du rendement

L'utilisation de la télédétection pour la prévision du rendement est basée principalement sur des relations empiriques-statistiques entre le rendement et les indices de végétation [15][16].

Cette information sur le rendement est d'une grande importance pour les agences gouvernementales, commerçants de matières premières et les producteurs pour la planification de la récolte et du transport et le marketing. Ces informations permettent la réduction du risque économique. Ce qui conduirait à une meilleure efficacité et améliorerait le retour sur investissement.

- Évaluation des besoins nutritifs des plantes

Des recherches ont montrées qu'il est possible de mesurer l'état de l'azote dans la culture avec des instruments optiques [17]. Puisque la majorité de l'azote dans la feuille est contenue dans des molécules de chlorophylle (Han et al. 2001), qui est la base de la prédiction de l'état de l'azote en mesurant la réflexion des feuilles. Une croissance de la réflexion visuelle est reliée en grande

partie à la décroissance en contenu de la chlorophylle, qui est le résultat d'un manque d'azote. Une augmentation de la réflexion dans le proche infrarouge (NIR) est dû en grande partie à la croissance de l'indice de surface foliaire (*Leaf Area Index LAI*) et la biomasse verte.

On trouve beaucoup d'exemples d'utilisation des images satellitaire ou images aériennes pour l'estimation de la quantité d'azote dans les cultures [18,19].

- Détection des maladies et des dégâts des organismes nuisibles

La variabilité de la réflexion spectrale des plantes résultant de l'apparition et de la sévérité des maladies ou des dégâts causés par des organismes nuisibles permet l'utilisation de la télédétection pour les identifier.

Les caractéristiques spectrales des plantes en bonne santé et des plantes infectées sont différentes de façon significative, dans le spectre visible (VIS). Une feuille en bonne santé réfléchit peu de radiation à cause d'une forte absorption des pigments photosynthétiques, alors que la réflexion spectrale dans les bandes proche infrarouge (NIR) est relativement élevée qui est déterminée principalement par la structure interne de la feuille et la matière sèche.

On trouve également de nombreuses applications d'identification d'infection dans la littérature, en utilisant des capteurs sur sol (à main) [20,21], des drones (UAV) [22], et des images satellitaires multispectrales [23,24]

- Évaluation des demandes en eau des plantes

Le développement de la télédétection thermique infrarouge a rendu possible la mesure des changements de température et la dynamique des canopées. Ces changements sont dus au taux de transpiration des plantes et de la conductance stomatique.

Par conséquent, la température des feuilles des plantes et de la canopée a été utilisé pour la détermination des besoins en eaux des plantes.

Afin de rendre la température de la canopée plus cohérente, les auteurs de [25] ont établi l'Indice de stress hydrique des cultures (*Crop Water Stress Index CWSI*) pour surveiller l'état d'eau de la culture

$$CWSI = \frac{(T_{canopy} - T_{nws})}{(T_{dry} - T_{nws})}$$

T_{canopy} : la température des feuilles de canopée complètement éclairées(°C) quand la plante est bien irriguée (pas de stress hydrique).

T_{dry} : température des feuilles de canopée (°C) complètement ensoleillées lorsque la culture est gravement en stress hydrique en raison de la faible disponibilité en eau du sol.

T_{nws} et T_{dry} sont les limites supérieures et inférieure utilisées pour normaliser CWSI aux effets de changement des conditions environnementales (température de l'air, humidité relative, radiation solaire et vitesse du vent) sur le T canopée.

Le CWSI a deux modèles, un modèle empirique et un modèle théorique; cependant, le modèle théorique implique trop de paramètres et ces paramètres ne sont pas faciles à obtenir. Par conséquent, le modèle théorique n'est utilisé qu'à des fins de recherche [26-28]. Le modèle empirique peut être obtenu uniquement en utilisant la température du couvert végétal, la température de l'air et la différence de saturation de l'air, le modèle empirique a été encore étudié davantage et a été utilisé dans de nombreuses applications [29].

Outre l'utilisation du rayonnement thermique infrarouge pour la détection du stress hydrique des

plantes, le spectre visible (VIS) a également été utilisé pour la détection précoce de stress hydrique.

Cela implique l'utilisation d'indices focalisés sur des bandes à des longueurs d'ondes spécifiques où les pigments photosynthétiques sont affectés par des conditions de contraintes telles que la chlorophylle. L'indice photochimique de réflectance (*Photochemical Reflectance Index* PRI) a été utilisé comme indice de stress basé sur ce principe, avec des développements initiaux à appliquer à la détection des symptômes de la maladie. Il est exprimé par:

$$PRI = (R_{531} - R_{570}) / (R_{531} + R_{570}).$$

Il y a une étroite relation entre l'épaisseur d'eau équivalente de la canopée (*Estimated Water Thickness* EWT), qui est le poids de l'eau par unité de surface de feuille et la biomasse des plantes et leur indice de surface foliaire ou LAI (Leaf Area Index). Considérant cette relation, les auteurs de [30] ont pu développer un modèle décrivant une relation entre l'EWT et une image aérienne hyper-spectrale, qui s'est avérée un bon prédicteur pour les cultures à feuilles larges comme les haricots, le maïs, le canola petit pois, alors qu'il a fourni de mauvaises prévisions pour le blé.

Plusieurs méthodes ont été développées pour estimer le contenu d'eau de la canopée (*Canopy Water Content*, CWC) en utilisant le NDWI et le NDII [31-33].

Les images satellitaires à faible résolution sont utiles pour l'estimation du contenu d'eau de la végétation dans de vaste zone agricole et peuvent supporter un management d'irrigation efficace en fournissant des informations sur la demande totale en eau par évaporation pour les cultures [34,35].

- Contrôle de mauvaises herbes

Des recherches intensives ont été faites sur l'utilisation des radiomètres à main pour le contrôle des mauvaises herbes dans l'agriculture. Le contrôle des mauvaises herbes implique l'identification des espèces de mauvaises herbes et la distinction des plantes cultivées. La première est moins compliquée que la seconde et suffirait pour l'application d'herbicide précisément sur la mauvaise herbe.

Une grande efficacité a été obtenue pour la distinction des mauvaises herbes des plantes cultivées ainsi que leur identification en utilisant la vision par machine, exploitant des informations sur la couleur et sa saturation, la forme et la texture des plantes. La précision de cette méthode est élevée, variant de 80% à 97% [36-38]

Les auteurs de [39] ont étudié la possibilité d'utiliser des drones pour optimiser l'application des herbicides sur la base d'images aériennes. Les altitudes de vol basses des drones (40m) ont permis l'acquisition d'images aériennes à haute résolution spatiale, ce qui a permis la détection de mauvaises herbes avec une précision allant jusqu'à 90%, 50 jours après le semis.

La reconnaissance des mauvaises herbes à l'aide de satellites multi spectraux à haute résolution tels que QuickBird et GeoEye (résolution au sol de 2.44m et 1.64m respectivement), semble prometteuse [40].

Quant aux satellites à moyenne résolution (SPOT et LandSat par ex) et faible résolution (NOAA-AVHRR), ils ne sont utiles que sur une grande échelle.

1.2.1.6 Indice de végétation, effet atmosphérique et réflexion du sol

Le NDVI est limité sous l'effet de l'atmosphère et la réflexion du sol, des solutions à ce problème ont été proposées, tel que l'Indice de végétation résistant à l'atmosphère (*Atmospherically Resistant Vegetation Index* ARVI) [41].

L'utilisation du ARVI nécessite l'obtention des paramètres atmosphériques qui sont difficiles à obtenir pour pouvoir implémenter le modèle de transmission atmosphérique 5S.

Ainsi, les auteurs de [42], ont proposé un nouvel indice, IAVI, qui peut éliminer l'interférence atmosphérique sans l'utilisation du modèle 5S.

NDVI et PVI ont des lacunes dans la description du comportement spectrale de la végétation et le l'arrière-plan sol [43], surtout lorsque la culture est éparse. Plusieurs indices de végétation ont donc été développés pour améliorer la sensibilité de ces indices.

On trouve donc le SAVI et le MSAVI et le OSAVI qui sont décrits plus en détails dans les publications telles que [44-46].

1.2.2 Robots agricoles

Le développement de la robotique et du GPS à précision (DGPS) permet son intégration dans les systèmes de prévision et d'aide à la décision, augmentant la précision et réduisant la main d'œuvre nécessaire pour travailler la surface agricole.

On trouve par exemple les tracteurs autodirecteurs produits par John Deere [47]. Le tracteur fait la majorité du travail de façon autonome avec possibilité d'avertir l'agriculteur en cas d'urgence.

Récemment on a vu aussi l'introduction des AgBots, des robots qui peuvent se charger des tâches traditionnellement faites par un agriculteur ; les avancées dans la vision par ordinateur durant ces dernières années intégrées dans des robots peuvent produire des robots pouvant automatiser des tâches fastidieuses et coûteuses de l'agriculture dans le futur.

On trouve aussi le développement des appareils qui permettent d'appliquer les fertilisants ou d'irriguer à des taux variables ; ce qui permet de tenir compte des variabilités du sol déduite du monitoring de la surface lors de l'application de l'irrigation ou des fertilisants [48].

Les processus agricoles sont des chaînes de tâches systématiques et répétitives qui dépendent du temps avec quelques processus qui diffèrent selon le type de culture, culture permanente ou culture arable.

Une étude [49] sur la faisabilité économique de l'utilisation des applications robotiques dans l'agriculture a montré une réduction du coût de production de manière significative. L'introduction des robots en agriculture améliore la durabilité et rajoute une consistance aux processus agricoles. La précision des robots dans des tâches comme l'application des produits chimiques réduit l'impact environnemental et ces effets nuisibles sur les humains [50].

On trouve aussi des travaux sur la modification des tracteurs déjà existant en leur rajoutant la partie électronique nécessaire pour la direction et la communication pour des opérations automatisées dans les champs agricoles.

Les drones ont une capacité limitée pour porter les produits chimique et les batteries. il est

difficile également de les utiliser pour certaines tâches au sol telles que la préparation du sol et l'application de pesticides spécifiques aux plantes.

La complexité de développer un robot pouvant réaliser les différentes tâches agricoles, a poussé les récentes recherches à se concentrer sur les développement de robots pouvant réaliser une des tâches agricoles spécifique.

La complexité de développer un robot pouvant réaliser les différentes tâches agricoles a poussé les récentes recherches à se concentrer sur les développement de robots pouvant réaliser une des tâches agricoles de manière spécifique.

Dans la culture arable, une étude [51] catégorise les tâches agricoles en 5 opérations majeures (figure 1.1), avec quelques différences en fonction du pays ou de la culture concernée :

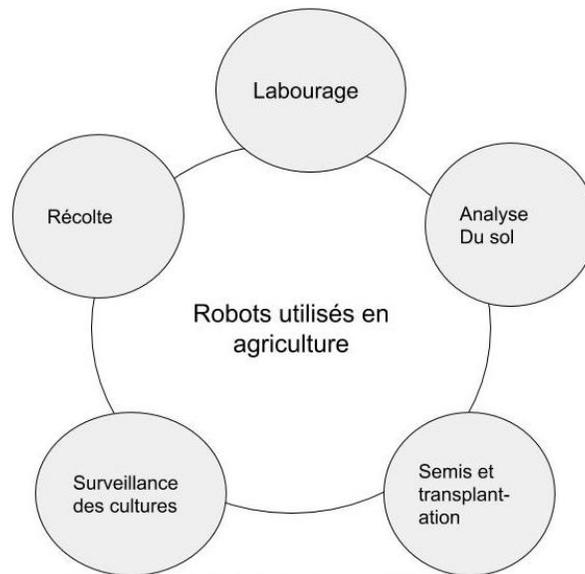


Figure 1.1. Les cinq opérations majeures en agriculture

1.2.2.1 Robots de labourage

Le labourage est la première étape dans le processus agricole. Les opérations du labourage consistent en un labourage primaire qui est une agitation profonde du sol produisant une surface rugueuse, suivi d'un labourage secondaire qui est le contraire du labourage primaire et produit une surface lisse.

Le labourage est un processus fastidieux et à labeur intensif, faisant de lui un objectif pour l'automatisation. Les tracteurs traditionnels sont lourds et ont un couple élevé ; ce qui leur permet d'avoir suffisamment de puissance pour remonter le sol. Contrairement aux petits robots, les tracteurs ont aussi tendance à endommager le sol par le compactage du sol.

Des recherches ont porté sur la modification des tracteurs commercialisés déjà existants en leur rajoutant les équipements nécessaires pour les rendre autonomes.

Les auteurs de [52] ont modifié un tracteur commercial (Yanmar EG65) (figure 1.2) en rajoutant un antenne GNSS (*Global Navigation Satellite System*), un moteur DC pour la commande de la

direction du tracteur et une centrale à inertie (*Inertial Measurement Unit _ IMU*).



Figure 1.2. Tracteur autonome à base de Yanmar EG65

Une étude [53] a montré que le compactage du sol par les tracteurs en opération utilise 80%-90% de l'énergie dans l'agriculture conventionnelle. Ce compactage requiert d'autres opérations pour desserrer le sol.

Plusieurs travaux [54-56] suggèrent que l'utilisation des robots de petite taille réduirait la fréquence de labourage nécessaire. Il est aussi possible pour les robots de percer et placer les graines ou les semis sans avoir à labourer le sol, ou bien optimiser le processus du labourage en faisant des micro-labourages autour de l'endroit du semis, qui a le plus d'influence sur la croissance de la plante.

1.2.2.2 Robots d'analyse du sol

Le labourage est suivi de l'analyse du sol, opération qui consiste à mesurer différentes propriétés physiques et chimiques du sol pour évaluer sa fertilité et conditions physiques. Dans certaines conditions, l'analyse du sol est faite à différentes étapes de la croissance de la plante pour évaluer la quantité et la composition des nutriments à appliquer.

L'analyse est traditionnellement faite en prenant des échantillons du champ d'intérêt qui seront analysés dans un laboratoire spécialisé. Cette opération est coûteuse et met beaucoup de temps.

Plusieurs recherches ont été faites sur des robots pouvant prendre des échantillons et les analyser sur le sol. Quelques unes sont résumées dans le tableau suivant:

Tableau 1.2. Travaux connexes sur l'étude automatisée de détection du sol en temps réel

Référence	Équipement de détection	Paramètres de détection*
Capteur du sol en temps réel [57]	Spectrophotomètre	Modèle de prévision pour MC, SOM, NO_3^- , N, pH, EC et cartes de sol
Mesure directe des propriétés chimiques du sol en déplacement à l'aide d'électrodes à sélection ionique [58]	électrodes sélectives aux ions	pH du sol, potassium disponible, NO_3^- , -N et sodium
Elaboration de cartes du pH du sol et des besoins en calcaire à l'aide de capteurs de sol en mouvement [59]	Electrodes de pH sélectives aux ions. capteur de conductivité électrique, spectromètre proche infrarouge	pH et besoins en chaux du sol
Un système automatisé d'analyse rapide des éléments nutritifs du sol [60]	électrodes sélectives aux ions	Détection proximale du nitrate de sol, du potassium et du sodium.
Cartographie du pH du sol avec un capteur actif [61]	électrodes d'antimoine sélectives aux ions	pH du sol
Détection intégrée de l'humidité du sol à l'échelle du terrain : mesure, modélisation et partage pour améliorer l'aide à la décision en agriculture [62]	Hydro Probe II-coaxial réflectométrie diélectrique Impédance	Humidité du sol

* MC: teneur en humidité; SOM: matière organique du sol; EC: conductivité électrique. .

1.2.2.3 Robots pour le semis et la transplantation des plantes

Le semis consiste à planter les graines dans le sol pour qu'elles puissent germer avec succès. le repiquage (ou transplantation) consiste à placer une petite plante d'un semis qui a germé dans une position particulière dans le sol en fonction des exigences spatiales spécifiques de chaque plante.

Les céréales alimentaires telles que le riz et le blé représentent l'un des principaux types d'aliments consommés par les populations du monde entier. Ils sont sujet d'intérêt d'automatisation de leurs semis, comme le Iseki PZ60 pour la transplantation du riz (figure 1.3). Le tableau suivant donne un bref aperçu sur quelques études notables dans le domaine :

Tableau 1.3. Divers travaux sur des robots agricoles pour les opérations d'ensemencement et de transplantation

Référence	La description
Développement de robots de plantation de semences pour la création d'images de fleurs en croissance à grande échelle [63]	67% des graines éjectées se trouvaient dans un rayon de 1 cm et 85% dans un rayon de 1,5 cm
Robot automatique d'ensemencement du riz à trois roues opérant dans des rizières sèches [64]	Le positionnement basé sur le GNSS a été utilisé avec la localisation étendue basée sur le filtre de Kalman, la précision moyenne d'ensemencement étant de 91%.
Rover autoguidé pour creuser et semer des graines se basant sur le commandement [65]	les commandes étaient données manuellement par un téléphone portable pour la navigation et l'ensemencement.
Thorvald, une plate-forme robotique polyvalente pour les applications agricoles, initialement testée sur le terrain [66]	RTK-GNSS utilisé pour la navigation. Des expériences d'ensemencement ont été menées en utilisant différents schémas d'ensemencement et ont été analysées pour la suppression des mauvaises herbes.



Figure 1.3. Iseki PZ60 transplantation du riz

1.2.2.4 Robots de surveillance des cultures

Robots de surveillance de l'état des cultures

Les récentes avancées de recherche dans le domaine de phénotypage des plantes, domaine qui permet d'évaluer l'état de croissance de la plante, le rendement et d'autres paramètres en se basant sur des paramètres visuels de la plante tels que la longueur de la feuille, l'indice de surface foliaire (*Leaf Area Index*, LAI).

