



UNIVERSITÉ HASSAN 1^{er}
Centre d'Études Doctorales



Faculté des Sciences et Techniques
Settat

THÈSE DE DOCTORAT

Pour l'obtention de grade de Docteur en Sciences et Techniques

Formation Doctorale: **Mathématiques, Informatique et Applications**

Spécialité: **Informatique**

Sous le thème

Technologie des réseaux de capteurs dans les systèmes d'irrigation intelligents

Présentée par :

Loubna HAMAMI

Soutenue le : 16 Juillet 2021

A la Faculté des Sciences et Techniques de Settat devant le jury composé de :

Pr. Abdellah EZZATI	PES	FST de Settat	Président
Pr. Abderrahim SEKKAKI	PES	FS AinChok Casablanca	Rapporteur
Pr. Mohamed MOUGHIT	PES	ENSA Khouribga	Rapporteur
Pr. Abderahim MARZOUK	PES	FST de Settat	Rapporteur
Pr. Abdellah EZZATI	PES	FST de Settat	Examineur
Pr. Bouchaib NASSEREDDINE	PES	FST de Settat	Directeur de thèse

Année Universitaire: 2020/2021

Dédicaces

Je dédie ce travail

A

Ma chère mère

...

A

La mémoire de mon père

...

A

Mon frère Jamal, à sa femme Naima et à ses enfants,

Mon frère Mohammed, à sa femme Soukaina et à sa fille,

Mon frère Salah, à sa femme Afaf et à ses enfants,

Ma sœur Faiza, à son mari Abderahim et à ses enfants,

Mes sœurs Amal, Bouchra,

Mes oncles et mes tantes,

Mes cousines Zakia, Asmaa et Souad et mon cousin Hicham

...

A toute la famille HAMAMI et BOUZIANE

...

A

Mes amis, s'ils ne peuvent pas être tous cités ici ils se reconnaîtront.

Avec tous mes souhaits de bonheur, de santé et de réussite.

*Et enfin à toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation
de ce travail.*

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier Allah Subhanahu wa-Taala de m'avoir donné la force, le courage et la volonté de mener à bien cette thèse. Ma plus profonde et grande gratitude à ma chère mère pour son amour, ses prières et ses encouragements sans fin. Sans son amour constant et inconditionnel, son aide et son soutien, je n'aurais pas pu terminer cette thèse. Je demande à Allah de la guérir.

Ce mémoire résume les travaux de recherche réalisés au sein du Laboratoire Informatique, Réseaux, Mobilité et Modélisation (IR2M). Je tiens donc à remercier le responsable de ce laboratoire Dr. Abdelkrim Haqiq, professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Settat, de m'avoir accueilli et donné l'opportunité de réaliser ce travail de thèse.

Je tiens à remercier tout particulièrement mon directeur de thèse Dr. Bouchaib Nassereddine, professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Settat, pour ses encouragements, sa disponibilité, ses idées et ses conseils tout au long du processus de recherche. Je tiens également à remercier Dr. Sanae Khali Issa, professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Tanger, pour avoir consacré son temps précieux à mon travail et pour avoir fourni des commentaires qui ont permis d'améliorer mon rapport.

Je profite de l'occasion pour exprimer ma gratitude au Dr. Abdellah Ezzati, professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Settat, pour avoir aimablement accepté de présider le jury de ma soutenance. Je suis également reconnaissant aux membres du jury, Dr. Abderrahim Sekkaki, professeur à la Faculté des Sciences AinChok de Casablanca, Dr. Mohamed Moughit, professeur à l'école Nationale des Sciences Appliquées de Khouribga et Dr. Abderrahim Marzouk, professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Settat, d'avoir consacré leur temps précieux à mon comité et d'avoir fourni des suggestions perspicaces sur la thèse. Je tiens également à remercier Dr. Abdellah Ezzati, professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Settat, pour avoir accepté d'être examinateur lors de ma soutenance de thèse. Je considère sa présence parmi le jury comme un témoignage de grande valeur et je suis heureux de lui exprimer ma profonde gratitude.

Je remercie chaleureusement mes sœurs, mes frères, mes amis et tous les membres de ma famille pour leurs encouragements et leur soutien moral qui m'ont permis d'élaborer cette thèse dans de bonnes conditions.

Résumé

En raison d'une série de problèmes soulevés ces dernières années, tels que la crise mondiale de l'eau, la sécheresse et le gaspillage irrationnel des ressources en eau, et compte tenu des graves conséquences de l'aggravation de la crise de l'eau dans le monde, une attention particulière a été accordée à la conservation de l'eau dans divers domaines de la vie, en particulier dans le secteur agricole. Ce dernier est considéré comme l'un des secteurs les plus consommateurs d'eau au monde, dans lequel une très grande partie de cette eau est utilisée principalement pour l'irrigation. Ces faits incitent les gouvernements du monde entier à repenser l'économie d'eau et à réduire la quantité d'eau utilisée pour l'irrigation ; Cela nécessite le développement de pratiques d'irrigation afin d'avoir un système de gestion de l'irrigation complet et indépendant plus efficace.

Le développement rapide de la technologie des capteurs dans divers aspects a récemment conduit à une transformation majeure du réseau de capteurs sans fil (RCSF). Les RCSF deviennent essentiels et impliqués dans la plupart des domaines de la vie. Le secteur agricole est l'un de ces secteurs où ces réseaux sont utilisés avec succès pour obtenir de nombreux avantages. Par conséquent, le choix d'utiliser les RCSF dans les systèmes d'irrigation sera un avantage pour le développement de l'agriculture et offrira plus de flexibilité pour développer et améliorer l'efficacité de ce système, permettant ainsi d'économiser de l'eau et d'améliorer et d'augmenter la production.

Dans ce contexte, nous nous intéressons dans cette thèse aux contributions de la technologie des réseaux de capteurs sans fil dans le domaine de l'irrigation, en la considérant comme une solution idéale pour surmonter les problèmes du secteur agricole et réduire la consommation d'eau dans ce secteur, et ainsi atténuer la crise mondiale de l'eau. Les résultats des études et des travaux réalisés dans cette thèse ont montré que l'intégration des réseaux de capteurs sans fil dans l'irrigation peut fournir des solutions efficaces et rentables pour soutenir, améliorer et renforcer les systèmes d'irrigation. Ainsi, cette intégration est également utile pour assurer une consommation efficace et rationnelle de l'eau d'irrigation et pour atténuer dans une certaine mesure la crise mondiale de l'eau.

La présente thèse vise, dans un premier temps, à présenter une revue systématique exhaustive de la littérature, plus récente et approfondie, en examinant, étudiant et analysant l'application

et l'utilisation du RCSF dans le domaine de l'irrigation. Dans un deuxième temps, cette thèse aborde trois aspects principaux liés au RCSF dans le domaine étudié. Le premier axe consiste à fournir une analyse des principaux facteurs qui affectent les RCSF en général. Le deuxième axe est le principal, il vise à présenter une étude et une analyse des principaux facteurs qui affectent les RCSF dans le domaine de l'irrigation. Par ailleurs, le troisième axe porte sur la réalisation d'une analyse SWOT pour évaluer l'utilisation du RCSF dans l'irrigation au Maroc en termes de forces, faiblesses, opportunités et menaces afin de mieux comprendre ce type d'application. Finalement, nous proposons une solution pour un système d'irrigation intelligent utilisant le RCSF. Le système proposé est basé sur un RCSF, qui utilise un ensemble de nœuds de capteurs spécifiques pour effectuer des mesures des caractéristiques météorologiques et du sol afin d'aider à prendre des décisions concernant le système d'irrigation, dans le but de le contrôler correctement.

Mots clés :

Agriculture, Irrigation, Crise de l'eau, Capteur, Conception du RCSF, Déploiement du RCSF, Facteurs affectant RCSF, Gestion des ressources en eau, Irrigation intelligente, Optimisation, Réseau de capteurs sans fil, Système d'irrigation, Utilisation rationnelle de l'eau.

Abstract

Due to a series of issues raised in recent years, such as the global water crisis, drought, and irrational waste of water resources, and in view of the serious consequences of the worsening water crisis in the world, special attention has been given to water conservation in various areas of life, especially in the agricultural sector. The latter is one of the most water-consuming sectors in the world, in which a very large part of this water is used mainly for irrigation. These facts are prompting governments around the world to rethink water conservation and reduce the amount of water used for irrigation; this requires the development of irrigation practices in order to have a more efficient comprehensive and independent irrigation management system.

The rapid development of sensor technology in various aspects has recently led to a major transformation of the wireless sensor network (WSN). WSNs are becoming essential and involved in most areas of life. The agricultural sector is one such sector where these networks are successfully used to achieve many benefits. Therefore, choosing to use WSNs in irrigation systems will be an advantage for the development of agriculture and will offer more flexibility to develop and improve the efficiency of this system, thus saving water and improving and increasing production.

In this context, we focus in this thesis on the contributions of wireless sensor network technology in the field of irrigation, considering it as an ideal solution to overcome the problems of the agricultural sector and reduce water consumption in this sector, and thus mitigate the global water crisis. The results of the studies and works conducted in this thesis have shown that the integration of wireless sensor networks in irrigation can provide efficient and cost-effective solutions to support, improve, and strengthen irrigation systems. Thus, such integration is also useful in ensuring efficient and rational consumption of irrigation water and in mitigating to some extent the global water crisis.

The present thesis aims, firstly, to present a comprehensive systematic review of the literature, more recent and thorough, by examining, studying and analyzing the application and use of the WSN in the field of irrigation. Secondly, this thesis addresses three main aspects related to WSN in the studied field. The first axis is to provide an analysis of the main factors that affect

WSN in general. The second axis is the main one; it aims to present a study and analysis of the main factors that affect WSN in the irrigation field. In addition, the third axis focuses on conducting a SWOT analysis to assess the use of WSN in irrigation in Morocco in terms of strengths, weaknesses, opportunities and threats to better understand this type of application. Finally, we propose a solution for a smart irrigation system using WSN. The proposed system is based on a WSN, which uses a set of specific sensor nodes to make measurements of weather and soil characteristics to help make decisions about the irrigation system, with the aim of controlling it properly.

Keywords:

Agriculture, Factors affecting WSN, Irrigation system, Optimization, Smart irrigation, Sensor, Water crisis, WSN design, WSN deployment, Water resources management, Wireless sensor network, Water efficiency.

ملخص الرسالة

نظرًا لسلسلة من القضايا التي أثرت في السنوات الأخيرة، مثل أزمة المياه العالمية والجفاف والهدر غير العقلاني لموارد المياه، وبالنظر إلى العواقب الوخيمة لتفاقم أزمة المياه في العالم، فقد تم إيلاء اهتمام خاص للحفاظ على المياه في مختلف مجالات الحياة وخاصة في القطاع الزراعي. يعتبر هذا الأخير من أكثر القطاعات استهلاكًا للمياه في العالم، حيث يستخدم جزء كبير جدًا من هذه المياه في الري بشكل أساسي. هذه الحقائق تدفع الحكومات في جميع أنحاء العالم إلى إعادة التفكير في الحفاظ على المياه وتقليل كمية المياه المستخدمة في الري؛ وهذا يتطلب تطوير ممارسات الري من أجل الحصول على نظام إدارة ري كامل ومستقل أكثر كفاءة.

أدى التطور السريع لتكنولوجيا الاستشعار في جوانب مختلفة مؤخرًا إلى تحول كبير في شبكة المستشعرات اللاسلكية (RCSF). أصبحت شبكات المستشعرات اللاسلكية أساسية وتشارك في معظم مجالات الحياة. يعتبر القطاع الزراعي من القطاعات التي تستخدم فيها هذه الشبكات بنجاح لتحقيق العديد من الفوائد. لذلك، فإن اختيار استخدام RCSF في أنظمة الري سيكون ميزة لتطوير الزراعة وسيوفر المزيد من المرونة لتطوير وتحسين كفاءة هذا النظام، وبالتالي توفير المال والمياه وتحسين وزيادة الإنتاج.

في هذا السياق، نركز في هذه الأطروحة على مساهمات تقنية شبكات الاستشعار اللاسلكية في مجال الري، معتبرينها حلًا مثاليًا للتغلب على مشاكل القطاع الزراعي وتقليل استهلاك المياه في هذا القطاع، وبالتالي التخفيف من أزمة المياه العالمية. أظهرت نتائج الدراسات والأعمال التي تم إجراؤها في هذه الأطروحة أن دمج شبكات الاستشعار اللاسلكية مع الري يمكن أن يوفر حلولًا فعالة واقتصادية لدعم أنظمة الري وتحسينها وتقويتها. وبالتالي، فإن هذا التكامل مفيد أيضًا لضمان الاستهلاك الفعال والعقلاني لمياه الري وللتخفيف إلى حد ما من أزمة المياه العالمية.

بالنظر إلى العواقب الخطيرة لأزمة المياه المتفاقمة في العالم، تم إيلاء اهتمام خاص للحفاظ على المياه في مجالات الحياة المختلفة، وخاصة في الزراعة. يعد القطاع الزراعي من أكثر القطاعات استهلاكًا للمياه في العالم، حيث تُستخدم كمية كبيرة جدًا من هذه المياه بشكل أساسي للري. يُنظر إلى أمتة أنظمة الري على أنها الحل الأمثل للتخفيف من تأثير أزمة المياه

في العديد من البلدان. أدى التطور السريع لتكنولوجيا الاستشعار في جوانب مختلفة مؤخرًا إلى تحول كبير في شبكة المستشعرات اللاسلكية (RCSF)، مما أدى إلى استخدام RCSF في جميع الصناعات ومجالات الحياة تقريبًا. حيث يوفر خيار تطبيق شبكة الاستشعار اللاسلكية كتقنية التنسيق والتخطيط والإدارة في نظام الري مزيدًا من المرونة لتطوير وتحسين كفاءة هذا النظام، وبالتالي توفير كميات كبيرة من الماء.

تهدف هذه الأطروحة، كخطوة أولى، إلى تقديم مراجعة منهجية شاملة للأدبيات، حديثة ومتعمقة، من خلال فحص ودراسة وتحليل تطبيق واستخدام RCSF في مجال الري. ثانيًا، تتناول هذه الأطروحة ثلاثة جوانب رئيسية مرتبطة بمجال RCSF في المجال المدروس. المحور الأول هو تقديم تحليل للعوامل الرئيسية التي تؤثر على RCSF بشكل عام. المحور الثاني هو المحور الرئيسي، ويهدف إلى تقديم دراسة وتحليل للعوامل الرئيسية التي تؤثر على RCSF في مجال الري. بالإضافة إلى ذلك، يتعلق المحور الثالث بتحقيق تحليل SWOT لتقييم استخدام RCSF في الري في المغرب من حيث نقاط القوة والضعف والفرص والتهديدات من أجل فهم أفضل لهذا النوع من التطبيقات. أخيرًا، نقدم حلاً لنظام ري ذكي باستخدام RCSF. يعتمد النظام المقترح على RCSF، والذي يستخدم مجموعة من عقد الاستشعار المحددة لإجراء قياسات لخصائص الطقس والتربة للمساعدة في اتخاذ القرارات بشأن نظام الري، بهدف التحكم فيه بشكل صحيح.