Ces paramètres peuvent être estimés en utilisant différents capteurs ou en fusionnant des données provenant de différents capteurs.

Différentes recherches sont focalisées sur l'utilisation des capteurs du sol portés sur des tracteurs ; ce qui laisse envisager la possibilité de développement de robot autonome performant la même opération permettant une gestion plus automatique du champ agricole.

Les auteurs de [67] ont équipé un robot, Bonirob (figure 1.4), de capteurs sophistiqués, comme la caméra 3D-TOF (3D-Time Of Flight), des outils de prise d'images multi spectrales ainsi que de GPS pour la localisation précise de l'endroit de prise des données.



Figure 1.4. Robot Bonirob

Robots pour la surveillance et la lutte contre les ravageurs et les maladies

Les cas de maladies causées par des ravageurs ou par des micro-organismes affectent la production des produits agricoles dans le monde entier. La majorité de ces maladies induit des symptômes visibles chez les plantes. Cependant, les agriculteurs ne peuvent identifier une maladie dans un grand champ que lorsqu'un nombre important de plantes sont infectées.

Robots de détection et de lutte contre les mauvaises herbes

Tableau 1.4. Autres travaux connexes sur la détection et l'élimination des mauvaises herbes

Référence	La description
Système robotisé de lutte contre les mauvaises herbes pour les tomates [68]	Ils ont développé un contrôle robotique des mauvaises herbes en temps réel à l'aide de la vision artificielle; les résultats ont montré que 24,2% des plants de tomates avaient été mal identifiés et que 52,4% des mauvaises herbes n'avaient pas été pulvérisées.
Vision par machine pour un microrobot de mariage dans une rizière [69]	Ils ont développé un algorithme basé sur le traitement d'image pour déterminer la direction de déplacement en utilisant une transformation de Hough pour le robot de désherbage.
Systèmes de contrôle robotique autonome des mauvaises herbes : une revue [70]	Ils ont décrit diverses méthodes de détection des mauvaises herbes et des mécanismes d'élimination des mauvaises herbes
Le développement et l'évaluation de la précision d'un système autonome basé sur le GPS pour le contrôle mécanique des mauvaises herbes dans les rangs de cultures en rangs [71]	Ils ont développé et amélioré la précision des systèmes de binage autonomes pour l'élimination des mauvaises herbes dans les rangées à l'aide de la navigation RTK-GPS.
Application directe et effecteur pour un robot de contrôle précis des mauvaises herbes [72]	mis au point d'un effecteur terminal à application directe d'herbicide interfacé avec un robot mobile et 90% des mauvaises herbes présentaient des symptômes de nécrose
Conception d'un robot de désherbage du paddy [73]	balayeuse latérale rotative développée faite d'un corps élastique pour enlever les mauvaises herbes dans les rizières.
Système automatique de détection des mauvaises herbes et robot pulvérisateur intelligent d'herbicides pour les champs de maïs [74]	développement d'un algorithme pour la détection et la classification des mauvaises herbes ; la précision de l'algorithme était précise à 95,89%
Développement d'un système de désherbage mécatronique intra-rangée avec des outils de binage rotatif: approche théorique et simulation [75]	conception et analyse d'une plate-forme mobile avec différents bras rotatifs équipés de pales servant d'effecteur pour éliminer les mauvaises herbes intra-rangées
élimination des mauvaises herbes dans un champ cultivé par un robot autonome utilisant LABVIEW [76]	Les images capturées à l'aide d'une caméra statique ont été traitées pour l'identification des mauvaises herbes et les coordonnées de celles-ci ont été transmises à un robot pour suppression.

1.2.2.5 Robots pour la récolte

Lorsqu'on parle de la récolte, généralement on fait référence à la collection des cultures mûries. Cependant le processus diffère pour différentes cultures. Par exemple la récolte des cultures horticoles, telles que les cultures des fruits et légumes, désigne la collecte de fruits ou de légumes à partir de plantes, mais ce processus est différent pour les cultures de riz et du blé.

La récolte nécessite beaucoup d'heures de travail. En horticulture, les fruits et les fleurs doivent être cueillis à plusieurs reprises à mesure qu'ils mûrissent. Une récolteuse robotisée doit donc détecter les propriétés du produit telles que sa position, sa taille, son type de surface et sa forme. De plus, le robot a besoin de mobilité pour se déplacer dans une position raisonnable et un mécanisme de cueillette ou de récolte pour le processus de récolte.

Pour résoudre ces problèmes, plusieurs machines semi-automatiques telles que les récolteuses et les moissonneuses-batteuses ont été construites. De nombreuses récolteuses disponibles sur le marché ont la capacité d'interagir avec les tracteurs en utilisant un arbre de prise de force (*Power Take-Off* _ PTO) qui utilise la puissance fournie par le moteur.

Les moissonneuses-batteuses qui sont des véhicules dédiés à la récolte et conduites par des humains, ont été utilisées pour récolter diverses cultures telles que le blé, l'avoine, l'orge, le maïs, le soja et le tournesol. Iseki HFG 443 a été modifié [77] pour des cultures telles que le riz. La méthodologie de navigation était similaire à celle d'un tracteur et d'un transplanteur de riz automatisés.

Dans [78], les auteurs ont modernisé une moissonneuse-batteuse AG1100 avec un récepteur Topcon AGI3 GNSS et IMU Topcon pour une navigation autonome guidée par les coordonnées mondiales du système géodésique Sysetm-84 (WGS-84) pour la récolte du riz et du blé.

La détection et la cueillette de fruits, de légumes ou de fleurs de plantes sont nécessaires pour d'autres types de cultures telles que les cultures horticoles. Les cueilleuses robotisées qui cueillent des fruits ou des légumes se composent principalement de pinces à contact qui sont actionnées par des moyens pneumatiques, hydrauliques ou électriques. D'autres méthodes telles que la coupe de la tige avec un faisceau laser ont été proposées [79] pour minimiser la taille et la complexité des effecteurs finaux. Une lentille de focalisation peut focaliser un faisceau laser de 30 W haute puissance provenant d'une diode laser couplée à une fibre pour couper la tige d'un seul fruit ou d'une grappe.

Plus de détails sont donnés sur les développements récents dans ce domaine ainsi que la tendance des recherches entreprises dans [80].

1.2.3 Réseaux de capteurs sans fil (*Wireless Sensor Networks*_WSN)

Les avancées technologiques récentes dans le domaine des capteurs, GPS, ainsi que l'avènement des réseaux de capteurs sans fil (WSN) ont entraîné une nouvelle orientation de la recherche dans le domaine de l'agriculture.

Dans cette partie, on va présenter un bref aperçu des applications et des publications étudiant l'application des réseaux de capteurs dans l'agriculture, organisés selon le processus d'agriculture.

Applications communes des réseaux de capteurs sans fil en agriculture

Les WSN et WSAN (*Wireless Sensor and Actuator Networks*) sont souvent utilisés avec différentes technologies.(une définition est donnée au deuxième chapitre).

1.2.3.1 Irrigation

L'irrigation est l'application de l'eau sur les terres agricoles. Elle est considérée comme une étape des plus importantes en agriculture.

Plusieurs travaux ont été menés afin d'appliquer l'eau / l'irrigation de façon efficace et optimale, appliquer l'eau seulement là où il y a besoin et en quantité mesurée, en l'utilisant avec les méthodes d'irrigation modernes telles que l'irrigation goutte à goutte, l'irrigation par aspersion et l'irrigation à pivot central.

Dans [81], les auteurs ont mis au point et testé un système d'irrigation automatique télécommandé pour les zones irriguées en Espagne. La zone a été divisée en sept sous-régions. Chaque sous-région était surveillée et contrôlée par un secteur de contrôle. Les sept secteurs de contrôle étaient connectés les uns aux autres et au contrôleur central via un réseau WLAN. Les résultats ont montré une économie significative de l'eau, c'est-à-dire jusqu'à 30–60%.

Dans [82], les auteurs ont travaillé sur le contrôle de l'irrigation de précision à l'aide de systèmes d'irrigation automoteurs, à déplacement linéaire et à pivot central. Des capteurs sans fil ont été utilisés dans le système pour faciliter la planification de l'irrigation à l'aide de données de télédétection et de données météorologiques.

Dans [83, 84] deux systèmes d'irrigation à base de réseau de capteurs sans fil sont proposés.

1.2.3.2 Fertilisation

L'importance des fertilisants pour la croissance des plantes ainsi que leur coût important et les effets nocifs qui peuvent être causés par l'application excessive de ces derniers ont motivé plusieurs recherches visant une application optimale des fertilisants dans le domaine agricole.

Dans [85], les auteurs ont construit un applicateur d'engrais automatisé composé de modules d'entrée, d'aide à la décision et de sortie utilisant la technologie GPS, des capteurs temps réel et la technologie Bluetooth. Le module d'entrée est utilisé pour fournir des valeurs de données GPS et des données de capteurs au système d'aide à la décision qui calcule la quantité optimale et l'étalement du motif offert en fonction de l'acquisition de données de capteurs en temps réel via des modules de communication Bluetooth. Les calculs du système d'aide à la décision ont été utilisés pour réguler le taux d'application des engrais.

1.2.3.3 Lutte contre les ravageurs

Beaucoup de recherches portent sur le développement de meilleurs produits pour la lutte contre les ravageurs avec une meilleure efficacité et un moindre impact écologique. on trouve ainsi des travaux portant sur l'utilisation des WSNs pour une application plus précise des pesticides.

Dans [86], l'auteur a travaillé sur un projet visant à traiter la maladie de Phytophthora qui affecte la culture de la pomme de terre. Les capteurs étaient utilisés pour surveiller l'humidité et la température. Le suivi de ces deux paramètres les a aidés à réduire la maladie.

Les maladies des plantes surviennent souvent dans des parcelles de culture qui nécessitent des fongicides à taux variables et une application uniforme sur l'ensemble du champ.

Dans [87] l'auteur suggère l'utilisation d'un pulvérisateur de plein champ à débit variable contrôlé par CROP-mètre.

Les informations données par le CROP-mètre et les données de distribution spatiale de la surface foliaire des plantes à pulvériser avec des pesticides ont été utilisées par leur algorithme pour contrôler le dosage des fongicides à pulvériser.

Semios [88] commercialise un système composé de pièges collants avec des caméras qui permet de connaître la distribution des insectes nuisibles en temps réel et permet d'adopter une stratégie adéquate d'application de pesticides.

1.2.3.4 Horticulture

L'horticulture traite de la culture, de la production, de la distribution et de l'utilisation de fleurs, de fruits, de serres, de plantes ornementales, etc. Elle est également appelée agriculture à petite échelle ou à faible intensité.

Dans [89], les auteurs ont utilisé un réseau de capteurs pour surveiller la température de l'air, l'humidité, la lumière ambiante, l'humidité et la température du sol. Ces données ont permis une analyse de l'état actuel de la pépinière. Ce réseau peut également aider à combattre les maladies des plantes.

Dans [90], les auteurs ont déployé un WSN de 65 nœuds dans un vignoble pendant 6 mois. Les informations collectées ont été utilisées pour améliorer des aspects importants de la production.

1.3 Notre Modèle générique d'un système dédié à l'agriculture de précision

Le modèle proposé ici (figure 1.5), sert à donner une architecture simplifiée d'un système dédié à l'agriculture de précision, sur lequel seront basés les prochains chapitres, abordant différentes parties d'un système d'agriculture de précision.

Nous avons déduit à travers une analyse un modèle de système dont les briques de bases sont issues de l'open source.

Nous nous proposons dans les chapitres suivants d'étudier voire développer les constituants du modèle proposé pour l'appliquer au contexte de notre étude à savoir, l'agriculture de précision.

CHAPITRE 2

CHAPITRE 2 Conception et réalisation d'un nœud dédié à l'agriculture de précision

2.1 Introduction

L'irrigation est considérée comme un des processus les plus importants en agriculture du fait du lien direct entre la croissance de la culture et l'approvisionnement en eau, lorsque l'approvisionnement en eau est insuffisant, les plantes subissent un stress hydrique, ce qui entraîne une réduction du rendement ou même de mauvaises récoltes dans des conditions de sécheresse extrêmes.[91]

D'où la nécessité d'un suivi des besoins en eau de la culture et d'un système d'irrigation permettant d'irriguer au bon moment tenant compte des variabilité en besoin en eau sur le sol. Ce chapitre présentera une solution qui peut être utilisée pour la gestion centralisée de l'irrigation goutte à goutte ou à aspersion permettant le contrôle individuel et programmable des différents actionneurs. La même unité peut être utilisée pour récupérer des données du sol, pouvant aider à une optimisation de l'irrigation répondant au problème de pénurie d'eau qui affectent plusieurs régions dans le monde.

2.2 Réseau de capteurs sans fil

2.2.1 Définition

Un réseau de capteurs sans fil (Wireless Sensor Network, WSN) comprend plusieurs unités appelées "nœuds". Les nœuds sont des appareils intelligents qui sont utilisés pour la collecte des données requis par l'application considérée.

Le réseau de capteurs réalise trois fonctions de base: mesure, communication et calcul. Les nœuds qui s'occupent de la collecte des données sont appelés, nœud de source (*source node*) quant au nœud s'occupant de récupérer les données des nœuds source est appelé *gateway*, le nœud *gateway* a plus de puissance de calcul qu'un nœud source.

Un nœud source peut aussi fonctionner comme un nœud de routage, selon la topologie réseau choisie [92].

2.2.2 Réseau de capteur et actionneur sans fil

Un réseau de capteurs et actionneurs sans fil (*Wireless Sensor and Actuator Network, WSAN*) est une variante du WSN avec un composant additionnel, qui est l'actionneur. L'ajout d'un actionneur augmente la capacité du WSN du monitoring seulement au monitoring et control.

2.2.3 Architecture générale d'un nœud d'un réseau de capteurs et actionneurs sans fil

Le design d'un nœud d'un réseau de capteurs et actionneurs sans fil suit généralement la même architecture, qui présentée dans la figure 2.1, sur laquelle on va se baser pour le développement du reste de ce chapitre.

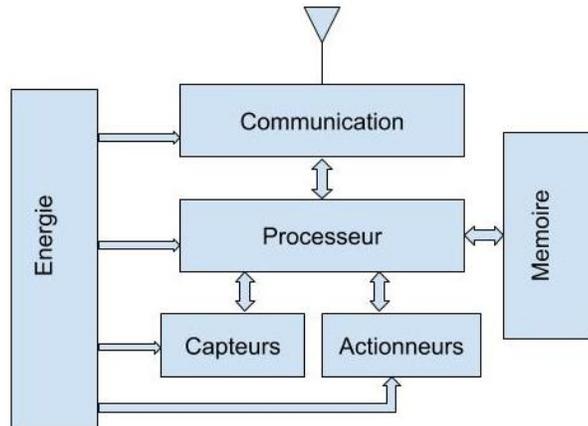


Figure 2.1. Architecture générale d'un nœud

On a un module d'énergie qui sert à alimenter les différents modules du circuit, qui est une batterie munie optionnellement d'un circuit de recharge à partir d'un panneau photovoltaïque par exemple, on trouve également la circuiterie nécessaire pour alimenter les différentes parties du circuit.

Le module de communication sert à transmettre les données, ou recevoir les commandes de la gateway, il est généralement muni d'un coprocesseur, et interface avec le processeur.

Le processeur interface avec les différents modules et pourra, en option, faire un prétraitement des données agrégées, il contrôle également l'opération des différents modules composants le nœud. En raison de l'importance d'une basse consommation d'énergie, ce sont des microcontrôleurs qui sont utilisés.

Le capteur convertit le paramètre physique à mesurer en un signal électrique.

L'actionneur répond au contrôle du processeur pour réaliser une opération donnée.

La mémoire est utilisée pour stocker les données reçues ou envoyées pour un futur traitement, transmission ou prise de décision, il est possible dans certaines applications de rajouter une mémoire externe.

2.3 Conception d'un nœud d'un système d'irrigation dédié à l'agriculture de précision

2.3.1 Microcontrôleur utilisé

Le microcontrôleur qu'on a choisit pour ce système est le ATmega32U4 (figure 2.2) [93], un microcontrôleur 8-bit à haute performance et à basse consommation d'énergie.

Quelques caractéristiques techniques du ATmega32U4:

- Jusqu'à 16 MIPS à 16MHz
- Multiplieur à 2-cycle intégré.
- 32KB *In-system self programmable flash*.
- 2.5Kb SRAM
- 1KB EEPROM interne
- Cycles *Write/Erase*: 10000 Flash/ 100000 EEPROM
- Lock pour protéger le code.
- Un *Timer/Counter* à 8 bit et deux *Timer/Counter* à 16 bit.
- Quatre chaînes PWM avec une résolution programmable de 2 à 16 bit.
- 26 sorties I/O programmables.
- Six *Sleep Modes*.

Les autres caractéristiques du microcontrôleur peuvent être consultées en ligne.