كلمات البحث:

أزمة المياه، إدارة الموارد المائية، الاستخدام الرشيد للمياه، انتشار RCSF، تصميم RCSF، التحسين، الري الذكي، الزراعة، شبكة الاستشعار اللاسلكية، العوامل المؤثرة على RCSF، المستشعر، نظام الري.

Table des matières

Introduction générale.....	23
1.1 Contexte.....	24
1.2 Problématique, motivations et enjeux	25
1.3 Contributions.....	31
1.4 Organisation de la thèse.....	34
Crise mondiale de l'eau et Agriculture et Irrigation de précision : Notions, concepts et chiffres 37	37
2.1 Introduction	38
2.2 Crise mondiale de l'eau : Vue d'ensemble.....	38
2.2.1 Crise mondiale de l'eau	38
2.2.2 Causes et raisons de la crise mondiale de l'eau	40
2.2.3 Solutions face à la crise de l'eau dans le monde	43
2.2.4 Crise de l'eau au Maroc.....	45
2.3 Agriculture, irrigation et ressources hydrauliques au Maroc	47
2.3.1 Ressources en eau au Maroc.....	47
2.3.2 Agriculture au Maroc	53
2.3.3 Irrigation au Maroc.....	58
2.3.4 Synthèse.....	64
2.4 Agriculture de précision	65
2.5 Irrigation de précision	67
2.6 Conclusion.....	69
Technologie des réseaux de capteurs sans fil	70
3.1 Introduction	71
3.2 Réseaux sans fil.....	71
3.2.1 Caractéristiques des réseaux sans fil	72
3.2.2 Classification des réseaux sans fil	73
3.3 Réseaux de capteurs sans fil.....	77
3.3.1 Présentation et motivation des RCSF	77
3.3.2 Définitions	78
3.3.3 Fonctionnement	78
3.3.4 Principales caractéristiques des RCSF	79
3.3.5 Comparaison entre les RCSF et les réseaux sans fil classiques.....	81

3.3.6	Domaines d'application des RCSF.....	83
3.3.7	Classification de RCSF.....	86
3.3.8	Architecture des RCSF.....	88
3.3.9	Topologies des RCSF.....	90
3.3.10	Pile protocolaire de RCSF.....	91
3.3.11	Routage dans les réseaux de capteurs sans fil.....	94
3.4	Nœuds de capteur.....	102
3.4.1	Capteur et détection.....	102
3.4.2	Définitions.....	102
3.4.3	Technologies des nœuds de capteur.....	104
3.4.4	Caractéristiques du nœud de capteur.....	105
3.4.5	Architecture du nœud de capteur.....	106
3.4.6	Processus fonctionnel du nœud de capteur.....	108
3.4.7	Différents types de capteurs.....	108
3.5	Conclusion.....	116
Application de la technologie des réseaux de capteurs sans fil dans le domaine de l'irrigation.		117
4.1	Introduction.....	118
4.2	Méthodologie de la revue systématique « WSN-based irrigation SLR ».....	120
4.2.1	Objectifs de recherche.....	122
4.2.2	Questions de recherche.....	122
4.2.3	Stratégie de recherche.....	123
4.2.4	Critères d'inclusion et d'exclusion.....	124
4.2.5	Protocole de la revue systématique.....	126
4.2.6	Examen des articles pertinents.....	127
4.2.7	Evaluation de la qualité.....	129
4.2.8	Processus de sélection des articles.....	131
4.2.9	Méthode d'extraction de données.....	134
4.3	Application des réseaux de capteurs sans fil dans l'irrigation.....	135
4.4	Pourquoi des capteurs et des RCSF dans les systèmes d'irrigation ?.....	144
4.5	Capteurs utilisés dans le domaine de l'irrigation.....	145
4.6	Cultures, types de sol et stratégies d'irrigation.....	150
4.6.1	Type de cultures.....	150
4.6.2	Type de sol utilisé.....	151
4.6.3	Systèmes d'irrigation.....	151
4.6.4	Synthèse.....	152
4.7	Technologies de communication sans fil.....	154

4.7.1	Technologie de communication sans fil	154
4.7.2	Comparaison des technologies de communication sans fil	156
4.7.3	Technologies de communication utilisées dans le domaine de l'irrigation.....	158
4.8	Synthèse.....	160
4.9	Conclusion.....	170
Facteurs et limites affectant les réseaux de capteurs sans fil dans le domaine de l'irrigation....		171
5.1	Introduction	172
5.2	Facteurs affectant les réseaux de capteurs sans fil	173
5.2.1	Déploiement des nœuds capteurs dans le RCSF	173
5.2.2	Tolérance aux pannes	174
5.2.3	Durée de vie du réseau	175
5.2.4	Coûts de production.....	176
5.2.5	Environnement	177
5.2.6	Facteur d'échelle.....	177
5.2.7	Support de transmission	178
5.2.8	Topologie du réseau	179
5.3	Facteurs affectant les RCSF dans le domaine de l'irrigation	180
5.3.1	Placement du nœud de capteurs	181
5.3.2	Boîtier du nœud de capteurs.....	181
5.3.3	Taille et déploiement du nœud de capteurs	182
5.3.4	Tolérance aux pannes	182
5.3.5	Consommation et gestion de l'énergie.....	183
5.3.6	Collecte et transmission des données	184
5.3.7	Coût du système	185
5.3.8	Pertes de propagation	185
5.4	Synthèse.....	186
5.5	Facteurs d'amélioration associés aux solutions d'irrigation basées sur RCSF.....	188
5.5.1	Coût	188
5.5.2	Maintenance du système.....	189
5.5.3	Efficacité énergétique.....	189
5.5.4	Fonctionnement autonome	189
5.5.5	Facteur d'intelligence et de surveillance en temps réel.....	189
5.5.6	Facilité d'utilisation	190
5.5.7	Différents climats et sols	190
5.5.8	Planification globale et architecture robuste	190
5.6	Avantage des RCSF dans le domaine de l'irrigation	190

5.6.1	Economies d'eau	191
5.6.2	Augmentation des rendements et amélioration de la qualité de la production agricole 192	
5.6.3	Economies de main-d'œuvre, d'argent et d'énergie.....	192
5.7	Analyse SWOT de l'utilisation des RCSF dans le domaine d'irrigation	194
5.7.1	Forces (Strengths).....	195
5.7.2	Faiblesses (Weaknesses)	195
5.7.3	Opportunités (Opportunities).....	195
5.7.4	Menaces (Threats)	196
5.8	Conclusion.....	198
Système d'irrigation intelligent en utilisant les RCSF		199
6.1	Introduction	200
6.2	Méthodologie proposée	201
6.2.1	Règles de base	201
6.2.2	Procédures et étapes	201
6.2.3	Structure typique	202
6.3	Analyse fonctionnelle.....	205
6.3.1	Bête à corne	205
6.3.2	Diagramme pieuvre	206
6.3.3	Carte mentale.....	208
6.4	Etude conceptuelle	210
6.4.1	Perception et prise de décision	210
6.4.2	Conception du système.....	211
6.5	Outils et technologies utilisés	220
6.5.1	Système d'irrigation.....	220
6.5.2	Technologie de communication sans fil	222
6.5.3	Technologie réseaux de capteurs sans fil	222
6.5.4	Outils utilisés	223
6.6	Prototype et architectures du système	227
6.6.1	Architecture et composants du système proposé.....	228
6.6.2	Prototype et fonctionnement du système.....	230
6.6.3	Algorithme de flux de travail de nœuds	232
6.6.4	Schéma synoptique du système	234
6.7	Sous-systèmes et flux de travail du système	235
6.7.1	Sous-systèmes	235
6.7.2	Application java : Système de contrôle local	237