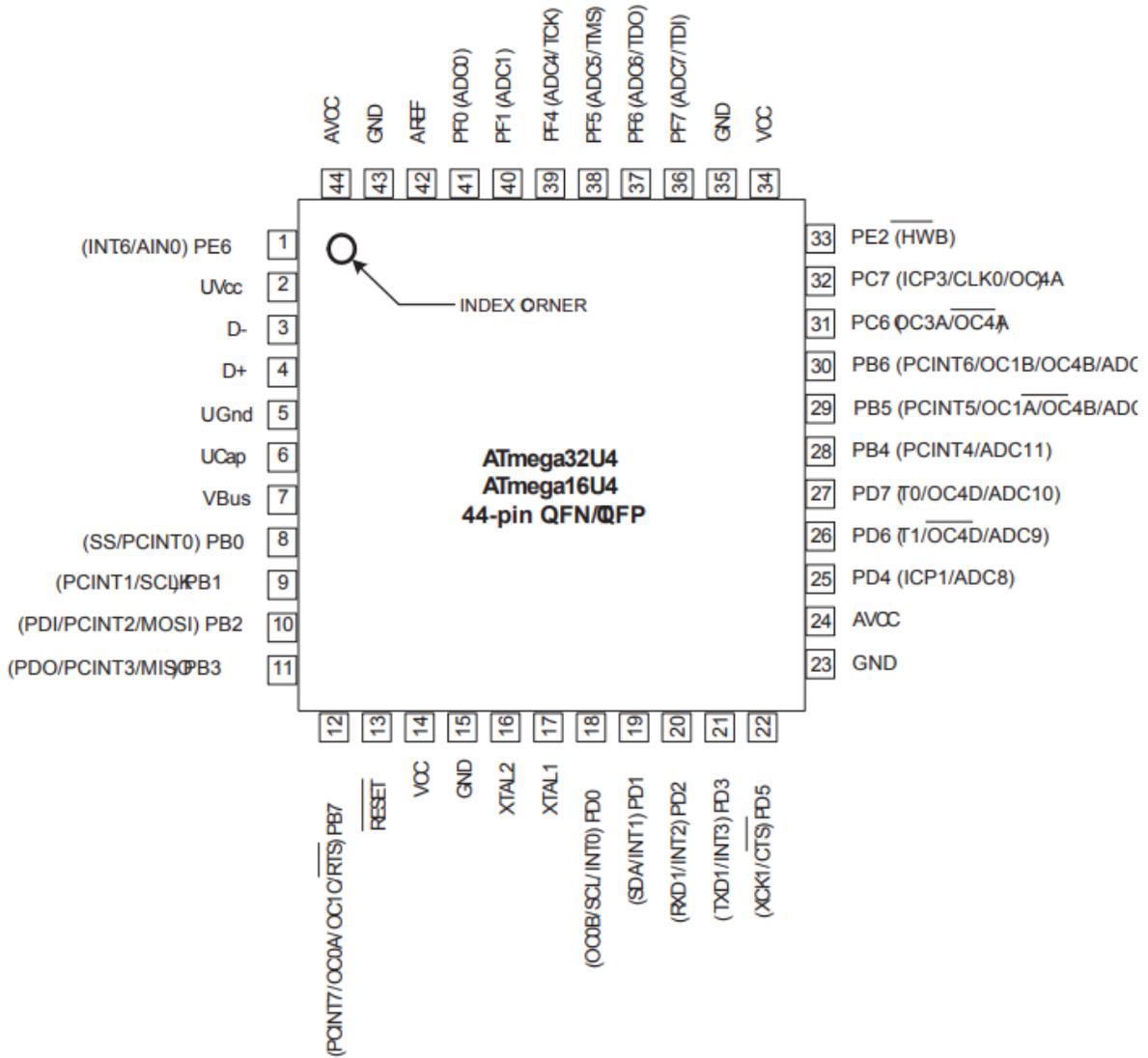


Figure 2.2. Pinout de ATmega32U4

La partie du circuit relative au microcontrôleur:

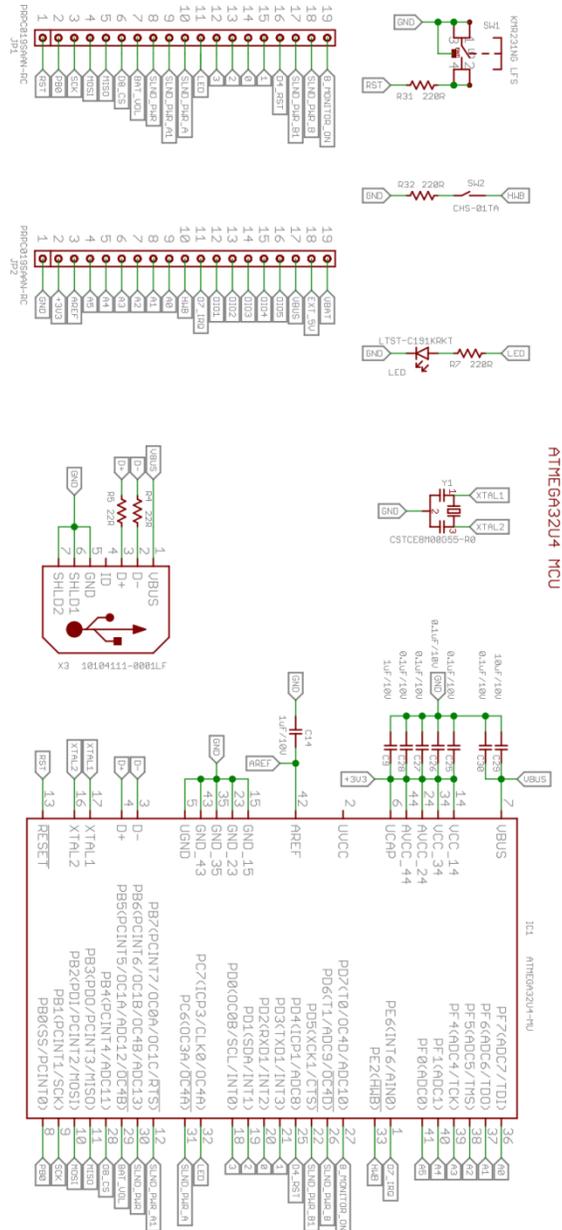


Figure 2.3. Partie du circuit relative au microcontrôleur

- Remarque:

SW2 est utilisé pour activer le mode *Hardware Boot*, ATmega32U4 est fournis avec un bootloader par défaut, ce qui rend possible sa programmation sans programmeur, via USB 2.0, une option qui peut être utile lors du déploiement à grande échelle.

2.3.2 Module de communication

2.3.2.1 Choix du module de communication: RFM9xW

Pour le module de communication, plusieurs technologies sont disponibles utilise la fréquence 2.4GHz, et assurant de débit de transfert important.

Notre application ne nécessitant pas des débits de transfert importants mais nécessite une basse consommation d'énergie et une portée plus grande, c'est la raison pour laquelle nous avons opté à utiliser un module de la famille RFM9xW (tableau 1) fabriqué par HopeRF.

Les émetteurs-récepteurs RFM 95/96/97/98 (W) [94] sont dotés du modem longue portée LoRa™ qui assure une communication à spectre étendu ultra-longue portée et une immunité élevée aux perturbations tout en minimisant la consommation de courant.

En utilisant la technique de modulation LoRa™ [95] brevetée par Hope RF, RFM 95/96/97/98 (W) peut atteindre une sensibilité supérieure à -148 dBm en utilisant un cristal et des composants associés peu coûteux. La haute sensibilité associée à l'amplificateur de puissance intégré de +20 dBm offre un budget de liaison inégalé dans l'industrie, le rendant optimal pour toute application nécessitant une portée ou une robustesse.

LoRa™ offre également des avantages considérables en termes de blocage et de sélectivité par rapport aux techniques de modulation conventionnelles, résolvant ainsi le compromis de conception traditionnel entre portée, immunité aux perturbations et consommation d'énergie.

Ces périphériques prennent également en charge les modes hautes performances (G) FSK pour les systèmes tels que WMBus, IEEE802.15.4g. Le RFM 95/96/97/98 (W) fournit un bruit de phase, une sélectivité, une linéarité de récepteur et un IIP3 exceptionnels pour une consommation de courant considérablement inférieure à celle des appareils concurrents.

Tableau 2.1. Comparaison entre les modules de la famille RFM9xW

Module	Bande de fréquence	Facteur d'étalement	Largeur de bande	Taux de transfert effectif	sensibilité
RFM95W	868/915 MHz	6 - 12	7.8 - 500 kHz	.018 - 37.5 kbps	-111 to -148 dBm
RFM97W	868/915 MHz	6 - 9	7.8 - 500 kHz	.011 - 37.5 kbps	-111 to -139 dBm
RFM96W/ RFM98W	433/470 MHz	6 - 12	7.8 - 500 kHz	.018 - 37.5 kbps	-111 to -148 dBm

Lors de la réalisation de notre circuit, nous avons utilisé RFM95W et la fréquence 915 MHz pour faire les tests, mais ce dernier peut être remplacé avec un autre module de la même famille (selon la région ou il est déployé).

Facteur d'étalement (*Spreading factor*)

La modulation LoRa™ à spectre étalé est réalisée en représentant chaque bit d'information de charge utile par plusieurs puces d'information. Le débit auquel les informations d'étalement sont envoyées est appelé débit de symboles (R_s), le rapport entre le débit de symboles nominal et le débit de puces est le facteur d'étalement et représente le nombre de symboles envoyés par bit d'information.

2.3.2.2 Circuit d'interfaçage avec le module de communication

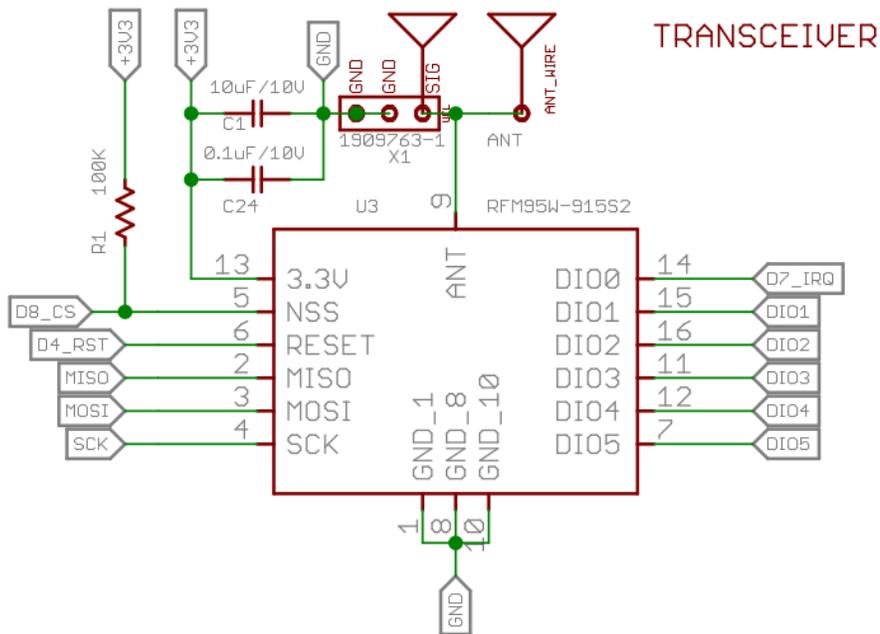


Figure 2.4. Circuit d'interfaçage avec le module RFM95W

2.3.3 Module énergie

Pour la source d'énergie, nous avons choisis d'utiliser une batterie Lithium ion à une seule cellule (3.7V), et afin de réduire le coût de maintenance dû aux changements de batterie, nous avons rajouté la possibilité d'intégrer un panneau solaire pour recharger la batterie.

Cette partie est divisée en trois:

- Circuit de recharge de la batterie.
- Circuit du régulateur 3.3V servant à alimenter le microcontrôleur et le module radio.
- Circuit d'alimentation de l'actionneur

2.3.3.1 Circuit de recharge de la batterie

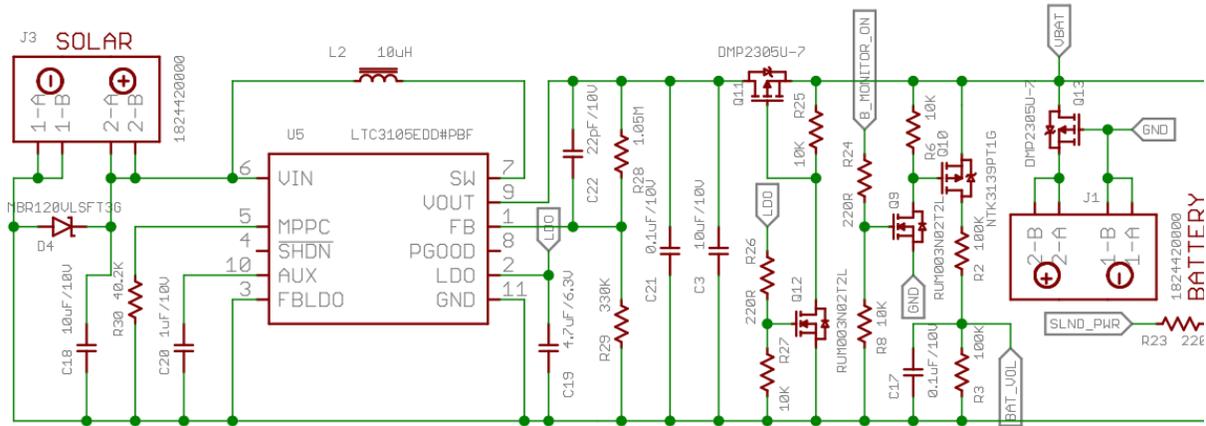


Figure 2.5. Circuit de recharge de la batterie

Nous avons choisis d'utiliser le convertisseur DC/DC à haute efficacité: LTC3105 [96], produit par Texas Instruments (TI).

Nous utilisons le circuit proposé pour la recharge d'une batterie à partir d'un panneau solaire dans le datasheet comme base pour notre conception.

TI nous fourni plein d'informations relatives à l'utilisation de ce circuit intégré que nous avons utilisé pour le choix des composants associés

- Choix de composants:

On met une diode schottky en parallèle avec le panneau solaire pour protection du panneau (*solar panel bypass diode*), en effet, les panneaux solaires disposées en sections individuelles, dans une longue chaîne, l'une des sections peut devenir complètement ombrée, alors que d'autres produisent toujours de l'énergie, la section à l'ombre peut être endommagée en raison de la dissipation de puissance (point chaud) causée par une polarisation inversée des cellules. Une diode schottky en parallèle permet au courant des autres cellules de bypasser la cellule ombrée, et limite la polarisation inversée à un niveau qui ne risque pas d'endommager la cellule.

La tension de sortie est fixée par R28 et R29, selon la relation suivante:

$V_{out} = 1.004V \cdot \left(\frac{R28}{R29} + 1\right) \simeq 4.2V$, FB étant un pin de feedback utilisé pour fixer la tension de sortie, qui varie de 1.6V à 5.25V.

Une capacité de 22 pF est utilisée en par parallèle à R1 pour réduire les ondulations en sortie et améliorer la réponse aux transitoires de charge

LDO est une sortie régulée. Il est recommandé de placer une capacité de 4.7 μF ou plus entre le pin LDO et le GND

Les concepteurs du CI (circuit intégré) ont prévu deux méthodes pour fixer la tension de LDO.

Nous avons choisi de connecter FBLDO au GND, ce qui fixera la tension de LDO à sa tension nominale: $V_{LDO} = 2.2\text{ V}$

Une capacité de filtrage de 10 μF ou plus doit être placée entre le V_{out} et le GND (source: datasheet), nous rajoutons une capacité de 0.1 μF pour le bruit à haute fréquence <différentes réponses en fréquence.... Imperfections des capacités>

Une capacité de 1 μF est connectée entre AUX (*Auxiliary Voltage*) et le GND. Ce pin est utilisé par le circuit de démarrage pour générer une rail de tension (*voltage rail*) pour alimenter une circuiterie interne jusqu'à ce que le V_{out} atteigne la tension de régulation.

Une capacité de découplage est placée entre V_{in} et le GND, il est recommandé de placer une capacité de 10 μF ou plus lorsque la source est à haute impédance, comme c'est le cas pour une cellule photovoltaïque.

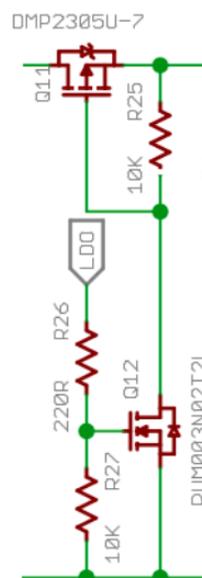


Figure 2.6. Circuit d'isolation du circuit de recharge de la batterie

Le circuit en figure 2.6 sert à isoler le circuit de recharge de la batterie lorsque la tension en sortie n'atteint pas la tension nominale.

DMP2305U [97] est un *P-ch enhancement MOSFET*.

RUM003N02 [98] est un *1.8V Drive N-ch MOSFET*

Lorsque LDO est régulé, ceci activera Q12, provoquant une chute de tension à travers R25, activant Q11 et fermant le circuit.

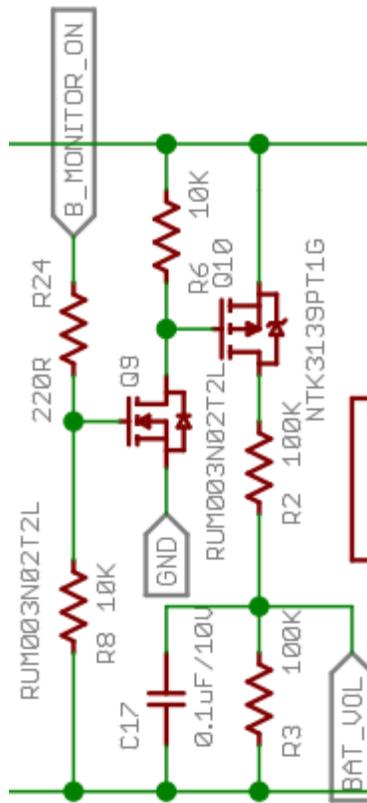


Figure 2.7.Circuit de mesure de la tension de batterie

Le circuit en figure 2.7 sert à détecter la tension de la batterie par le microcontrôleur (en connectant un pin ADC à BAT_VOL), le but étant de changer le comportement de l'appareil lorsque la tension de la batterie atteint un niveau bas, on pourra par exemple envoyer un message au gateway indiquant que la batterie est faible, ou réduire la consommation d'énergie temporairement en mettant le module de communication en mode *sleep*.

Pour “lire” la tension de la batterie, on utilise le même sous circuit précédent, on met B_MONITOR_ON à haut, provoquant une chute de tension à travers R6 qui fermera le circuit du diviseur de tension nous donnant: $V_{BAT_VOL} = V_{BAT} / 2$

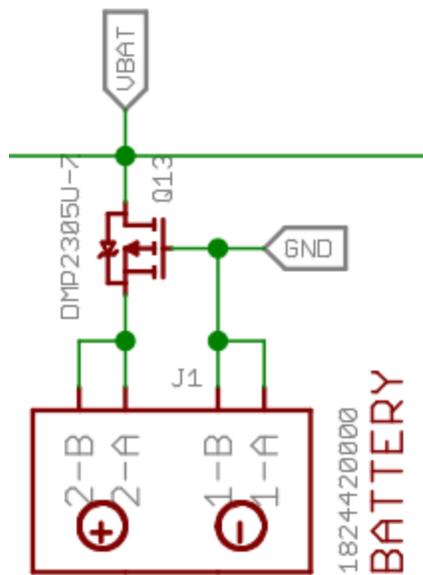


Figure 2.8. Circuit de protection de court circuit

Dans le circuit en figure 2.8, Q13 est utilisé pour protéger le circuit d'un court circuit entre les pins du connecteur.

2.3.3.2 Circuit du régulateur de 3.3V

Un circuit de régulation 3.3V (figure 2.9) est utilisé pour alimenter le microcontrôleur et le module de communication.

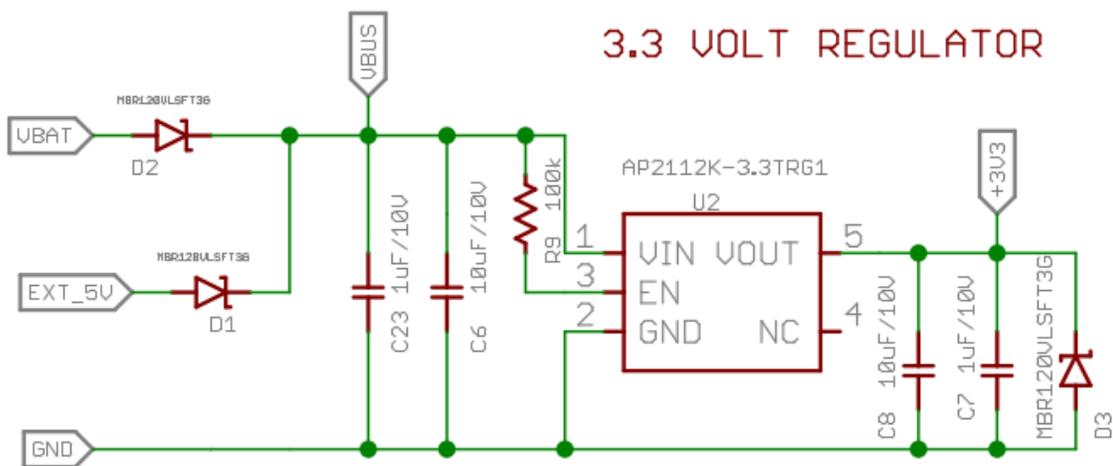


Figure 2.9. Circuit de régulation 3.3V

2.3.3.3 Circuit d'alimentation de l'actionneur

Une tension de 9V est nécessaire pour pouvoir actionner le solénoïde, ayant une tension de 3.7V ~ 4.2V de la batterie, nous avons utilisé un circuit boost basé sur le CI de TI: TPS 61088 _ 10-A Fully-Integrated Synchronous Boost Converter [99].

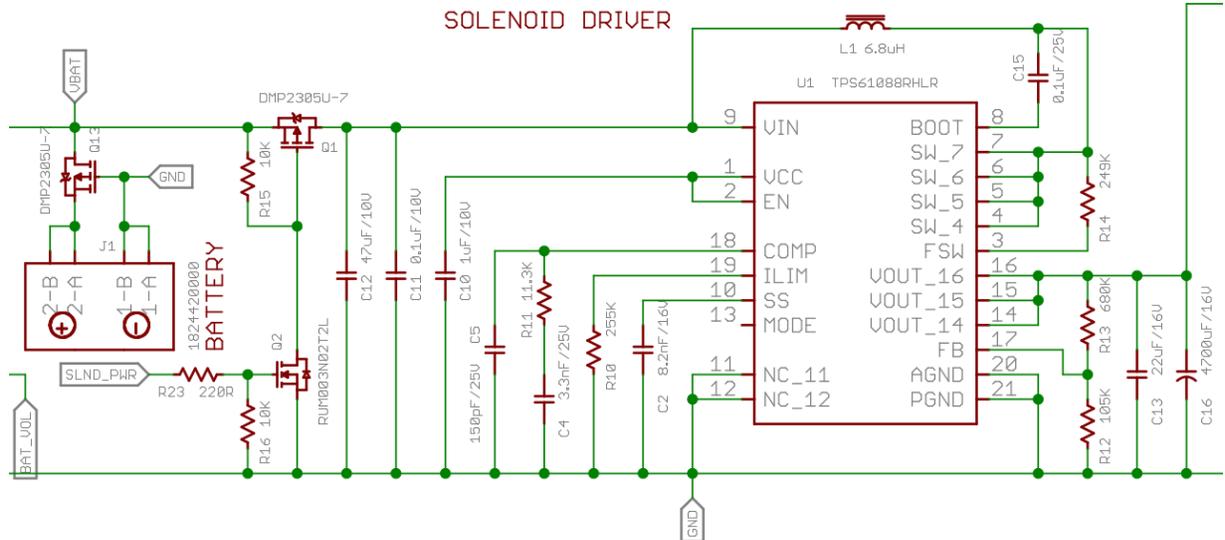


Figure 2.10. Circuit d'alimentation de l'actionneur

Dans la figure 2.10, Q1 et Q2 servent à isoler la batterie du circuit boost, la tension 9V n'étant pas toujours nécessaire, cette configuration servira donc à économiser l'énergie.

Choix des composants associé au CI:

On s'est basé sur le datasheet du CI dans cette partie, additionnellement, TI fournit un outil en ligne - WEBENCH - permettant d'adapter le circuit à base de tps 61088 à l'application désirée, simuler le circuit en question ainsi que d'autres fonctionnalités intéressantes comme l'affichage du coût des composants utilisé etc

2.3.4 Module capteur

Avec les avancées dans l'agriculture de précision, plusieurs capteurs commerciales existent sur le marché, les tableaux 6, 7 et 8 comparent quelques capteurs qui sont proposés:

Tableau 2.2. Comparaison entre différents capteurs en relation avec le sol

Capteur	Température	Humidité	diélectrique	Pluie	Eau	Conductivité	salinité	Référence
Hydra probe II soil sensor	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	www.stevenswater.com
Pogo portable soil sensor	✓	✓	✓	✓	-	✓	-	www.stevenswater.com
MP406 moisture sensor	✓	✓	✓	-	-	-	-	www.ictinternational.com.au
ECH2O soil moisture sensor	✓	✓	✓	-	✓	✓	-	www.ictinternational.com.au
EC sensor (EC250)	✓	✓	-	✓	-	✓	✓	www.stevenswater.com/catalog/products/water_quality_sensor/manual
ECRN-50 low-REC rain gauge	-	-	-	✓	-	-	-	www.decagon.com
ECRN-100 high-REC rain gauge	-	-	-	✓	-	-	-	www.decagon.com
Tipping bucket rain gage	-	-	-	✓	-	-	-	www.stevenswater.com
107-L temperature Sensor(BetaTHem 100KSAIB Thermistor)	✓	-	-	-	-	-	-	www.campbellsci.com/107

Tableau 2.3. Comparaison de différents capteurs relatifs aux plantes/feuille

Capteur	feuille/ plante						Référence
	photosynthèse	Humidité	Hydrogen	Eau	CO ₂	Température	
237: capteur de d'humidité des feuilles de plante	-	✓	-	✓	-	✓	www.campbellsci.com
LW100 humidité des feuilles	-	✓	-	✓	-	✓	www.globalw.com
SenseH2 capteur d'hydrogen	-	-	✓	✓	✓	✓	www.NTMSSENSOR.com
Capteur d'humidité des feuille	-	✓	-	-	-	-	www.decagon.com
YSI 6025 capteur de chlorophyll	✓	-	-	-	-	-	www.ysi.com
Field scout CM1000TM	✓	-	-	-	-	-	www.specmeters.com
TT4 multi-sensor thermocouple	-	✓	-	-	-	✓	www.ictinternational.com
LT-2M(leaf temperature sensor)	-	-	-	-	-	✓	www.solfranc.com
TPS-2 portable photosynthesis	✓	✓	-	✓	✓	✓	www.ppsystems.com
PTM48-A photosyntese monitor	✓	✓	-	✓	✓	✓	www.phyotosensor.com
CI-340 hand-held photosyntese	✓	✓	✓	✓	✓	✓	www.solfranc.com
107-L temperature Sensor(BetaTHem 100KSAIB Thermistor)	✓	-	-	-	-	-	www.campbellsci.com/107

Tableau 2.4. Comparaison de différents capteurs relatifs à l'environnement

Capteur	Température	Humidité	pression atmosphérique	vitesse du vent	direction du vent	Référence
CM-100 compact weather sensor	✓	✓	✓	✓	✓	www.steveswater.com
Met station one (MSO)	✓	✓	✓	✓	✓	www.steveswater.com
XFAM-115KPASR	✓	✓	✓	-	-	www.pwatron.com
HMP45C (Visal's HUMCAP8 H-chip)	✓	✓	✓	-	-	www.campbellsci.com
SH71(humidity and temperature sensor)	✓	✓	✓	-	-	www.sensnon.com/humidity
SH75(humidity and temperature sensor)	✓	✓	✓	-	-	www.sensnon.com/humidity
CI-340 hand-held photosynthesis	✓	✓	✓	-	-	www.solfrac.com
107-L temerature Sensor (BetaTherm 100KSA1B)	✓	✓	-	-	-	www.campbellsci.com

2.3.5 Module actionneur

2.3.5.1 Actionneur utilisé

L'actionneur utilisé pour ce système est le solénoïde à verrouillage à 2 voies de IrriRich (figure 2.11) (www.irrichvalve.com), conçu par YAOFENG Company, qui est utilisé pour contrôler l'ouverture et la fermeture des différentes vannes d'eau d'irrigation à faible débit. Lorsqu'il est assemblé avec le contrôleur d'irrigation, il permet le contrôle automatique du système d'adduction d'eau avec synchronisation et rationnement. L'opérateur à deux fils est constitué d'une bobine avec sortie de deux fils. Les pièces métalliques sont en acier inoxydable passivé pour une protection maximale contre la corrosion.

Spécification:

- Voltage: 4~9VDC, 6~40VDC,9-30VDC (requiert l'utilisation d'une capacité de stockage de 4700 µF)
- Classe d'isolation: 500V / min.
- Test de pression: 0-10 BAR, une minute, pas de fuite
- Connexion de base: 3/4 "20 UNEF fileté
- Protection: IP66

- Largeur d'impulsion: 20ms-100ms
- Matériel:
 - Logement: métal revêtu
 - Piston et pôle: Fer inox passivé
 - Joint en caoutchouc: NBR ou EPDM

- Encapsulation: Époxy



Figure 2.11. Solénoïde à verrouillage à 2 voies de IrriRich

Application avec une valve d'irrigation:



Figure 2.12. Solénoïde à verrouillage à 2 voies de IrriRich utilisé avec une valve d'irrigation

2.3.5.2 Circuit de control

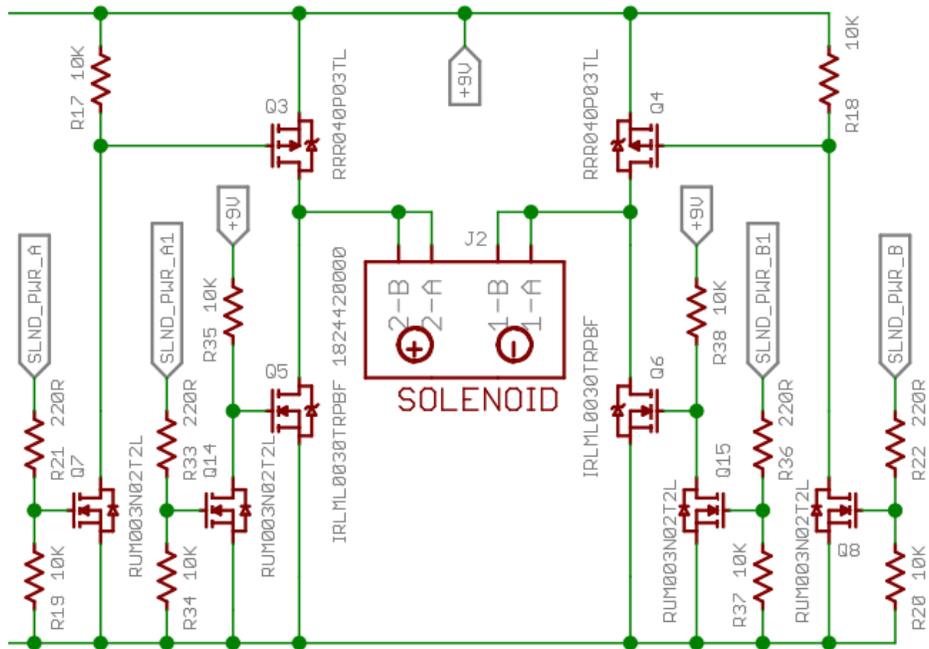


Figure 2.13. Circuit de contrôle de l'actionneur

Le contrôle du solenoid est fait avec les pins SLND_PWR_A, SLND_PWR_A1, SLND_PWR_B et SLND_PWR_B1 qui sont branchés aux pins I/O du microcontrôleur (figure 2.3).

- Mise en marche:

Pour mettre la valve en position ouverte, il suffit d'alimenter le solenoid avec une impulsion positive de 100 ms (variable de 20~100 ms selon le datasheet).

Ce qui équivaut à mettre le pin2 de J2 à 9V et le pin 1 à GND pendant 100 ms, pour le faire en active le module servant à contrôler le solenoid en mettant SLND_PWR à haut, on attend 1s (qui peut être optimisée par la suite pour économiser l'énergie), le temps de la stabilisation de la sortie.

Pour mettre le pin 1 à GND, on met SLND_PWR_B et SLND_PWR_B1 à bas:

SLND_PWR_B à bas, désactivera Q8, qui causera la désactivation de Q4.

SLND_PWR_B1 à bas, désactivera Q15, ce qui activerait Q6 connectant le pin1 à GND.

Pour mettre le pin 2 à 9V, on met SLND_PWR_A1 à haut, activant Q14 et en conséquence désactivant Q5, on attend 50 ns (tenant compte de la réponse des MOSFET, pour qu'il n'y ait pas de court circuit)

On met par la suite SLND_PWR_A activant Q7, ce qui activerait Q3 à cause de la chute de tension dans R17.

Après 100 ms, on coupe l'alimentation du module, en mettant SLND_PWR à bas, et on remet toutes les pins au niveau bas.

- Mise en arrêt:

Pour mettre la valve en position en position fermée, il suffit d'alimenter le solenoid comme pour la mise en marche avec une polarisation inversée, c'est à dire en inversant les pins de J2. (il est à noter que le circuit de contrôle est symétrique).

2.4 Réalisation et test du nœud

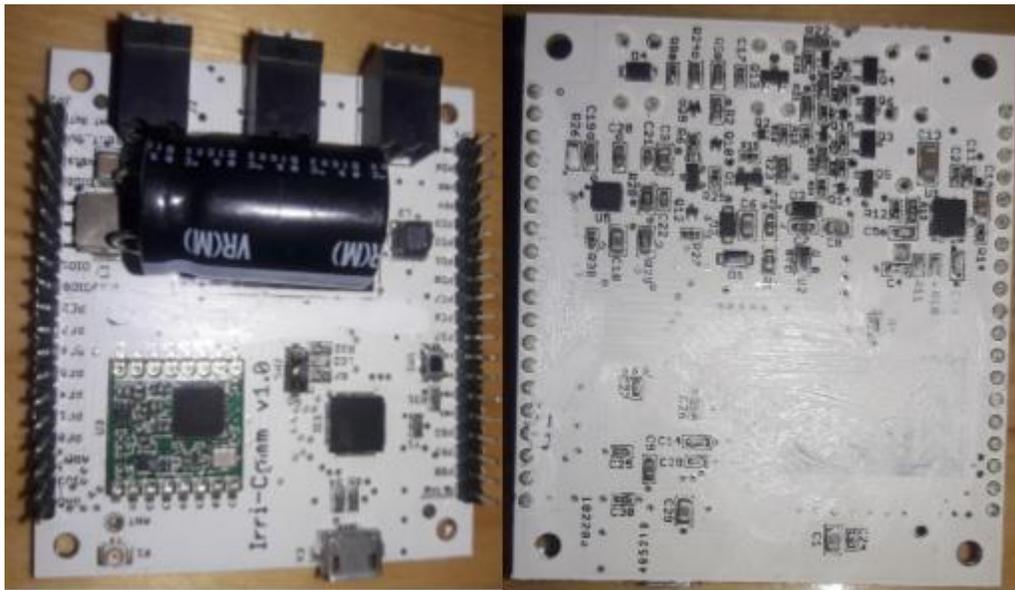


Figure 2.14. La carte réalisée

La programmation du nœud était faite en utilisant la librairie arduino.h et les librairies open source développés pour le RFM9xW, ce qui est intéressant à propos de cette famille de modules, c'est qu'ils sont interchangeables, ce qui signifie que l'on peut choisir le module qui est conforme à la bande de fréquence ISM libre license de la région de déploiement, sans avoir à changer le code ou le circuit.