6.7.3	Flux de travail et étapes du système	242
6.8	Conclusion.....	244
	Conclusion général et perspectives	245
	Publications.....	247
	Bibliographie.....	249
	Annexes	268

Liste des figures

Figure 2.1 Evolution des températures moyennes mondiales [11].....	41
Figure 2.2 Les 10 années les plus chaudes depuis 1880 [99].....	41
Figure 2.3 Evolution de la population mondiale depuis 1900 et projections jusqu'en 2100 [85].....	42
Figure 2.4 Prélèvements d'eau dans le monde au cours du 20e siècle (1900-2010) [11].....	42
Figure 2.5 Consommation d'eau par secteur et par groupe de pays [21].....	44
Figure 2.6 Stress hydrique au niveau des pays en 2040 selon WRI [104].	46
Figure 2.7 Classement des pays en situation de stress hydrique (2019) [105].	46
Figure 2.8 Précipitations mensuelles moyennes pour le Maroc au cours de la période 1991-2020 [107].	48
Figure 2.9 Répartition spatiale des précipitations moyennes au Maroc [106].	49
Figure 2.10 Evolution temporelle de la température moyenne annuelle au niveau national ; la ligne rouge représente la normale climatologique de la température moyenne pour la période 1981-2010 [111].	49
Figure 2.11 Evolution temporelle de la pluviométrie annuelle au niveau national ; la ligne orange représente la normale climatologique pour la période 1981-2010 [111].....	50
Figure 2.12 Potentiel des ressources en eau superficielles des bassins au Maroc [106].	50
Figure 2.13 Potentiel des ressources en eau souterraines des bassins au Maroc [106].	51
Figure 2.14 Evolution de la dotation des ressources en eau au Maroc (en m ³ /hab./an) [106].....	51
Figure 2.15 Consommation d'eau par secteur au Maroc.	52
Figure 2.16 Prévision de la demande en eau par ville entre 2014-2050 (litres par habitant et par jour) [113].	52
Figure 2.17 Prévision de la demande en eau par secteur au Maroc à l'horizon 2050 (en milliards de m ³ /an).	53
Figure 2.18 Aperçu de l'évolution des stratégies et politiques dans le secteur agricole au Maroc [34].	54
Figure 2.20 Structure de l'emploi selon le secteur d'activité économique en milieu rural (en %) [117].	55
Figure 2.19 Structure de l'emploi selon le secteur d'activité économique (en %) [117].	55
Figure 2.21 Produit intérieur brut de la branche agricole [117].	55
Figure 2.22 Répartition de la SAU selon le type d'utilisation [116].....	56
Figure 2.23 Structure de la valeur ajoutée agricole entre 2008 et 2018 (en %) [117].	57
Figure 2.24 Répartition de la SAU selon le type d'irrigation [116].	61
Figure 2.25 Différents systèmes d'irrigation au Maroc.	62
Figure 2.26 Evolution des superficies équipées par une irrigation localisée (en milliers d'hectares) [34].	63
Figure 2.27 Superficies irriguées au Maroc selon le mode d'irrigation.	63
Figure 2.28 Superficies irriguées au Maroc [28].	64
Figure 3.1 Catégories des réseaux sans fil.....	73
Figure 3.2 Modèle de réseaux sans fil avec infrastructure.	74
Figure 3.3 Modèle de réseaux sans fil sans infrastructure.....	75
Figure 3.4 Routage multi-saut.	76
Figure 3.5 Structure d'un réseau de capteurs sans fil.	79
Figure 3.6 Exemple d'applications des RCSF.....	83
Figure 3.7 Vue d'ensemble des applications de RCSF [6].	84

Figure 3.8 Architecture hiérarchique en clusters pour les RCSF.	89
Figure 3.9 Architecture à plat pour les RCSF.	90
Figure 3.10 Pile protocolaire des réseaux de capteurs sans fil [4].	91
Figure 3.11 Classification des protocoles de routage dans RCSF.	96
Figure 3.12 Topologie plate.	97
Figure 3.13 Topologie hiérarchique base sur les clusters.	99
Figure 3.14 Principe d'un capteur.	103
Figure 3.15 Chaîne de mesure ou d'instrumentation.	103
Figure 3.16 Rayons de sensation et de communication d'un capteur.	106
Figure 3.17 Architecture d'un nœud de capteur.	106
Figure 3.18 Processus fonctionnel du nœud de capteur.	108
Figure 3.19 Classification des capteurs.	109
Figure 3.20 Principe d'un thermocouple.	112
Figure 3.21 Exemple de capteurs pour la mesure de température par contact.	113
Figure 3.22 Exemple de capteurs d'humidité.	115
Figure 3.23 Quelques capteurs de teneur en eau.	116
Figure 4.1 Flux de travail de WSN-based irrigation SLR.	121
Figure 4.2 Processus de sélection des articles pertinents selon le diagramme de flux PRISMA.	133
Figure 4.3 Système d'irrigation automatisé utilisant RCSF, ZigBee et GPRS [233].	137
Figure 4.4 Déploiement du système de détection SenseTube sur le terrain [235].	138
Figure 4.5 Application de l'irrigation goutte à goutte automatisée sur un cerisier nain [246].	141
Figure 4.6 Quelques exemples de capteurs utilisés dans l'irrigation.	149
Figure 4.7 Trois facteurs principaux pour un système d'irrigation de précision idéal.	153
Figure 4.8 Comparaison des technologies sans fil en termes de distance de communication et de consommation d'énergie.	158
Figure 4.9 Paramètres les plus surveillés dans le domaine de l'irrigation en utilisant le RCSF.	168
Figure 4.10 Paramètres du sol les plus surveillés dans les articles évalués pour les systèmes d'irrigation basés sur RCSF.	168
Figure 4.11 Paramètres météorologiques les plus surveillés dans les articles évalués pour les systèmes d'irrigation basés sur RCSF.	169
Figure 5.1 Classification des stratégies de tolérance aux pannes dans RCSF.	175
Figure 5.2 Classification des problèmes de contrôle de topologie dans le RCSF.	180
Figure 5.3 Principaux facteurs affectant les RCSF dans le domaine de l'irrigation.	181
Figure 5.4 Facteurs d'amélioration clés associés aux solutions d'irrigation basées sur les RCSF.	188
Figure 5.5 Principaux avantages de l'utilisation des RCSF dans l'irrigation.	191
Figure 5.6 Avantages des RCSF dans l'irrigation pour différents acteurs.	194
Figure 5.7 Analyse SWOT de l'utilisation du RCSF en irrigation.	197
Figure 6.1 Structure générale d'un système d'irrigation intelligent typique.	204
Figure 6.2 Diagramme bête à corne du système d'irrigation proposé.	206
Figure 6.3 Diagramme pieuvre du système d'irrigation proposé.	207
Figure 6.4 Carte mentale du système d'irrigation proposé.	209
Figure 6.5 Arbre de décision pour la gestion de l'irrigation.	211
Figure 6.6 Arbre de décision pour la gestion du réservoir d'eau.	211
Figure 6.7 Diagramme de cas d'utilisation du système proposé.	214
Figure 6.8 Diagramme de séquence de la gestion réservoir.	215