Le test de la carte réalisée a été fait à l'aide d'une Raspberry Pi 3 et un module radio du même type, RFM 95w, la carte étant placé dans une boîte hermétique (figure 2.15).



Figure 2.15. Image du nœud en fonctionnement

Une vidéo du module en fonctionnement est disponible sur le lien en [100].

Une simple interface web a été développée permettant le test et le contrôle des différents modules.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la conception et la réalisation d'un nœud faisant partie d'un système d'irrigation sans fil. Il permet la gestion centralisée des différentes unités, avec pour objectif de faciliter le contrôle d'irrigation et la planification des actions sur de cette dernière. La finalité est de permettre la gestion de l'irrigation par parcelle en adaptant l'irrigation de la surface à l'hétérogénéité du sol.

Le choix de l'actionneur est conforme aux méthodes d'irrigations recommandées pour un usage économique de l'eau (irrigation goutte à goutte et l'irrigation par aspersion).

Dans le chapitre suivant, nous aborderons le module d'agrégation de données qui peut être utilisé comme lien entre les réseaux de capteurs et actionneurs sans fil et les applications exploitant les données et les rétroactions qui en découlent.

CHAPITRE 3

CHAPITRE 3 Plateforme d'agrégation de données

3.1 Introduction

Une des exigences de ce projet est d'utiliser la plateforme Sentilo comme plateforme d'agrégation de données. Elle constitue un lien entre les réseaux de capteurs et actionneurs sans fil et les applications (figure 1.5).

Sentilo est une plateforme destinée à isoler et à communiquer avec les applications développées pour exploiter les informations générées à partir du sol par la couche de capteurs déployés afin de collecter et de diffuser ces informations.

Ce chapitre donne un aperçu de Sentilo et présente une étude de l'interface du réseau de capteurs et actionneurs sans fil avec la plateforme PubSub de Sentilo.

3.2 Définitions

- **Provider:** un compte Sentilo sur le serveur. Il stocke les données publiées et les envoie à ses abonnés.
- **Travailleur (*worker*):** un *thread* dans le serveur qui exécute une tâche programmée.
- **Redis:** est un système de gestion de base de données clé-valeur scalable, il conserve l'intégralité des données en RAM.
- **MangoDB:** MongoDB est un système de gestion de base de données orientées documents. Il permet de manipuler des objets structurés au format BSON (JSON binaire), sans schéma prédéterminé.
- **OpenTSDB:** est un système de gestion de base de données orientée séries temporelles distribué et haute performances.

3.3 Architecture de Sentilo

Sentilo est composé de trois parties distinctes (figure 3.1):

- Serveur Pub/Sub.
- Application Catalog Web
- Agents (extensions qui étendent les fonctionnalités de la plateforme).

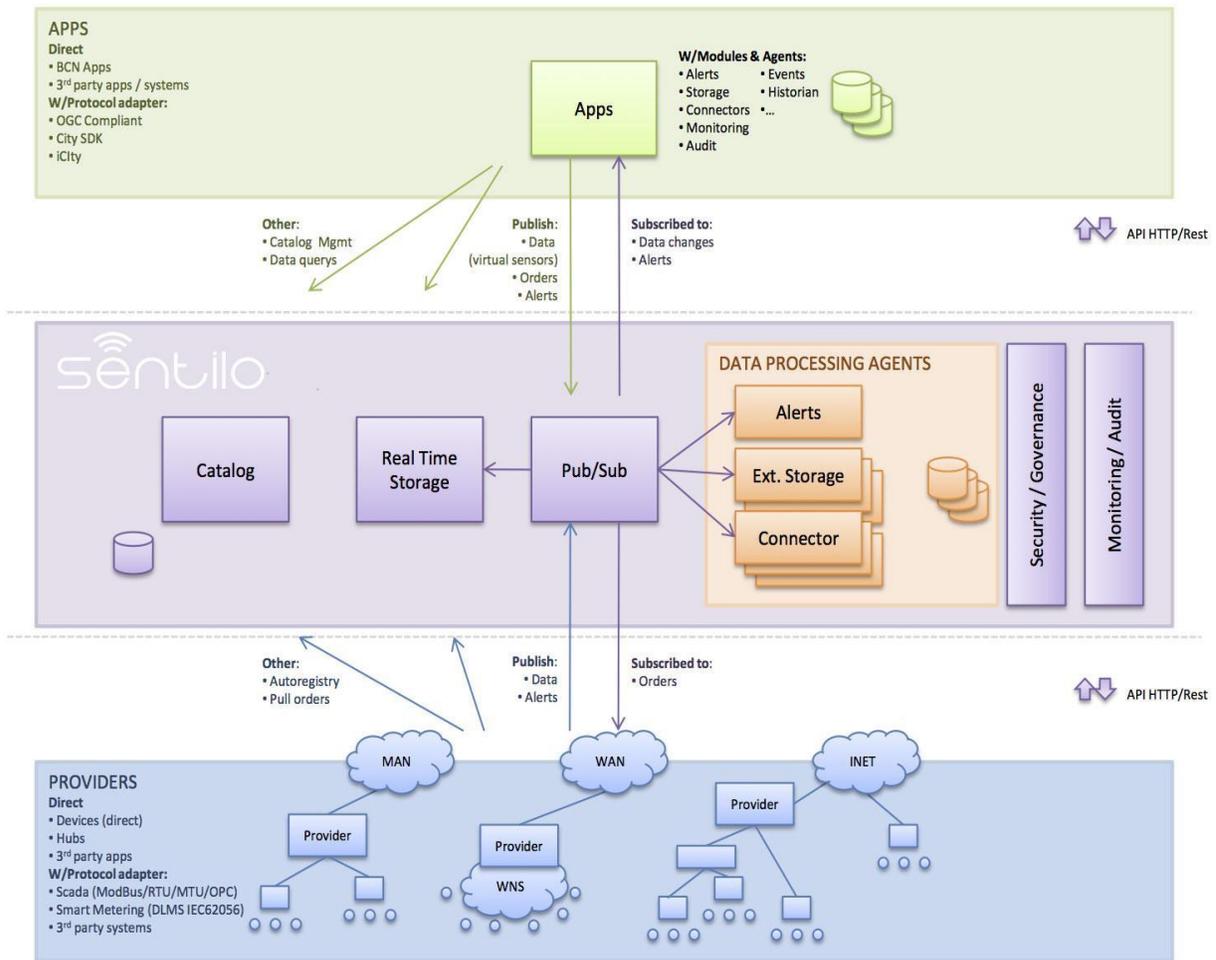


Figure 3.1. Architecture de Sentilo

3.3.1 Serveur Pub/SUB

Le serveur Pub/Sub est le coeur de la plateforme, il fournit une plateforme permettant aux applications qui utilise le système, de publier et de récupérer des données de la plateforme, et de s'inscrire sur la plateforme pour recevoir les *events*. Ce module est un processus java autonome, qui utilise Redis pour le mécanisme Pub/Sub.

Le design du serveur Pub/Sub est séparé en deux couches: couche transport et couche de service.

➤ Couche de transport (*Transport Layer*):

Cette couche est conçue suivant le *thread pool pattern* et implémenté en utilisant la librairie HttpCore

La couche de transport gère les requêtes entrantes (publication de données, récupération de données, demande d'inscription), et ensuite il génère une liste d'attente (*task queue*) contenant les informations des requêtes.

Par la suite un nombre limités de travailleurs (*threads*) est dédié au traitement des requêtes.

Quand un client envoie une requête HTTP à la plateforme: (figure 3.2)

1. Le client envoie une requête HTTP
2. Le serveur accepte la requête et la met en file d'attente
3. Quand un travailleur est disponible, on associe une tâche en attente à ce travailleur (la tâche sera retirée de la liste)
 - a. Il délègue la tâche à un élément de la couche de service.
 - b. Il construit une réponse HTTP de l'information reçue.
4. Il envoie la réponse de la requête au client.

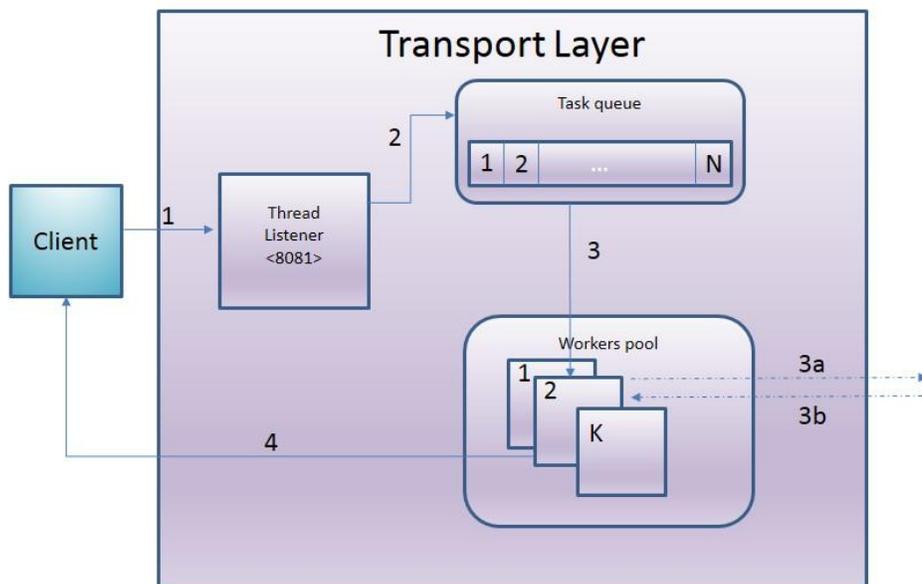


Figure 3.2. Couche de transport du serveur PubSub de Sentilo

➤ Couche de service (*Service Layer*):

La couche de service de Sentilo gère et traite les informations des travailleurs, elle enregistre la donnée ou la remet en fonction de la requête.

Le fonctionnement de la couche de service suit la procédure suivante (figure 3.3):

1. Le travailleur délègue la requête au *handler* associé en fonction du type de requête.
2. Les validations suivantes sont effectuées pour chaque requête.
 - a. Intégrité des informations d'identification: vérifie la clé reçue dans l'entête (*header*) en utilisant une base de donnée interne contenant toutes les informations d'identification actives du système.

- b. Autorisation pour exécuter la demande: valider que l'action demandée peut être effectuée conformément à la base de données des autorisations.
3. Stock la donnée dans Redis, et en fonction du type de donnée:
 - a. Il publie cette donnée à travers le mécanisme de publication.
 - b. Il enregistre l'abonnement dans *ListenerMessageContainer* (liste de tous les abonnés) et dans Redis en tant qu'abonné.
4. Si une nouvelle donnée est reçue, Redis publie cette donnée aux abonnés, autrement cette étape est ignorée.
5. Le conteneur (*container*) notifie l'événement à chaque abonné qui lui est associé en leur envoyant une requête HTTP.

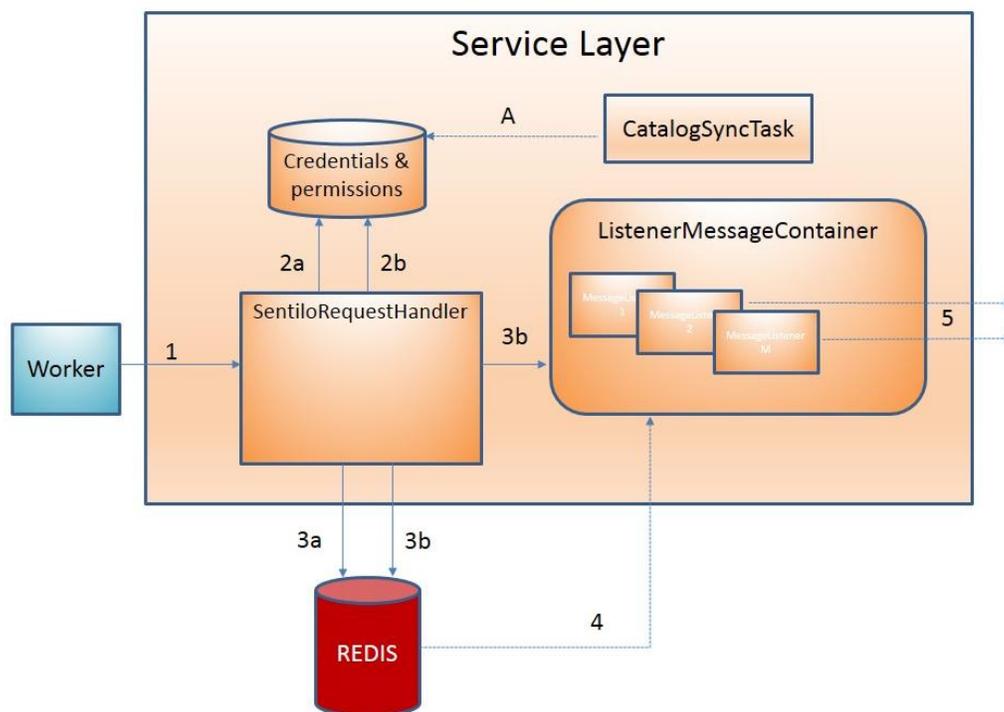


Figure 3.3. Couche de service du serveur PubSub de Sentilo

3.3.2 Application Catalog Web

L'application catalog web est une application web qui utilise MongoDB comme base de donnée de stockage.

Elle est composée de deux parties:

- Une console publique pour l'affichage des données publiques.
- Une partie sécurisée pour l'administration des ressources.

Elle est complètement intégrée avec la plateforme Pub/Sub pour la synchronisation des données:

- Authentification et permission des données.

- Enregistrement des données statistiques et les dernières données reçues pour les afficher dans différents graphs dans l'interface web.

3.3.3 Agents

Les agents sont des extensions pour Sentilo, ils servent à ajouter des fonctionnalités au noyau de l'application.

Les agents utilisent le mécanisme d'abonnement sur le serveur PubSub, quand Sentilo reçoit une publication de données, il envoie un message à tous les abonnés, incluant les agents.

Sentilo est fourni avec plusieurs agents:

- Agent de base de données relationnelle
 - Utilisé pour exporter les données historiques vers une base de données relationnelle.
- Agent d'alertes
 - utilisé pour traiter chaque donnée reçue par la plateforme et la valider avec les règles de gestion configurées dans le catalogue
- Agent moniteur d'activités
 - Utilisé pour remonter les événements vers ElasticSearch.
- Agent historien
 - Utilisé pour remonter les événements vers OpenTSDB

3.4 API Rest de Sentilo

Le mécanisme de communication Publication/Souscription entre le client et la plateforme est réalisé au biais de l'API Rest de Sentilo.

Les services offerts par l'API de Sentilo peuvent être classifiés en cinq groupes principaux :

- *Data*: permet des opérations de publication, acquisition, et suppression de données.
- *Ordre*: permet des opérations de publication, acquisition et suppression des ordres.
- *Alarme*: permet des opérations de publication, acquisition et suppression des alarmes.
- *Subscription*: permet des opérations de publication, acquisition et annulation des abonnements
- *Catalog*: permet les opérations d'insertion, mise à jour, requête et de suppression des ressources du catalogue (capteurs, composants et alertes).

Trois types d'abonnements sont possibles:

- à des données capteurs.
- à des commandes.
- à des alertes.

Plus d'informations concernant l'API REST de Sentilo sont disponibles sur [101].

3.5 Structure de Sentilo

La plateforme a cinq éléments principaux:

- Composant (*Component*): c'est l'élément auquel est attaché un groupe de capteurs
- Capteur (*Sensor*): est la représentation d'un capteur physique, il est attaché à un capteur spécifique.
- Alerte (*Alert*): est une alerte qui se déclenche lorsqu'un événement se produit, deux types d'alertes existe dans Sentilo:
 - Alerte interne: elle est liée à des capteurs spécifiques et sa logique est définie en utilisant des règles mathématiques basiques ou en configurant un temps d'inactivité.
 - Alerte externe: elle définie par une application tierce, et la déclencher lorsque les conditions de déclenchement sont vérifiées.
- Alarm (*Alarm*): est le message envoyé ou abonnés d'une alerte lorsqu'elle est déclenchée. Une alarme doit être attachée à une alerte.
- Commande (*Order*) est un message enregistré pour un capteur ou un composant spécifique. Il est reçu par les abonnés des commandes de capteurs ou de composants.

3.6 Interfaçage avec Sentilo

L'interfaçage avec Sentilo dans notre cas consiste à rajouter un provider de l'interface web de Sentilo, et les capteurs et actionneurs et leurs *component* associés à l'aide de l'API REST de Sentilo ou à partir de l'interface web de Sentilo.

L'envoi des données et la récupération des commandes se fait via l'API REST de Sentilo.

3.6.1 Ajouter un provider

La première étape pour interfacier le système développé dans les chapitres précédents avec Sentilo est de créer un provider, ceci nous permettra de rajouter un *components* et ces capteurs associés, de publier des données et de récupérer les commandes.

La création du provider se fait uniquement à travers l'interface web (figure 3.4)

The screenshot shows the 'New provider' form in the Sentoilo web interface. The left sidebar contains a navigation menu with 'Providers' selected. The main content area has the following fields and options:

- Identifier:
- Name:
- Description:
- HTTPS API REST:
- Contact info section with:
 - Contact name:
 - Contact email:
- Buttons: 'Back' and 'Save'

Figure 3.4. Interface pour ajouter un provider

The screenshot shows the 'App ariculture de precision' provider details page. The ID 'agriculture' is highlighted in blue. The 'Data' section shows the 'Authorization Token' as '050dc4952cef8e5010062822e85b19412d2d73bb9b2156295a779f4998de770c'. Other details include:

- Description: C'est le provider gérant la communication entre le réseau de capteur sans fil dédié à l'agriculture et Sentoilo
- HTTPS API REST:
- Creation date: 23/10/2018 19:01:46
- Updated date: 23/10/2018 19:01:46
- Contact name: agri
- Contact email: agri@tech.com

Buttons: 'Back' and 'Edit provider'

Figure 3.5. Interface montrant le provider créé

La figure 3.5 montre le provider créé, nous utiliserons l'ID (agriculture) et la clé (*Authorization Token*) pour rajouter des capteurs/composants, publier des données et s'abonner pour recevoir des commandes.

On configure le type de capteur que nous allons utiliser (pH_sol, humidite_sol, temperature_sol) et le type de composants (*gateway*) auquel sont liés les capteurs à partir de l'interface web (figure 3.6, figure 3.7).

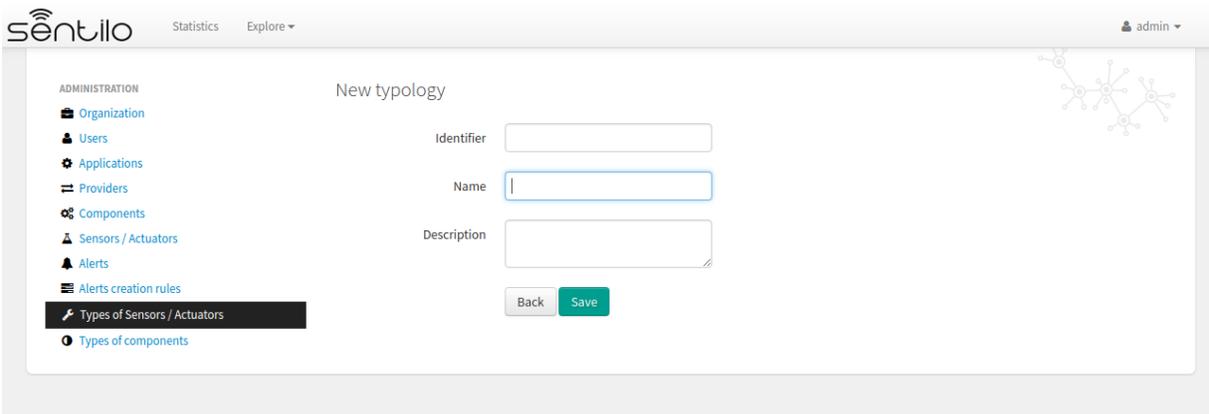


Figure 3.6. Interface de gestion de type de capteurs de d'actionneur

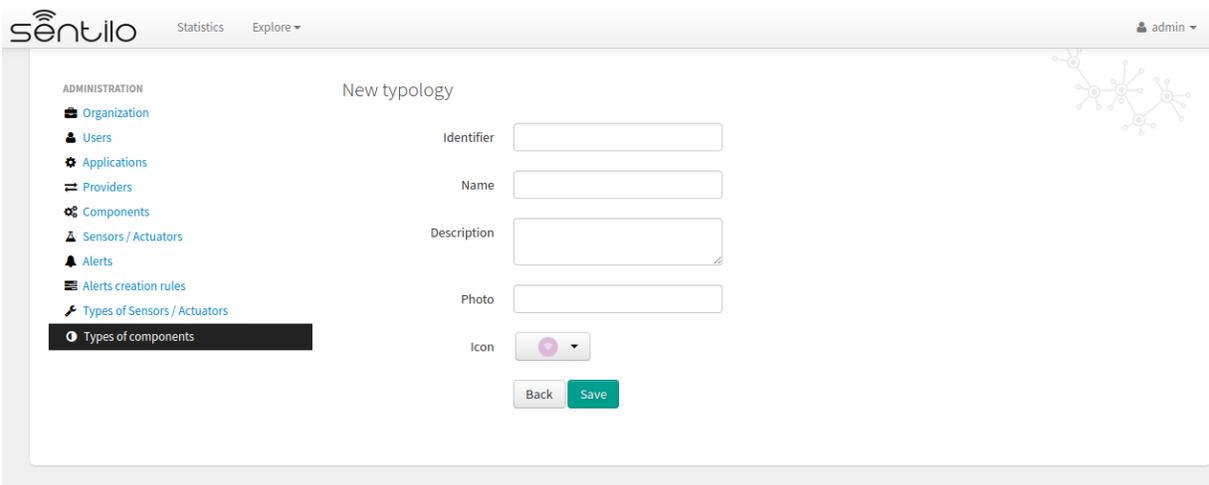


Figure 3.7. Interface de gestion de type de component

3.6.2 Ajouter les capteurs nécessaires

L'ajout des capteurs utilisés peut se faire avec l'API REST de Sentilo [103].

Exemple de requête d'ajout de capteurs:

URL	<code>http://<api_server.com>/data/agriculture</code>
Methode	POST
IDENTITY_KEY	<code>050dc4952cef8e5010062822e85b19412d2d73bb9b2156295a779f4998de770c</code>

Message envoyé:

```
{ "sensors": [
  { "sensor": "capteur_1",
    "Description": "capteur temperature sol",
    "type": "teperature_sol",
    "dataType": "number",
    "component": "CHAMP_1",
    "componentType": "gateway",
    "location": "36.723131 3.151187"
  },
  { "sensor": "capteur_2",
    "Description": "capteur temperature sol",
    "type": "teperature_sol",
    "dataType": "number",
    "component": "CHAMP_1",
    "componentType": "gateway",
    "location": "36.723131 3.151187"
  }
] }
```

3.6.3 Envoie de données

L'envoi de données peut se faire également avec l'API REST, nous donnant un exemple de requête d'envoi de données de plusieurs capteurs appartenants au même provider:

URL	http://<api_server.com>/catalog/agriculture
Methode	POST
IDENTITY_KEY	050dc4952cef8e5010062822e85b19412d2d73bb9b2156295a779f4998de770c

Message envoyé:

```
{ "sensors": [
  { "sensor": "capteur_1",
    "observations": [
      { "value": "30.1",
        "timestamp": "17/05/2018T12:34:45CET" },
      { "value": "29.2",
        "timestamp": "17/05/2018T10:34:45CET" }
    ]
  },
  { "sensor": "capteur_2",
    "observations": [
      { "value": "2.1",
        "timestamp": "17/05/2018T10:34:45CET" }
    ]
  }
] }
```

```

    {"value": "2.2",
     "timestamp": "16/05/2018T15:43:21CET"},
    {"value": "2.3",
     "timestamp": "16/05/2018T10:43:21CET"}
  ]
}
]]

```

Les données envoyées peuvent être perçues à partir de la plateforme (figure 3.8), ou récupérer via l'API REST si les permissions nécessaires sont données.

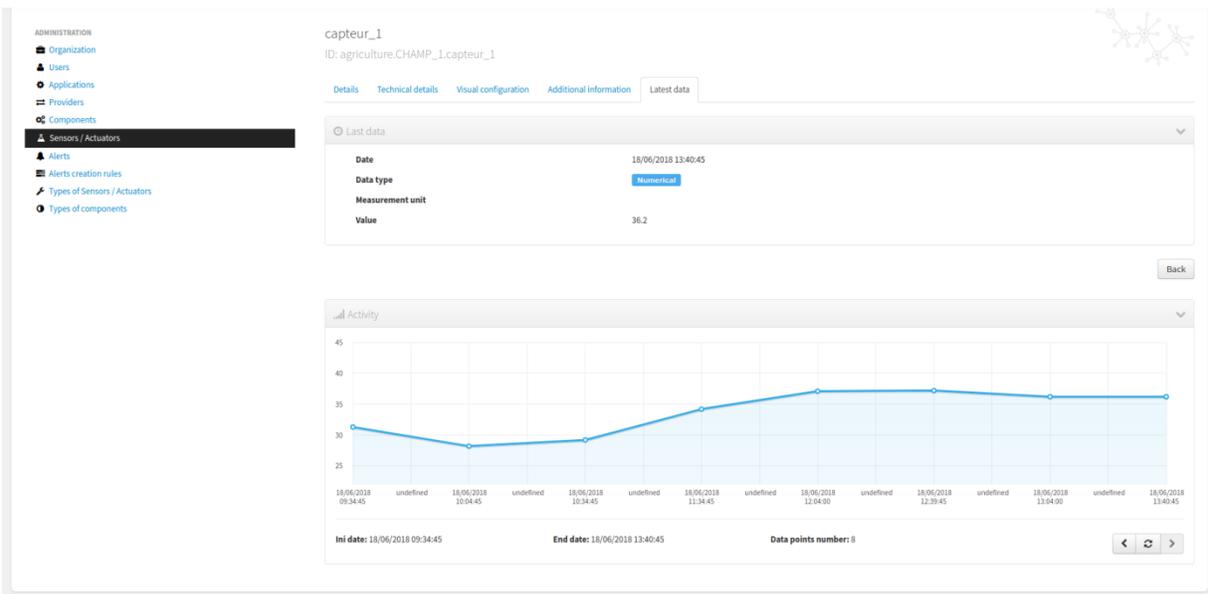


Figure 3.8. Visualisation de données temporelles d'un capteur de température simulé

Plus d'informations sur cette partie sont disponibles sur [104]

3.6.4 Réception des commandes pour les actionneurs

La réception de commandes pour les actionneurs est faite en utilisant le service commande (*order*) de l'API REST de Sentilo.

Le gateway pourrait lancer une requête pour récupérer les dernières commandes pour un seul actionneur ou pour tout les actionneurs qui lui sont associés. Les actionneurs sont définis comme des capteurs sur Sentilo. Plus d'informations sur cette partie sont disponibles sur [105].

Une autre possibilité pour récupérer les données c'est de s'abonner aux commandes liées à un capteur ou à un provider, en fournissant un *endpoint*, Sentilo utilisera cet URL pour envoyer une requête HTTP avec les données de la commande. Plus d'informations sont disponibles sur [105].

3.7 Conclusion

Ce chapitre a présenté une étude de Sentilo servant de lien entre les réseaux de capteurs et actionneurs sans fil et les applications exploitant ces données et générant les commandes en résultats et affichage pour l'utilisateur du système. La base de données Redis, utilisée pour la plateforme PubSub de Sentilo, est une base de données qui utilise principalement la RAM pour le stockage de données. Ce qui permet un fonctionnement rapide, cependant, il est nécessaire de stocker ses données dans une autre base de données pour un traitement future. Rappelons que Sentilo (dont l'utilisation était imposée dans ce projet) est une plateforme optimisée pour des utilisations dans le cadre d'une Smart City. Son utilisation dans le cadre de l'agriculture de précision offre peu d'avantages. (D'autres alternatives seront proposées dans la conclusion générale).

Nous aborderons dans le prochain chapitre une méthode de modélisation permettant d'interpoler les données des paramètres du sol ou de l'environnement local, pour avoir une information récente des conditions de l'environnement de la culture; ce qui donnerait à l'utilisateur des informations aidant sa prise de décision. Les mêmes données peuvent servir pour des fins d'automatisation, ou fournir des informations relatives à d'autres opérations agricoles comme l'application des fertilisants; l'objectifs étant d'optimiser l'utilisation des intrants et améliorer le rendement tout en réduisant l'implication du personnel.

CHAPITRE 4

CHAPITRE 4 Modèle continu des données du sol

4.1 Introduction

La production agricole suit de fortes tendances saisonnières liées au cycle de vie biologique des cultures. La production dépend ensuite des caractéristiques de la région (comme le type du sol par ex), ainsi que de nombreux facteurs déterminants de l'environnement et les caractéristiques du sol, toutes ces variables sont très variables dans le temps et l'espace, de plus, comme la productivité peut changer rapidement en raison de conditions de croissance défavorables, des systèmes de surveillance fournissant des données fréquentes sur les différents paramètres physiques de la région sont nécessaires pour permettre d'agir au moment opportun.

L'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (*Food and Agriculture Organization*, FAO) a souligné que réagir au moment opportun comme facteur majeur qui soutient les statistiques agricoles et les systèmes de surveillance associés, les informations perdent de leurs valeurs si elles deviennent disponibles trop tard [106].

L'utilisation de réseau de capteurs sans fils répond aux problèmes et besoins de l'agriculture cités précédemment. En effet, cette solution permet d'obtenir différents paramètres de la surface agricole d'intérêt à de courts intervalles réguliers.

En plus de vouloir surveiller les variations des différents paramètres physiques pouvant affecter la croissance de la culture, on cherche également à le faire de façon efficace, visant à utiliser un minimum de capteurs, ce qui réduirait le coût d'une telle solution et faciliterait son adoption dans les pays en voie de développement.

Plusieurs capteurs sont disponibles (Chapitre 2: tableau 3-5) pouvant fournir des données très précises, cependant, la construction d'un modèle continu à partir de ces données de capteurs discrètes à quantité limitée est un défi.

Le modèle requis doit donc être capable d'extrapoler des données du sol et de fournir des prévisions précises à des emplacements non-échantillonnés, tout en donnant une idée de l'incertitude concernant ces prédictions. Pour répondre à ces deux besoins nous suggérons l'utilisation d'une modélisation à base de processus gaussiens pour modéliser les différents paramètres physiques.

Dans ce chapitre, nous exposant la modélisation faite à l'aide de processus gaussiens, suivi d'un algorithme permettant d'améliorer la qualité du modèle en optimisant le positionnement des capteurs utilisés.

4.2 Modélisation de la surface d'intérêt et interpolation

4.2.1 Définitions

4.2.1.1.1 Processus Gaussien

Un processus gaussien est une collection de variables aléatoires qui ont une distribution jointe normale.

$$P(X = x) = \frac{1}{(2\pi)^{k/2} |\Sigma|} \exp\left(-\frac{1}{2}(x - \mu)^T \Sigma^{-1}(x - \mu)\right) \quad (1)$$

Avec $\mu_i = E(X_i)$ et $\Sigma_{i,j} = Cov(X_i, X_j) = k(X_i, X_j)$ avec Σ est une matrice positive semidefinite.

Un processus gaussien représente une distribution sur des fonctions, défini uniquement par sa fonction de moyenne et sa fonction de covariance appelée aussi kernel.

Le choix du kernel à un grand impact sur la suite de la modélisation, il représente le lien entre deux variable.

4.2.1.1.2 Stationnarité

Un kernel est dit stationnaire, si:

$k(x_i, x_j) = k(x_i - x_j)$, c'est à dire, que la covariance entre deux variable aléatoire est fonction seulement de leurs différence.

4.2.1.1.3 Isotropie

Un kernel est dit isotrope, si:

$k(x_i, x_j) = k(\|x_i - x_j\|)$, c'est à dire que la covariance entre deux variables est fonction de la distance euclidienne entre ces deux variables.

4.2.2 Modélisation

Dans notre cas nous cherchons à modéliser la fonction f , qui pour chaque $x \in R^2$ donne la valeur du paramètre physique (pH par exemple) en ce point.

Le choix du kernel représente l'hypothèse sur la structure des données, nous faisons l'hypothèse que les données du sol sont stationnaire isotrope, c'est à dire que la corrélation entre deux points est fonction de la distance euclidienne entre ces deux points.

Pour le choix du kernel, nous choisisant la fonction Matérn, considérée par Stein comme la plus importante des familles de covariance et obtient des résultats supérieure aux autres fonctions de covariances, telle que le kernel exponentiel ou le kernel gaussien, du fait de sa flexibilité.

Elle est considérée également comme un bon choix pour la modélisation des paramètres physiques.

Dans le cas isotrope, la fonction de covariance de Matérn s'exprime comme suit:

$$k_M(x, x') = \frac{\sigma^2}{\Gamma(\nu)2^{\nu-1}} \left(\frac{\sqrt{8\nu}}{l} |x - x'|\right)^\nu K_\nu\left(\frac{\sqrt{8\nu}}{l} |x - x'|\right) \quad (2)$$

Avec $x, x' \in R^d$ avec $d > 0$ est représenté la dimension de x

Γ la fonction gamma

K_ν est la fonction de Bessel modifiée de seconde espèce

σ^2 est la variance marginale

l est un paramètre de distance strictement positif

ν représente le paramètre de lissage, k_M est $2 \operatorname{int}(\nu)$ différentiable à 0, avec int est la partie entière, donc on a plus ν est grand le modèle est lisse.

En pratique, $\nu = \{3/2, 5/2\}$

Nous choisissons $\nu = 5/2$ qui est un choix commun pour la modélisation des paramètres physiques.

L'expression de la covariance dans ce cas est:

$$k_M(x, x') = \sigma_f^2 \left(1 + \frac{\sqrt{5}|x - x'|}{l} + \frac{5|x - x'|^2}{3l^2}\right) \exp\left(-\frac{\sqrt{5}|x - x'|}{l}\right) \quad (3)$$

- Choix du modèle

Comme il a été décrit précédemment, un processus gaussien donne un modèle sur un ensemble de fonction avec pour moyenne, choix du modèle est équivalent à l'apprentissage des hyperparamètres de la fonction de covariance

Les hyperparamètres concernées dans notre cas sont $\theta = \{l, \sigma_f, \sigma_n\}$ le problème devient donc un problème de maximisation de la fonction log de vraisemblance marginale:

$$\log(\mathbf{y}|\mathbf{X}, \theta) = -\frac{1}{2} \mathbf{y}^T \mathbf{K}_y^{-1} \mathbf{y} - \frac{1}{2} \log |\mathbf{K}_y| - \frac{n}{2} \log(2\pi) \quad (4)$$

Où \mathbf{X} est un vecteur de n entrées, qui sont les coordonnées des points échantillonnés de la surface d'intérêt, et \mathbf{y} les valeurs échantillonnées, $y = f(X) + \epsilon$ avec $\epsilon \sim N(0, \sigma_n^2)$

Soit $K(X, X)$ la matrice de covariance $n \times n$ formée en prenant $K_{i,j} = (X_i, X_j)$.