Figure 6.9 Diagramme de séquence de la gestion d'irrigation.....	217
Figure 6.10 Diagramme de séquence de la mesure des paramètres d'environnement.....	218
Figure 6.11 Diagramme de classes du système proposé.....	219
Figure 6.12 Plate-forme TelosB.....	223
Figure 6.13 Plate-forme TelosB.....	226
Figure 6.14 Vue d'ensemble du système proposé.....	227
Figure 6.15 Disposition du système d'irrigation proposé.....	229
Figure 6.16 Prototype du système d'irrigation proposé.....	231
Figure 6.17 Algorithme de flux de travail du nœud de capteur de sol.....	232
Figure 6.18 Algorithme de flux de travail du nœud de capteur météorologiques.....	233
Figure 6.19 Algorithme de flux de travail du nœud coordinateur.....	234
Figure 6.20 Schéma synoptique du système proposé.....	235
Figure 6.21 Authentification.....	240
Figure 6.22 Première interface.....	240
Figure 6.23 Exemple d'affichage des données de température du sol.....	241
Figure 6.24 Affichage d'une courbe de données de température.....	241
Figure 6.25 Flux opérationnel du système d'irrigation intelligent utilisant le RCSF.....	243
Figure B. 1 Flux d'informations à travers les différentes phases d'une revue systématique [97].....	271
Figure G. 1 Structure du diagramme bête à cornes.....	279
Figure G. 2 Structure du diagramme pieuvre.....	280

Liste des tableaux

Tableau 3.1 Différence entre les RCSF et les réseaux sans fil classiques.....	82
Tableau 3.2 Différentes technologies des nœuds de capteur.....	105
Tableau 4.1 Stratégie de recherche appliquée.....	124
Tableau 4.2 Protocole du SLR proposé.....	126
Tableau 4.3 Capteurs utilisés dans l'irrigation pour les paramètres météorologiques.....	145
Tableau 4.4 Capteurs utilisés dans l'irrigation pour les paramètres du sol.....	146
Tableau 4.5 Capteurs mentionnés dans la littérature pour obtenir une irrigation de précisions.....	147
Tableau 4.6 Différentes cultures mentionnées dans la littérature pour obtenir une irrigation de précision.....	150
Tableau 4.7 Types de sols mentionnés dans la littérature pour obtenir une irrigation de précision....	151
Tableau 4.8 Stratégies d'irrigation mentionnées dans la littérature pour obtenir une irrigation de précision.....	152
Tableau 4.9 Comparaison des technologies de communication sans fil.....	157
Tableau 4.10 Technologies de communication mentionnées dans la littérature pour obtenir une irrigation de précision.....	159
Tableau 4.11 Synthèse d'une enquête sur les différentes applications du RCSF dans le domaine de l'irrigation.....	161
Tableau 4.12 Résumé des paramètres les plus surveillés dans le domaine de l'irrigation en utilisant le RCSF.....	167
Tableau 5.1 Facteurs influençant la conception et la mise en œuvre du RCSF dans l'irrigation et mesures proposées.....	186
Tableau 5.2 Efficacité d'application de certains articles examinés dans le domaine de l'irrigation et le RCSF.....	193
Tableau 6.1 Procédures et étapes pour la mise en place d'un système d'irrigation intelligent utilisant RCSF.....	202
Tableau 6.2 Rôles des acteurs.....	212
Tableau 6.3 Comparaison de différents systèmes d'irrigation.....	221
Tableau C. 1 Questionnaire d'évaluation de la qualité appliqué.....	272
Tableau D. 1 Procédure de notation du questionnaire d'évaluation de la qualité proposée.....	274
Tableau E. 1 Procédure de notation proposée de la septième question d'évaluation de la qualité.....	275
Tableau F. 1 Extrait de l'évaluation de la qualité de certains articles sélectionnés.....	276
Tableau G. 1 Formulaire d'extraction de données.....	277

Liste des annexes

Annexe A Systematic literature review	268
Annexe B PRISMA	270
Annexe C Questionnaire d'évaluation de la qualité.....	272
Annexe D Procédure de notation du questionnaire d'évaluation de la qualité	274
Annexe E Procédure de notation de la question 7 d'évaluation de la qualité	275
Annexe F Extrait de l'évaluation de la qualité de certains articles	276
Annexe G Formulaire d'extraction de données	277
Annexe H Analyse fonctionnelle.....	278

Liste des abréviations

AEPIT	Eau Potable, Industrielle et Touristique
AODV	Ad hoc On demand Distance Vector Routing
BLR	Boucle Locale Radio
CCC	Condensate Controlled Capacitance
CESE	Conseil Économique Social et Environnemental
CH	Cluster Head
Cieau	Centre de l'information sur l'eau
DSS	Decision Support System
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
DSDV	Destination Sequenced Distance Vector
DEM	Digital Elevation Map
DEPF	Direction des Etudes et des Prévisions Financières
DSN	Distributed Sensor Network
EC	Electrical Conductivity
EM	ElectroMagnetic
EED	End-to-End Delay
ECHERP	Equalized Cluster Head Election Routing Protocol
EC	Exclusion criteria
FSR	Fisheye State Routing
FC	Fonctions contraintes
FP	Fonctions principales
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture)
FEM	Force électro-motrice
FL	Fuzzy Logic
GH	Grande Hydraulique
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communication
GSR	Global State Routing
IC	Inclusion criteria
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat)
ISM	Industrial Scientific Medical
IWMI	International Water Management Institute
J	Joule
JCR	Journal Citation Reports
Kbps	Kbit/s

LS	Link State
LCD	Liquid Crystal Display
LAN	Local Area Network
LMIC	Low and Middle Income Country
LEACH	Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy
LR-WPANs	Low-Rate Wireless Personal Area Networks
MAC	Media Access Control
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems
MWSN	Mobile Wireless Sensor Network
OGC	Open Geospatial Consortium
OLSR	Optimized Link State Routing
ONU	Organisation des Nations Unies
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
OMS	Organisation mondiale de la Santé
PMH	Petite et Moyenne Hydraulique
PMV	Plan Maroc Vert
PA	Precision agriculture
PRISMA	Preferred Reporting Items of Systematic reviews and Meta-Analyses
PIB	Produit intérieur brut
PNEEI	Programme National d'Economie d'Eau en Irrigation
QA	Quality assessment
QoS	Quality of Service
RCSF	Réseau de capteurs sans fil
RF	Radio Frequency
RF model	Random Forest model
RO	Research objectives
RQ	Research question
RTU	Remote terminal unit
SAU	Surface Agricole Utile
SB	Station de base
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SJR	Journal and Country Rank
SLR	Systematic literature review
SoC	System on Chip
SPI	Serial peripheral interface
SPWAS	Solar-Powered Wireless Data Acquisition Stations
SWOT	Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats
TWSN	Terrestrial Wireless Sensor Network
TCP	Transmission Control Protocol
UWSN	Underwater Wireless Sensor Network
URI	Uniform rate irrigation
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

UNICEF	United Nations International Children's Emergency Fund
UM	Unités mobiles
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
UDP	User Datagram Protocol
VRI	Variable rate irrigation
WDAN	Wireless Data Acquisition Network
WiFi	Wireless Fidelity
WISC	Wireless in-field sensing and control
WLAN	Wireless Local Area Network
WMAN	Wireless Metropolitan Area Networks
WPAN	Wireless Personal Area Network
WSAN	Wireless Sensor and Actuation Network
WSN	Wireless Sensor Network
WSN-AC	Wireless sensor network actuator controller
WUSN	Wireless Underground Sensor Network
WWAN	Wireless Wide Area Network
WB	World Bank
WRI	World Resources Institute
WiMax	Worldwide interoperability for Microwave access
ZHLS	Zone-based Hierarchical Link State Protocol

Chapitre 1

Introduction générale

Sommaire

1.1	Contexte.....	24
1.2	Motivations et enjeux.....	25
1.3	Contributions.....	31
1.4	Organisation de la thèse.....	34

1.1 Contexte

La révolution industrielle et les récentes avancées dans les technologies électroniques et les communications sans fil ont conduit au développement de petits capteurs très intelligents avec des solutions à faible puissance et à faible coût. Les nœuds de capteurs apparaissent comme des systèmes autonomes miniaturisés, caractérisés par un prix inférieur, une taille plus petite et un moyen de communication sans fil mais avec peu de ressources. Ces nœuds se composent d'une unité de détection, d'une unité de traitement, d'une unité de transmission et d'une source d'énergie limitée [1]–[3]. Cette fusion de systèmes intégrés et de communications sans fil a également donné naissance à un type particulier de réseau ad hoc, à savoir le réseau de capteurs sans fil (RCSF), qui nous aide à modifier la façon dont nous vivons, travaillons et interagissons avec notre environnement. Un RCSF est souvent considéré comme le successeur des réseaux ad hoc. Il se définit comme un réseau de dispositifs sans fil, appelés nœuds, qui intègrent des capacités de traitement, de communication et d'acquisition et communiquent par des liaisons sans fil. Le RCSF collecte un ensemble de conditions physiques ou environnementales afin de les transmettre de manière coopérative et autonome vers des points de traitement pour contrôler un phénomène particulier [4]–[7]. Le réseau de capteurs remplit trois fonctions fondamentales : la communication, la détection et la sensation, ainsi que le calcul et l'analyse, ce qui le rend actif dans la création d'environnements intelligents [5].

L'agriculture est considérée comme l'épine dorsale de l'économie dans la plupart des pays du monde et constitue souvent la principale source de revenus pour de nombreux agriculteurs dans le monde. L'irrigation est un facteur clé pour le secteur agricole. C'est une pratique importante pour la plupart des cultures dans les régions où le taux de précipitations n'est pas suffisant pour satisfaire les besoins en eau des cultures, car une irrigation insuffisante entraîne généralement une réduction de la qualité et du rendement des cultures [8]. Le secteur agricole est l'un des secteurs les plus consommateurs d'eau dans le monde ; cette dernière est principalement utilisée pour l'irrigation [9]–[11]. L'eau utilisée pour l'irrigation représente actuellement environ 70 % des prélèvements d'eau dans le monde et près de 90 % de l'utilisation de l'eau consommée [9], [12]. Cependant, la plupart des techniques d'irrigation utilisées sont principalement basées sur les techniques traditionnelles et le travail manuel et restent donc inefficaces avec un faible rendement [13], [14]. Ces techniques ne visent qu'à contrôler la distribution de l'eau aux endroits requis sans compromettre les besoins en eau, et par conséquent, une grande quantité d'eau est perdue lors de chaque opération d'irrigation. En

outre, plusieurs zones peuvent être affectées par l'augmentation ou la diminution de la quantité d'eau utilisée pendant l'irrigation. Les régions sous-irriguées sont sujettes à une mauvaise production et au stress hydrique, tandis que les régions sur-irriguées sont affectées par les maladies des plantes.

Malgré le rôle important joué par le secteur agricole, certaines raisons affectent sérieusement ce secteur, principalement l'irrigation. La crise mondiale de l'eau [15]–[17] est un problème critique dans le monde qui entraîne une grave diminution des ressources en eau et constitue une menace croissante ces dernières années. Il convient de noter que les réserves d'eau douce ont diminué [18], [19], ce qui ne représente qu'environ 3 % de l'eau totale sur la terre où la plupart de l'eau est stockée sous forme d'eaux souterraines profondes ou de glaciers et seule une petite quantité est disponible pour l'utilisation humaine [20], [21]. Le changement climatique [22], [23], la sécheresse [24], les risques de salinité et la pollution de l'eau ; toutes ces raisons conduisent à une dangereuse diminution des ressources en eau, jour après jour, et affectent également gravement le secteur agricole, en particulier l'irrigation.

Par conséquent, il existe maintenant un besoin urgent pour l'utilisation de nouvelles technologies telles que les RCSF pour soutenir l'irrigation en développant et en améliorant les techniques de surveillance intelligente des paramètres environnementaux et les capacités de prise de décision afin de déterminer les besoins en eau et en irrigation pour chaque culture dans une zone particulière à un moment donné, tout en économisant l'eau et en augmentant le rendement et la qualité de la productivité des cultures. À cet égard, la technologie des réseaux de capteurs sans fil est une technologie idéale qui combine plusieurs capacités et caractéristiques pour obtenir de nombreux avantages et offrir des solutions économiques et efficaces pour le système d'irrigation.

1.2 Problématique, motivations et enjeux

Comme la plupart des pays africains, l'agriculture au Maroc est un secteur économique très important, car elle reste la principale source d'emplois dans le pays et dont vit 40% de la population active [25], [26]. Ce secteur a donc toujours été un point stratégique pour le développement social et économique du pays.

L'agriculture irriguée a fait ses preuves en tant que composante de l'économie régionale et nationale au Maroc : elle contribue à environ 45% du produit intérieur brut (PIB) agricole (bien qu'elle n'occupe que 15% de la surface cultivée) et peut atteindre 75% pendant les années de sécheresse [27], [28]. De plus, elle contribue en moyenne à 50% des emplois ruraux

et ses produits représentent 75% des exportations agricoles [27], [28]. Par ailleurs, une étude réalisée par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) [13], portant sur 93 pays à climat semi-aride, a montré que le développement agricole dépend de la possibilité d'étendre, de maintenir et d'améliorer l'agriculture irriguée [29].

Cependant, étant donné qu'une grande partie du territoire marocain est située dans des zones désertiques et arides [30] et que le Maroc est très vulnérable aux effets du changement climatique. Selon les prévisions [30], le pays présentera progressivement, au cours des prochaines décennies, des signes d'aridité croissante en raison de la baisse des précipitations et de la hausse des températures. Combiné avec la politique agricole marocaine qui est orientée vers l'exportation plutôt que vers uniquement l'autosuffisance, tout ceci crée une forte pression sur les ressources en eau. L'irrigation au Maroc consomme énormément de ressources en eau, il est estimé qu'environ 86% des ressources en eau disponibles sont utilisées par le secteur agricole et donc l'irrigation [30]. Selon le Conseil économique, social et environnemental (CESE) [31], « La situation de pénurie hydrique au Maroc est alarmante puisque ses ressources en eau sont actuellement évaluées à moins de 650 m³/hab./an, contre 2500 m³ en 1960, et devraient baisser en deçà de 500 m³ à l'horizon de 2030 » [32], ce qui place le Maroc en état de stress hydrostructurel.