On définit donc $K_y = K(X, X) + \sigma_n^2 I$, avec I est la matrice identité $n \times n$.

Maximiser cette vraisemblance des valeurs échantillonnées, donnerait les meilleures valeurs pour les hyperparamètres pour le kernel choisis.

Plusieurs algorithmes existent pour la maximisation de cette fonction [108-110].

4.2.3 Application du modèle

Le modèle sélectionné à base de données échantillonnées, est utilisé pour prédire la valeur de la fonction f pour des x^* ou f n'était pas échantillonnée

$$\bar{f}_* = k_*^T K_y^{-1} \mathbf{z} \quad (5)$$

$$V[f_*] = k(x_*, x_*) - k_*^T K_y^{-1} k_* \quad (6)$$

k_* est le vecteur de covariance entre x_* et les entrées d'entraînement

$$K_y = k(\mathbf{X}, \mathbf{X}) + \sigma_n^2 \mathbf{I}, \sigma_n \text{ représente le terme du bruit.}$$

En utilisant (5), on peut prédire la valeur du paramètre physique en question sur toute la surface d'intérêt, (6) nous donne un niveau d'incertitude sur cette prédiction.

4.3 Optimisation des emplacements des capteurs

Vu qu'on est souvent limité par le nombre de capteur qu'on peut déployé, on cherche à mieux placer ces capteur sur la surface d'intérêt, on cherche donc les k meilleurs endroits pour les capteur du sous-ensemble fini V représentant les endroits possibles, qui est une discrétisation en grille de la surface d'intérêt.

Il existe beaucoup de travaux en relation avec l'emplacement des capteurs et la sélection des observations avec pour objectif d'améliorer la couverture et la prédiction. En générale, les différentes méthodes définissent une fonction objectif et ensuite appliquent des méthodes numériques pour maximiser cette fonction. Les différents travaux existants sont exposés dans [107] dans la section 7.

Les données relatives aux variance des prédictions, donc l'incertitude liée à cette prédiction sur toute la surface d'intérêt, permettent l'utilisation d'algorithmes pour modifier l'emplacement des capteurs, cette optimisation des emplacements des capteurs a pour objectif d'améliorer la qualité du modèle.

Nous optons pour la technique proposée dans [107]. L'algorithme proposé vise à placer les capteurs de sorte à réduire l'incertitude sur toute la surface d'intérêt.

V représente le sous-ensemble fini de tout les points de la surface d'une discrétisation en R^2 de la surface d'intérêt, pour lesquels on a calculé la moyenne et la variance dans la partie précédente.

S est un sous-ensemble de V , représentant les points ou on peut placer des capteurs.

$$U = V \setminus S.$$

$A \subseteq \text{Stel}$ que $|A| = k$, représente les coordonnées des k capteurs

L'algorithme de sélection des k coordonnées optimales pour les emplacements des capteurs est le suivant:

Input: Matrice de covariance Σ_{vv} , k , V

Output: A

Begin

$A \leftarrow \{\}$;

For $j = 1$ to k do

For $x \in S \setminus A$ do $\delta_x \leftarrow \frac{\sigma_x^2 - \Sigma_{xA} \Sigma_{AA}^{-1} \Sigma_{Ax}}{\sigma_x^2 - \Sigma_{x\bar{A}} \Sigma_{\bar{A}\bar{A}}^{-1} \Sigma_{Ax}}$

$x_* \leftarrow \operatorname{argmax}_{x \in S \setminus A} \delta_x$;

$A \leftarrow A \cup x_*$;

L'algorithme utilisé vise à maximiser la quantité suivante à chaque itération:

$H(x|A) - H(x|\bar{A})$ qui est équivalent à maximiser:

$I(A \cup \{x\}) - I(A)$, $I(\cdot)$ étant l'information mutuelle.

4.4 Implémentation

Pour l'implémentation des modèles à processus gaussien, plusieurs *packages* sont disponibles, comme PyMC3, scikit-learn ou gflow pour python. Comme on peut implémenter les fonctions nécessaires sans avoir recours aux bibliothèques disponibles.

Dans notre cas nous avons opté pour l'utilisation de scikit-learn. Ce kit offre des classes facilitant l'implémentation d'un modèle gaussien, que nous expliquerons dans ce qui suit et nous donnons les différents résultats (hyper-paramètres résultants, valeur maximale du log marginal de vraisemblance)

Données utilisées:

N'ayant pas pu installer les capteurs sur le champ dans le cadre de notre projet, nous avons opté pour la validation de notre méthodologie en utilisant des données disponibles en ligne.

Les données utilisées sont fournies par le département des sciences des cultures et des sols, université de Washington [111]. Elle sont obtenues à partir d'un réseau de 42 capteurs sur sol, qui recueillent des données volumétriques d'eau et la température du sol à différentes profondeurs (30cm, 60cm, 90cm et 120cm).

Dans nos tests nous avons utilisé les données de température du sol à 30 cm de profondeur du 11 septembre 2013, où les données de 38 capteurs sont disponibles. Leurs positions relatives est montrées dans la figure 4.1.

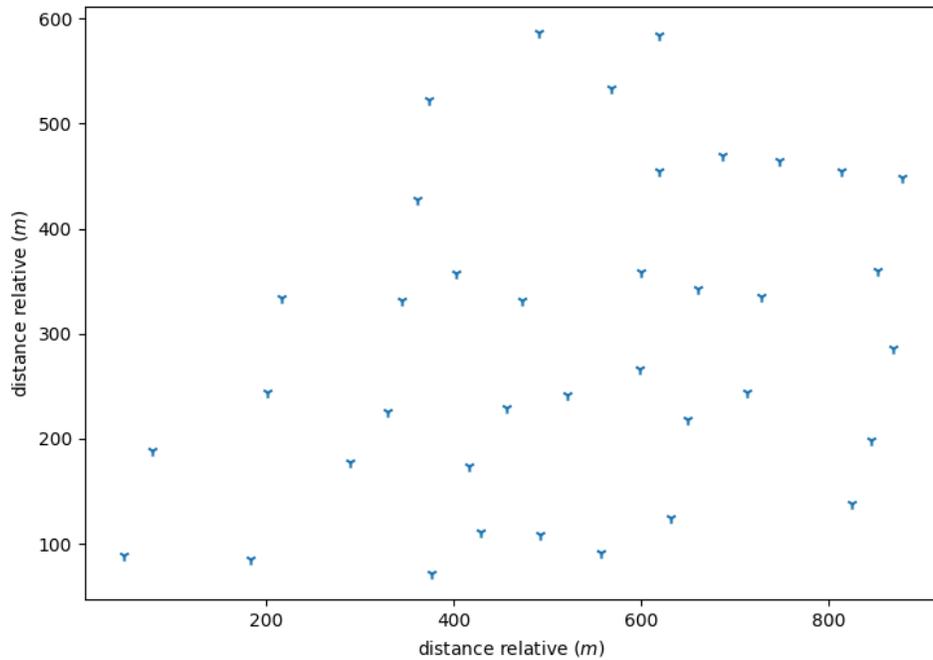


Figure 4.1. Emplacement des capteurs

Tout d'abord, nous devons définir le kernel utilisé, nous utilisons le kernel de Matérn et nous supposons que les capteurs utilisés sont précis.

La sélection du modèle nous donne:

$\sigma_f = 1.09$ et $l = 68.9$ donnant un log de vraisemblance marginale: -52.15715

L'algorithme utilisé pour la maximisation de la fonction du log marginale de vraisemblance est l'algorithme L-BFGS [112,113].

La moyenne étant prise constante et égale à la moyenne des données d'entraînement.

Nous interpolons à l'aide de ce modèle les données sur toute la surface considérée, et nous obtenons la figure 4.2.

La figure 4.2 montre une distribution continue de température sur toute la surface. Ce qui illustre la puissance de la modélisation à base de processus gaussiens. Elle permet à partir d'un nombre limité de capteurs de faire une prédiction sur le reste de la surface avec une certaine incertitude sur ces prédictions.

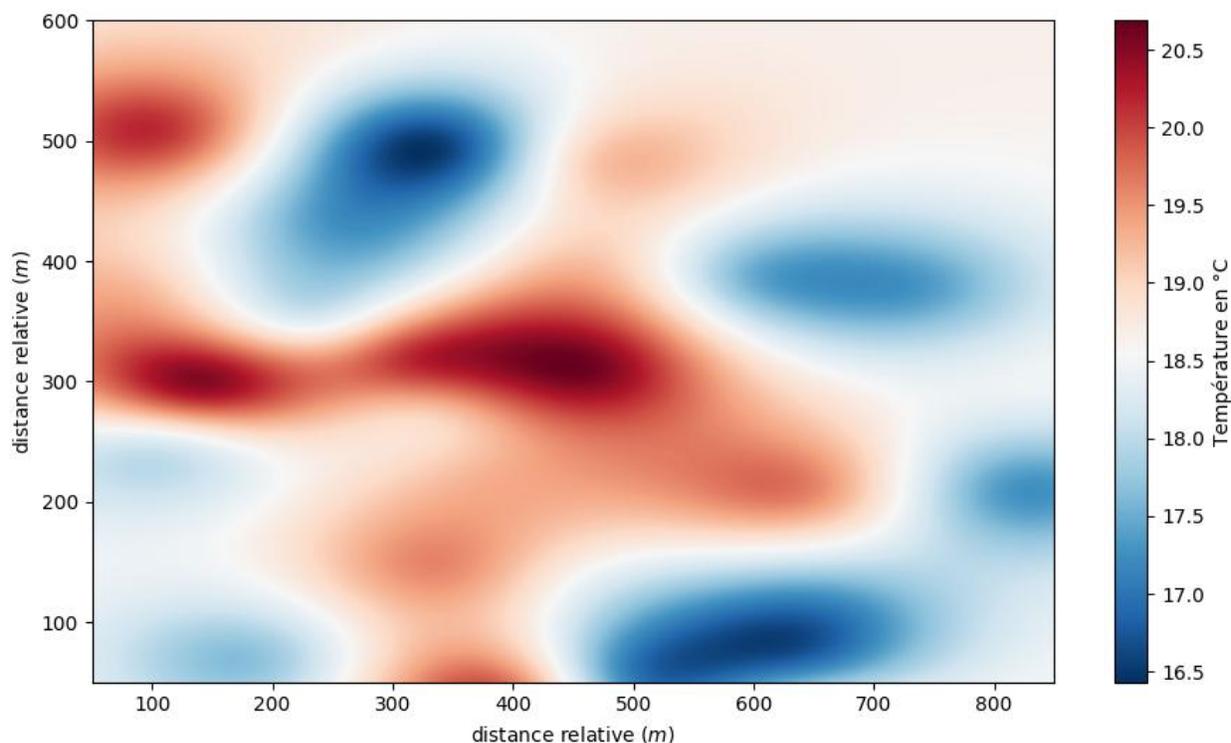


Figure 4.2. Distribution de la température sur la surface d'intérêt

Nous avons évalué la performance de notre modèle, en calculant l'erreur quadratique moyenne sur l'évaluation de la lecture d'un des capteurs en utilisant les autres capteurs pour la sélection du modèle. Nous répétons cette opération pour tous les capteurs utilisés, et nous obtenons $\sim 0.9^{\circ}\text{C}$

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons abordé la modélisation de la structure des données recueillies à base de processus gaussiens. Cette modélisation permet l'interpolation des données échantillonnées sur toute la surface avec une incertitude sur les données prédites. Ensuite nous avons donné un algorithme permettant d'optimiser l'emplacement des capteurs, à base de l'incertitude des prédictions du premier modèle. Cette optimisation permettrait d'obtenir un modèle de meilleure qualité, et d'utiliser au mieux les capteurs qui sont souvent limités en nombre dans la pratique.

Conclusion Générale

Les récents développements technologiques ont permis le développement de plusieurs industries. Ainsi l'agriculture est de plus en plus touchée par les innovations technologiques. Notre travail s'insère dans cette perspective. De ce fait nous proposons un système à base de réseau de capteurs et actionneurs sans fil dédié à l'agriculture de précision.

Dans le premier chapitre, nous donnons un aperçu général de l'agriculture de précision, en donnant différents exemples d'applications récentes dans ce domaine. Le chapitre se termine avec un modèle de système dédié à l'agriculture de précision dont les blocs constitutifs sont abordés dans le reste du mémoire.

Le deuxième chapitre traite la partie réseau de capteurs et actionneurs sans fil. Le système développé permet, dans le cas de notre étude, le contrôle des vannes de façon programmable ainsi que la récupération des données du sol. Des considérations liées à la basse consommation d'énergie, telles le choix du protocole de communication, ont été prises en charge. Le résultat obtenu est une base pour une version plus élaborée.

Le troisième chapitre traite la plateforme d'agrégation de données qui est l'interface directe avec les réseaux de capteurs pour acheminer les commandes et les données. La plateforme Sentilo a été choisie. Celle ci utilise Redis comme serveur publish/subscribe. Les fonctionnalités requises pour notre système ont été démontrées et testées.

Il s'ensuit la modélisation de la structure de données de paramètres physiques de la surface d'intérêt avec pour objectif l'inférence des données sur les parties non-échantillonnées de la surface, permettant un meilleur usage des capteurs disponibles, souvent limités en nombre. Les tests réalisés ont montré que la méthodologie employée est prometteuse.

Ce travail est un pas vers la réalisation d'une plateforme d'aide à la décision dans le domaine agricole.

Néanmoins, ce travail peut être amélioré, nous présentons dans ce qui suit des perspectives intéressantes du présent travail:

- Une topologie hybride avec sélection aléatoire des nœuds intermédiaires.
- Sentilo étant optimisé pour des applications Smart City, avec peu d'avantages pour une application d'agriculture de précision. En alternative, utiliser Redis sans Sentilo, ou Apache Kafka, qui offre une meilleure persistance de données ainsi que la possibilité de faire le traitement du flux de données en temps réel.
- La modélisation proposée dans ce mémoire a offert de bon résultats, cependant, l'incorporation d'autres données, aussi appelées covariates telles que l'élévation du sol et l'image satellite, pourrait permettre d'obtenir un modèle multivariable plus représentatif.

BIBLIOGRAPHIE

1. Diamond, Jared. *Guns, Germs, and Steel: The Fates of Human Societies*. New York: Norton, 1999. Print.
2. Ocampo JA, 2014. Concise report on the world population situation in 2014. Dept. of Economic and Social Affairs Population Division. United Nations, NY.
3. N. Wang, N. Zhang, M. Wang, Wireless sensors in agriculture and food industry—recent development and future perspective, *Computers and Electronics in Agriculture* 50 (1) (2006) 1–14
4. L. Ruiz-Garcia, L. Lunadei, P. Barreiro, I. Robla, A review of wireless sensor technologies and applications in agriculture and food industry: state of the art and current trends, *Sensors* 9 (6) (2009) 4728–4750
5. Thenkabail, P.S.; Biradar, C.M.; Noojipady, P.; Dheeravath, V.; Li, Y.; Velpuri, M.; Velpuri, M.; Reddy, G.P.O.; Cai, X.L.; Gumma, M.; et al. Global irrigated area map (GIAM), derived from remote sensing, for the end of the last millennium. *Int. J. Remote Sens.* 2009, 30, 3679–3733.
6. Thenkabail, P.S. Global croplands and their importance for water and food security in the twenty-first century: Towards an ever green revolution that combines a second green revolution with a blue revolution. *Remote Sens.* 2010, 2, 2305–2231.
7. Postel, S.; Daily, G.C.; Ehrlich, P.R. Human appropriation of renewable fresh water. *Science* 1996, 271, 785–788.
8. Vitousek, P.M.; Aber, J.D.; Howarth, R.W.; Likens, G.E.; Matson, P.A.; Schindler, D.W.; Schlesinger, W.H.; Tilman, D.G. Human alteration of the global nitrogen cycle: Sources and consequences. *Ecol. Appl.* 1997, 7, 737–750.
9. Canfield, D.E.; Glazer, A.N.; Falkowski, P.G. The evolution and future of Earth's nitrogen cycle. *Science* 2010, 330, 192–196.
10. N. Wang, N. Zhang, M. Wang, Wireless sensors in agriculture and food industry—recent development and future perspective, *Computers and Electronics in Agriculture* 50 (1) (2006) 1–14
11. L. Ruiz-Garcia, L. Lunadei, P. Barreiro, I. Robla, A review of wireless sensor technologies and applications in agriculture and food industry: state of the art and current trends, *Sensors* 9 (6) (2009) 4728–4750
12. Jackson R.D. (1986). Remote sensing of biotic and abiotic plant stress. *Annual Review of Phytopathology* 24, 265–286.
13. Huete, A.; Didan K., Miura T., Rodriguez E. P., Gao X. & Ferreria L. G. (2000). "Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices". *Remote Sensing of Environment*. **83**: 195–213.

14. Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Proceedings, 3rd Earth Resource Technology Satellite (ERTS), Symposium 1, 48–62.
15. Thenkabail P.S., Smith R.B., De-Pauw E. (2002). Evaluation of narrowband and broadband vegetation indices for determining optimal hyperspectral wavebands for agricultural crop characterization. *Photogrammetric Engineering* 68, 607–621.
16. Casa, R., Jones, H.G. (2005). LAI retrieval from multiangular image classification and inversion of a ray tracing model. *Remote Sensing of Environment* 98, 414–428.
17. Reyniers, M & Vrindts, E & De Baerdemaeker, Josse. (2004). Optical Measurement of Crop Cover for Yield Prediction of Wheat. *Biosystems Engineering*. 89. 383-394. 10.1016/j.biosystemseng.2004.09.003.
18. Agüera F., Carvajal F., Pérez M. (2011). Measuring sunflower nitrogen status from an unmanned aerial vehicle-based system and an on the ground device. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII-1/C22 UAV-g 2011, Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics, Zurich, Switzerland.
19. Bausch W.C., Khosla R. (2010). QuickBird satellite versus ground-based multi-spectral data for estimating nitrogen status of irrigated maize. *Precision Agriculture* 11, 274–290.
20. Genc H., Genc L., Turhan H., Smith S. E., Nation J. L. (2008). Vegetation indices as indicators of damage by the sunn pest (Hemiptera: Scutelleridae) to field grown wheat. *African Journal of Biotechnology* 7, 173–180.
21. Ranjitha G., Srinivasan M.R., Rajesh A. (2014). Detection and estimation of damage caused by Thrips *Thrips tabaci* (Lind) of cotton using hyperspectral radiometer. *Agrotechnology* 3, 1–5.
22. Garcia-Ruiz F., Sankaran S., Maja J.M., Lee W.S., Rasmussen J., Ehsani R. (2013). Comparison of two aerial imaging platforms for identification of Huanglongbing-infected citrus trees. *Computers and Electronics in Agriculture* 91, 106–115.
23. Apan A., Held A., Phinn S., Markley J. (2004). Detecting sugarcane 'orange rust' disease using EO-1 Hyperion hyperspectral imagery. *International Journal of Remote Sensing* 25, 489–498.
24. Chen X., Ma J., Qiao H., Cheng D., Xu Y., Zhao Y. (2007). Detecting infestation of take-all disease in wheat using Landsat Thematic Mapper imagery. *International Journal of Remote Sensing* 28, 5183–5189.
25. Jackson R.D., Idso S.B., Reginato R.J., Pinter P.J. (1981). Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research* 17, 1133–1138.
26. B. B. D. Silva, J. A. Ferreira, and T. V. R. Rao, “Crop water stress index and water-use efficiency for melon (*Cucumis melo* L.) on different irrigation regimes,” *Agricultural Journal*, 2007
27. G. Kar and A. Kumar, “Surface energy fluxes and crop water stress index in groundnut under irrigated ecosystem,” *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 146, no. 1-2, pp. 94–106, 2007.

28. V. Lebourgeois, J.-L. Chopart, A. Begué, and L. Le Mézo, "Towards using a thermal infrared index combined with water balance modelling to monitor sugarcane irrigation in a tropical environment," *Agricultural Water Management*, vol. 97, no. 1, pp. 75–82, 2010
29. A. Anda, "Irrigation timing in maize by using the crop water stress index (CWSI)," *Cereal Research Communications*, vol. 37, no. 4, pp. 603–610, 2009
30. Champagne C.M., Staenz K., Bannari A., McNairn H., Jean-Claude D. (2003). Validation of a hyperspectral curve-fitting model for the estimation of plant water content of agricultural canopies. *Remote Sensing of Environment* 87, 295–309.
31. Cheng T., Riaño D., Koltunov A., Whiting M.L., Ustin S.L., Rodriguez J. (2013). Detection of diurnal variation in orchard canopy water content using MODIS/ASTER airborne simulator (MASTER) data. *Remote Sensing of Environment* 132, 1–12.
32. Cheng T., Riaño D., Ustin S.L. (2014). Detecting diurnal and seasonal variation in canopy water content of nut tree orchards from airborne imaging spectroscopy data using continuous wavelet analysis. *Remote Sensing of Environment* 143, 39–53.
33. Colombo R., Merom M., Marchesi A., Busetto L., Rossini M., Giardino C. (2008). Estimation of leaf and canopy water content in poplar plantations by means of hyperspectral indices and inverse modeling. *Remote Sensing of Environment* 112, 1820–1834.
34. Gao B.C. (1996). NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment* 58, 257–266.
35. El-Magd I.A., Tanton T.W. (2003). Improvements in land use mapping for irrigated agriculture from satellite sensor data using a multi-stage maximum likelihood classification. *International Journal of Remote Sensing* 24, 4197–4206.
36. Burks T.F., Shearer S.A., Payne F.A. (2000). Classification of weed species using color texture features and discriminant analysis. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 43, 441–448.
37. Burks T.F., Shearer S.A., Green J.D., Heath J.R. (2002). Influence of weed maturity levels on species classification using machine vision. *Weed Science* 50, 802–811.
38. Burks T.F., Shearer S.A., Heath J.R., Donohue K.D. (2005). Evaluation of neural network classifiers for weed species discrimination. *Biosystems Engineering* 91, 293–304.
39. Peña J.M., Torres-Sánchez J., Serrano-Pérez A., de Castro A.I., López-Granados F. (2015). "Quantifying efficacy and limits of unmanned aerial vehicle (UAV) technology for weed seedling detection as affected by sensor resolution". *Sensors* 15, 5609–5626.
40. Backes M., Jacobi J. (2006). Classification of weed patches in QuickBird images: verification by ground truth data. *EARSel – European Association of Remote Sensing Laboratories eProceedings*, EARSel, Warsaw, Poland.
41. Y. J. Kaufman and D. Tanre, "Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI) for EOS-MODIS," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30, no. 2, pp. 261–270, 1992.
42. R.-H. Zhang, N. X. Rao, and K. N. Liao, "Approach for a vegetation index resistant to atmospheric effect," *Acta Botanica Sinica*, vol. 38, no. 1, pp. 53–62, 1996.

43. A. R. Huete, "A soil-adjusted vegetation index (SAVI)," *Remote Sensing of Environment*, vol. 25, no. 3, pp. 295–309, 1988.
44. A. R. Huete, "A soil-adjusted vegetation index (SAVI)," *Remote Sensing of Environment*, vol. 25, no. 3, pp. 295–309, 1988
45. J. Qi, A. Chehbouni, A. R. Huete, Y. H. Kerr, and S. Sorooshian, "A modified soil adjusted vegetation index," *Remote Sensing of Environment*, vol. 48, no. 2, pp. 119–126, 1994
46. J. Qi, A. Chehbouni, A. R. Huete, Y. H. Kerr, and S. Sorooshian, "A modified soil adjusted vegetation index," *Remote Sensing of Environment*, vol. 48, no. 2, pp. 119–126, 1994
47. <https://www.deere.com>
48. Overview of Variable-Rate Technology, <https://sites.aces.edu/group/crops/precisionag/Publications/Timely%20Information/Overview%20of%20Variable-Rate%20Technology.pdf>
49. Pedersen SM, Fountas S, Have H, Blackmore BS, 2006. Agricultural robots—System analysis and economic feasibility. *Precis Agric* 7: 295-308.
50. Comba L, Gay P, Piccarolo P, Aimonino RD, 2010. Robotics and automation for crop management: trends and perspective. *Int Conf on Work Safety and Risk Prevention in Agro-Food and Forest Systems*: September. pp: 471- 478.
51. Blackmore BS, Greipentrog HW, Fountas S, Gemtos TA, 2007. A specification for an autonomous crop production mechanization system. *CIGR E- J* 2007; Manuscript PM 06032: 9
52. Nagasaka Y, Tamaki K, Nishiwaki K, Saito M, Motobayashi K, Kikuchi Y, Hosokawa H, 2011. Autonomous rice field operation project in NARO. *IEEE Int Conf on Mechatronics and Automation*; August. pp: 870-874.
53. Chamen WCT, Dowler D, Leede PR, Longstaff DJ, 1994. Design, operation and performance of a gantry system: experience in arable cropping. *J Agric Eng Res* 59: 45-60.
54. Horowitz J, Ebel R, Ueda K, 2010. No-till. Farming is a growing practice. *USDA Econ Inform Bull* 70. November.
55. Blackmore BS, 2009. New concepts in agricultural automation. *HGCA Conference*; October 2009.
56. Kladivko EJ, 2001. Tillage systems and soil ecology. *Soil Till Res* 61: 61-76.
57. Shibusawa S, 2003. Online real time sensing. *IEEE Int Conf on Advanced Intelligent Mechatronics*; July. pp: 1006- 1066.
58. Adamchuk VI, Lund ED, Sethuramasamyraja B, Morgan MT, Dobermann A, Marx DB, 2005. Direct measurement of soil chemical properties on-the-go using ion-selective electrodes. *Comput Electron Agric* 48: 272-294.
59. Lund ED, Adamchuk VI, Collings KL, Drummond PE, Christy CD, 2005. Development of soil pH and lime requirement maps using on-the-go soil sensors. *5th Eur Conf on Precis Agr*; July. pp: 457-464.
60. Lobsey C, Rossel RV, Mcbratney A, 2010. An automated system for rapid in-field soil nutrient testing. *19th World Cong of Soil Science, Soil Solutions for a Change World*; August. pp: 9-12.

61. Schirrmann M, Gebbers R, Kramer E, Seidel J, 2011. Soil pH mapping with an on-the-go sensor. *Sensors* 11: 573-598.
62. Phillips AJ, Newlands NK, Liang SHL, Ellert BH, 2014. Integrated sensing of soil moisture at the field scale: measuring, modeling and sharing for improved agricultural decision support. *Comput Electron Agric* 8: 13-17.
63. Riesen S, Rohrer L, 2011. Master Thesis on Gardening robotics - Design of a seed planting robot for the creation of large scale growing flower images. Swiss Federal Institute of Technology Zurich.
64. Ruangurai P, Ekpanyapong M, Pruetong C, Watewai T, 2015. Automated three-wheel rice seeding robot operating in dry paddy fields. *Maejo Int J Sci Tech* 9: 403-412.
65. Priyadarshini M, Sheela L, 2015. Command based self guided digging and seed sowing rover. *Int Conf on Engineering Trends and Science & Humanities*; March. pp: 5-9.
66. Grimstad L, Phan HNT, Pham CD, Bjugstad N, From PJ, 2015. Initial field-testing of Thorvald, a versatile robotic platform for agricultural applications. *Proc of the IROS Workshop on Agri-Food Robotics*. October.
67. Ruckelshausen A, Biber P, Dorna M, Gremmes H, Klose R, Linz A, Rahe F, Resch R, Thiel M, Trautz D, et al., 2009. Bonirob — An autonomous field robot platform for individual plant phenotyping. *Joint Int Agr Conf*: July. pp: 841-847.
68. Lee WS, Slaughter DC, Giles DK, 1999. Robotics weed control system for tomatoes. *Precis Agric* 1: 95-113.
69. Chen B, Tojo S, Watanabe K, 2003. Machine vision for a micro weeding robot in a paddy field. *Biosyst Eng* 85: 393-404.
70. Slaughter DC, Giles DK, Downey D, 2008. Autonomous robotic weed control systems: a review. *Comput Electron Agric* 61: 63-78.
71. Nørremark M, Griepentrog HW, Nielsen J, Søggaard HT, 2008. The development and assessment of the accuracy of an autonomous GPS-based system for intra-row mechanical weed control in row crops. *Biosyst Eng* 101: 396-410.
72. Jeon HY, Tian LF, 2009. Direct application end effector for a precise weed control robot. *Biosyst Eng* 104: 458-464.
73. Yoon B, Kim S, 2013. Design of Paddy weeding robot. *IEEE Int Symp on Robotics*; October: 1-2.
74. Kargar AHB, Shrizadifar AM, 2013. Automatic weed detection system and smart herbicide sprayer robot for corn fields. *RSI/ISM Int Conf on Robotics and Mechatronics*; February. pp: 13-15.
75. Gobor Z, Schulze Lammers P, Martinov M, 2013. Development of a mechatronic intra-row weeding system with rotational hoeing tools: Theoretical approach and simulation. *Comput Electron Agric* 98: 166-174.
76. Patnaik A, Narayanamoorthi R, 2015. Weed removal in cultivated field by autonomous robot using LabVIEW. *IEEE Int Conf on Innovations in Information Embedded and Communication Systems*; March. pp: 1-5.

77. Nagasaka Y, Tamaki K, Nishiwaki K, Saito M, Motobayashi K, Kikuchi Y, Hosokawa H, 2011. Autonomous rice field operation project in NARO. IEEE Int Conf on Mechatronics and Automation; August. pp: 870-874.
78. Zhang Q, Pierce FJ, 2013. Agricultural automation: fundamentals and practices. CRC Press, London. 411 pp.
79. Liu J, Li Z, Li P, Mao H, 2008. Design of a laser stem-cutting device for harvesting robot. IEEE Int Conf on Automation and Logistics; September. pp: 2370-2374.
80. Krishnaswamy R Aravind, Purushothaman Raja, and Manuel Pérez-Ruiz. Task-based agricultural mobile robots in arable farming: A review. Spanish Journal of Agricultural Research, 15(1):02–01, 2017.
81. M. Damas, A.M. Prados, F. Gómez, G. Olivares, HidroBus system: fieldbus for integrated management of extensive areas of irrigated land, Microprocessors and Microsystems 25 (3) (2001) 177–184.
82. R. Evans, J. Bergman, Relationships between cropping sequences and irrigation frequency under self-propelled irrigation systems in the Northern Great Plains (NGP), USDA Annual Report. Project, 003–002, 2003.
83. R. Morais, A. Valente, C. Serôdio, A wireless sensor network for smart irrigation and environmental monitoring, EFITA/WCCA Joint Congress on IT in Agriculture, Portugal, 2005, pp. 845–850.
84. T. Basu, M.V.R. Thool, R.C. Thool, A.C. Birajdar, Computer based drip irrigation control system with remote data acquisition system, 4th World Congress of Computers in Agriculture and Natural Resources, USA, 2006.
85. S. Cugati, W. Miller, J. Schueller, Automation concepts for the variable rate fertilizer applicator for tree farming, The Proceedings of the 4th European Conference in Precision Agriculture, Berlin, Germany, 2003, pp. 14–19.
86. A. Baggio, Wireless sensor networks in precision agriculture, ACM Workshop Real-World Wireless Sensor Networks, Stockholm, Sweden, 2005.
87. K.H. Dammer, Variable rate application of fungicides, Precision Crop Protection the Challenge and Use of Heterogeneity, Springer Science and Business Media, 2010, pp. 351–365.
88. www.semios.com
89. W. Zhang, G. Kantor, S. Singh, Integrated wireless sensor/actuator networks in an agricultural application, 2nd ACM International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, 2004, p. 317.
90. J. Burrell, T. Brooke, R. Beckwith, Vineyard computing: sensor networks in agricultural production, IEEE Pervasive Computing 3 (1) (2004) 38–45.
91. S. T. Daughtry, C. L. Walthall, M. S. Kim, E. B. De Colstoun, and J. E. McMurtrey III, “Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance,” Remote Sensing of Environment, vol.74,no.2,pp.229–239,2000.
92. M.A. Matin and M.M. Islam (September 6th 2012). Overview of Wireless Sensor Network, Wireless Sensor Networks Mohammad A. Matin, IntechOpen, DOI: 10.5772/49376.
93. http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/atmel-7766-8-bit-avr-atmega16u4-32u4_datasheet.pdf
94. www.hoperf.com/upload/rf/RFM95_96_97_98W.pdf
95. Lora-alliance.org

96. www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/3105fb.pdf
97. <https://www.diodes.com/assets/Datasheets/ds31737.pdf>
98. <https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Rohm%20PDFs/RUM003N02.pdf>
99. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps61088.pdf>
100. youtu.be/Zrs89iW8Q_0
101. <http://www.sentilo.io/xwiki/bin/view/APIDocs/WebHome>
102. <http://www.sentilo.io/xwiki/bin/view/APIDocs.Services/Catalog>
103. <http://www.sentilo.io/xwiki/bin/view/APIDocs.Service.Catalog/CreateSensors>
104. <http://www.sentilo.io/xwiki/bin/view/APIDocs.Services/Data>
105. <http://www.sentilo.io/xwiki/bin/view/APIDocs.Services/order>
106. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Global Strategy to Improve Agricultural and Rural Statistics; Report No. 56719-GB; FAO: Rome, Italy, 2011.
107. C. Guestrin, A. Krause, and A. Singh, "Near-Optimal Sensor Placements in Gaussian Processes," in Proceedings of the 22nd International Conference on Machine learning. ACM, 2005, pp. 265–272.
108. C.-S. Foo, B. Chuong, and A. Ng, "Efficient Multiple Hyperparameter Learning for Log-linear Models," in NIPS 2007, 2007, pp. 377–384.
109. Y. Bengio, "Gradient-based Optimization of Hyper-parameters," Neural Computation, vol. 12, no. 8, pp. 1889–1900, 2000.
110. M. Blum and M. Riedmiller, "Optimization of Gaussian Process Hyperparameters using Rprop," in Proceedings of European Symposium on Artificial Neural Networks, Computational Intelligence and Machine Learning, Bruges, BE, April 2013.
111. <https://data.nal.usda.gov/dataset/data-field-scale-sensor-network-data-set-monitoring-and-modeling-spatial-and-temporal-variation-soil-moisture-dryland-agricultural-field/resource/90d84fbd-e4bf-4e9e-bb32-f8fbcf262f11>.
112. Malouf, Robert (2002). *A comparison of algorithms for maximum entropy parameter estimation*. Proc. Sixth Conf. on Natural Language Learning (CoNLL). pp. 49–55.
113. Andrew, Galen; Gao, Jianfeng (2007). "Scalable training of L1-regularized log-linear models". *Proceedings of the 24th International Conference on Machine Learning*. doi:10.1145/1273496.1273501. ISBN 9781595937933.