Pour relever ces défis, le gouvernement marocain a placé ces dernières années le secteur agricole au centre de ses options de développement. A cet égard, le «Plan Maroc Vert (PMV)» a été lancé en 2008, qui est un programme de promotion du secteur agricole en augmentant la production agricole tout en rationalisant l'eau d'irrigation [33]. Selon une étude réalisée par la Direction des Etudes et des Prévisions Financières (DEPF) [34], les actions mises en œuvre dans le cadre du PMV ont permis la réalisation d'une superficie qui adopte l'irrigation localisée (goutte-à goutte) d'environ 560 000 hectares à la fin de 2018 (soit 37% de la superficie totale irriguée au niveau national), qui représente un gain effectif en eau de plus de 1,6 milliard de m³ par an. Toutefois, nous constatons une diminution de l'efficacité de l'eau d'irrigation. Cette faible efficacité de l'eau d'irrigation résulte essentiellement de la poursuite des pratiques traditionnelles, en particulier l'irrigation par gravité, car une grande partie des surfaces irriguées subit encore une irrigation gravitaire, soit environ 63%, avec une faible efficacité, soit environ 50% [34].

Par ailleurs, malgré le rôle majeur joué par le secteur agricole dans le monde, certaines raisons affectent sérieusement ce secteur, principalement l'irrigation. Plusieurs études cherchant à prévoir les tendances futures ont donné des résultats mitigés. Certaines de ces études sont énumérées comme suit.

- Ces dernières années, la pénurie d'eau est une crise aiguë qui a un impact énorme sur l'agriculture et, par conséquent, sur la production alimentaire. L'eau couvre 70 % de notre planète, il semble qu'elle sera toujours abondante [21], [35], [36]. Pourtant, l'eau douce (c'est-à-dire celle que nous buvons, qui irrigue les terres, par exemple) est incroyablement rare. Seulement environ 3 % de l'eau du monde est de l'eau douce, dont 1 % est disponible pour l'usage humain et deux tiers sont indisponibles pour l'usage ou cachés dans des glaciers gelés [21], [37], [38]. De plus, la croissance de la population, l'irrigation agricole accrue, et d'autres utilisations de l'eau permettent de minimiser le taux de ressources en eau, et en conséquence, environ 2 milliard de personnes dans le monde n'ont pas directement accès à l'eau [9], [39], et près de 4 milliards trouvent l'eau rare pendant au moins un mois par an, car la pénurie d'eau est souvent un phénomène saisonnier plutôt qu'un phénomène annuel [40].
- En raison de la croissance de la population, la demande de production alimentaire augmente également. Des rapports de la FAO [41] avertissent qu'il y a plus qu'assez de nourriture produite dans le monde pour nourrir tout le monde, la faim dans le monde est en augmentation : le nombre estimé de personnes sous-alimentées est passé de 777 millions en 2015 à 815 millions en 2016.
- Selon un rapport de la FAO [42] et Rockström et al. [43], l'agriculture est la source de subsistance de nombreuses personnes dans le monde ; près de 2,5 milliards de ruraux tirent directement leurs moyens de subsistance de l'agriculture.
- D'après l'Organisation des Nations unies (ONU) [14], d'ici 2050, la demande en eau devrait augmenter de 55 % (c.-à-d., non seulement sous la pression d'une population croissante mais aussi parce que la consommation augmente) [9], [44]. En plus, les besoins de l'agriculture devraient exploser à l'avenir car, entre 1961 et 2009, les terres cultivées ont augmenté de 12 %, tandis que les surfaces irriguées ont augmenté de 117 % [44].
- Burek et al. [45] estiment que l'utilisation mondiale de l'eau continuera probablement à croître à un rythme annuel d'environ 1 %, ce qui entraînera une augmentation de 20 à 30 % par rapport au niveau actuel d'utilisation de l'eau d'ici 2050. Cela est confirmé par le système mondial d'information de la FAO sur les ressources en eau et la gestion de l'eau agricole (AQUASTAT) [46] et un rapport publié par l'ONU [9], à savoir que l'utilisation d'eau douce dans le monde a été multipliée par six au cours des 100 dernières années et continue de croître à un rythme d'environ 1 % par an depuis les années 80.

- Selon la FAO et l'ONU, le secteur agricole est le plus grand consommateur d'eau au monde [9], [11], [47] ; seule l'irrigation utilise plus des deux tiers de l'eau des lacs, des rivières et des aquifères de la planète. De plus, les terres irriguées donnent de meilleurs rendements que les terres non irriguées, et plus de 40 % de l'augmentation de la production alimentaire provient des zones irriguées, même si la superficie actuelle de ces terres ne représente que 20% des terres cultivées [10], [11], [42].
- Un changement climatique alarmant : Le changement climatique est considéré comme un énorme problème, les estimations indiquent qu'il continuera à se modifier au cours de ce siècle et au-delà. D'ici 2030, la température moyenne de la terre se situera en dehors de la fourchette normale, et elle devrait ensuite augmenter d'au moins 1,5 °C, indique les rapports de l'ONU [11] et du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (IPCC) [48]. Ces changements ont le plus grand impact sur la nation, sont la principale raison de la fluctuation à court terme de la production agricole en Asie du Sud, en Afrique subsaharienne et dans de vastes zones d'autres régions en développement, et se combinent pour réduire l'eau disponible pour la production d'énergie, pour l'agriculture (principalement l'irrigation) et pour les écosystèmes dans le monde entier [22], [49], [50].
- La sécheresse est un résultat du changement climatique qui constitue un type de stress hydrique. Cette dernière a également un impact direct et énorme sur l'agriculture, que ce soit dans le passé, le présent ou le futur [51], [52]. Pendant la période de sécheresse, une partie de l'eau agricole attribuée a été transférée à un autre secteur, ce qui a entraîné un manque d'eau d'irrigation pour les agriculteurs.
- Les systèmes traditionnels d'irrigation ne donnent pas souvent les résultats escomptés car une grande partie de l'eau s'évapore au lieu de nourrir les plantes, sans parler des fuites et autres pertes. En outre, les eaux de surface et les eaux souterraines peuvent être contaminées par une irrigation massive.
- La pollution et la contamination de l'eau sont un autre problème crucial pour l'agriculture, en particulier en raison de l'irrigation.

Compte tenu des défis et des enjeux cités ci-dessus, les pays appliquent des techniques spéciales et font des efforts supplémentaires pour soutenir le secteur agricole. L'utilisation de nouvelles technologies dans ce secteur, afin d'offrir un choix optimal pour la collecte et le traitement des informations en vue d'améliorer la productivité, de réduire les effets néfastes sur l'environnement et de diminuer la consommation d'eau dans l'agriculture et ainsi atténuer

la crise mondiale de l'eau. Pour atteindre ces objectifs, le besoin d'automatisation et de prise de décision intelligente devient de plus en plus important. Des technologies telles que les réseaux de capteurs sans fil [53]–[61], l'Internet des objets (IoT) [62]–[65] et l'informatique en nuage [66]–[68] peuvent soutenir le secteur agricole et réduire considérablement la consommation d'eau dans l'agriculture.

Parmi toutes ces technologies, le domaine de l'agriculture est le plus exploré en termes d'application du sans fil pour améliorer les méthodes agricoles traditionnelles [1], [4], [6], [55]–[58], [60], [69]. La technologie des systèmes micro-électro-mécaniques (MEMS) a permis la création de capteurs de petite taille et peu coûteux. La nature omniprésente du fonctionnement, associée à de petits nœuds auto-organisés, à une technologie évolutive et rentable, fait des RCSF un outil potentiel pour atteindre l'objectif d'automatisation des services agricoles tels que l'irrigation, la fertilisation et la pulvérisation de pesticides. L'un des services les plus vitaux dans le domaine agricole est l'irrigation, car l'irrigation est un élément indispensable dans ce domaine et joue un rôle très important dans l'amélioration des rendements et l'augmentation de la production agricole [47] afin de répondre aux besoins alimentaires d'une population en croissance rapide [70]. Comme nous l'avons déjà conclu, bien qu'elle présente des avantages économiques et sociaux indéniables, elle contribue également à la surexploitation de la plupart des ressources en eau souterraine et à la baisse inquiétante des niveaux de nombreuses nappes phréatiques, ainsi qu'à la détérioration de la qualité de l'eau, étant donné que les systèmes d'irrigation utilisés sont encore inefficaces et peu performants. De ce fait, l'irrigation est également considérée comme une source de gaspillage d'eau dans le monde.

Les réseaux de capteurs sans fil présentent des caractéristiques intrinsèques au niveau des nœuds de capteurs et au niveau du réseau formé par ces nœuds [71]–[74], telles que la possibilité d'appliquer les RCSF dans presque tous les types d'environnements que ce soit en milieu urbain [75] ou en milieu rural [76], la topologie dynamique, la flexibilité, l'auto-organisation, l'évolutivité et la collaboration des nœuds de capteurs entre eux. Tout cela a conduit à l'implication et au développement des RCSF en tant qu'application potentielle dans divers domaines tels que le médical, l'industrie, l'environnement, l'agriculture et le militaire [77]–[80]. L'un des domaines d'application prometteurs du RCSF est l'agriculture où cette technologie offre un soutien important qui conduira l'agriculture, et donc l'irrigation, dans une direction très positive et offrira des solutions efficaces et économiques, ainsi que la gestion et la planification d'un système d'irrigation précis et automatisé avec un niveau élevé d'efficacité, d'automatisation et de précision ; ce qui permet de réduire la quantité d'eau utilisée et

d'augmenter le rendement et la qualité de la production agricole. Par ailleurs, le choix de cette technologie pour résoudre les problèmes du domaine de l'irrigation a été un avantage pour le développement de l'agriculture et sera certainement un atout pour les agriculteurs et les autorités de gestion de l'eau.

Cependant, en raison d'un ensemble de limitations affectant la conception et la mise en œuvre des RCSF [4], [6], [81], tels que la faible puissance des batteries, la capacité de calcul limitée, la petite mémoire des nœuds de capteurs, les coûts et le type d'environnement, lors de la mise en œuvre d'un RCSF, les chercheurs sont confrontés à de nombreux enjeux et problèmes tels que la sécurité, le déploiement, l'architecture et la localisation [82]–[84]. Ces limitations posent également des défis dans la conception des applications de RCSF dans les services agricoles. De même, lors de la conception du RCSF dans le domaine de l'irrigation, nous constatons que de nombreux facteurs influencent cette application, tels que le boîtier du nœud de capteurs, la consommation et la gestion de l'énergie et le coût. Par conséquent, il est important de prêter attention à ces facteurs qui affectent l'utilisation des RCSF dans l'irrigation afin d'améliorer les performances et d'atteindre les résultats souhaités.

Dans cet ordre d'idées, nous nous intéresserons particulièrement dans cette thèse aux contributions de la technologie des RCSF dans le domaine de l'irrigation. Dans un premier temps, nous présenterons une revue systématique exhaustive de la littérature (SLR), plus récente et approfondie, qui vise à examiner, étudier et analyser l'application et l'utilisation du RCSF dans le domaine de l'irrigation. Dans un deuxième temps, nous aborderons dans cette thèse trois aspects principaux liés au RCSF dans le domaine de l'irrigation. Le premier axe consistera à fournir une analyse des principaux facteurs qui affectent les RCSF en général. Le deuxième axe sera le principal et visera à présenter une étude et une analyse des principaux facteurs qui affectent les RCSF dans le domaine de l'irrigation. Par ailleurs, le troisième axe aura pour but de réaliser une analyse SWOT pour évaluer l'utilisation du RCSF dans l'irrigation au Maroc en termes de forces, faiblesses, opportunités et menaces afin de mieux comprendre ce type d'application. Finalement, nous proposerons une solution pour un système d'irrigation intelligent utilisant le RCSF.

1.3 Contributions

Notre première contribution à cette thèse est de fournir une revue systématique exhaustive de la littérature dans le domaine de l'irrigation basé sur des réseaux de capteurs sans fil. Dans ce SLR, nous considérons des articles impliquant tout type de système d'irrigation basé sur RCSF. Sur un total de 800 articles de recherche publiés dans des sources réputées entre 2008 et 2019 qui ont été compilées, après avoir examiné et analysé ces articles, nous excluons ceux qui n'offrent que des informations partielles et un total de 80 articles ont été inclus dans cette étude.

Une recherche de littérature scientifique a été menée pour identifier l'existence de revues systématiques dans ce contexte. Nous avons trouvé de rares revues de la littérature sur ce sujet, notamment des revues systématiques considérées comme très rares. De plus, nous n'avons pas trouvé de revues systématiques couvrant tous les éléments de la question de recherche principale de notre sujet d'étude. Par conséquent, grâce à ce travail, nous comblons les lacunes actuelles dans la littérature en présentant une revue systématique plus récente et approfondie visant à examiner, étudier et analyser l'application et l'utilisation des RCSF dans le domaine de l'irrigation. Les contributions de ce travail sont les suivantes. Nous présentons la méthodologie de la revue systématique utilisée pour développer cette étude en définissant plusieurs étapes, dont les objectifs de recherche, les questions de recherche, les critères d'inclusion et d'exclusion, l'évaluation de la qualité des articles et la stratégie de recherche, afin de collecter des études pertinentes efficaces. Nous fournissons un aperçu de l'application et de l'utilisation des RCSF dans le domaine de l'irrigation. Par ailleurs, nous effectuons une analyse complète des différents capteurs utilisés pour mettre en œuvre des systèmes d'irrigation intelligents basés sur des RCSF, tout en identifiant les paramètres les plus surveillés dans ce contexte. Nous effectuons également une analyse complète des types de cultures, des sols et des techniques d'irrigation les plus courants utilisés pour l'irrigation avec RCSF. De plus, nous réalisons une analyse complète des technologies de communication sans fil utilisées dans ce contexte. Nous résumons et discutons les résultats de notre étude en présentant une synthèse de divers travaux et recherches sélectionnés concernant l'utilisation et l'application de la technologie RCSF dans le domaine de l'irrigation, en plus d'un résumé des paramètres les plus surveillés dans le domaine de l'irrigation en utilisant RCSF.

Ces contributions ont été publiées dans :

- Hamami L., Nassereddine B., 2020. Application of wireless sensor networks in the field of irrigation: A review. *Computers and Electronics in Agriculture - Elsevier*, 179 (2020), 105782.
- Hamami L., Nassereddine B., 2021. A guide to performing a systematic literature review on applications of wireless sensor networks in irrigation. (Sous revision)

Lors de la mise en œuvre de réseau de capteurs sans fil dans le domaine de l'irrigation, nous constatons que de nombreux facteurs influencent cette application et doivent être pris en considération pour améliorer les performances de ce réseau et obtenir les résultats souhaités. Cependant, les études disponibles n'ont pas abordé de manière exhaustive et approfondie les facteurs affectant l'utilisation des RCSF dans l'irrigation. A cet effet, notre deuxième contribution à cette thèse vise à identifier, étudier et analyser les principaux facteurs qui influencent les RCSF dans le domaine de l'irrigation. Elle vise également à fournir une analyse des principaux facteurs qui affectent les RCSF en général. Par ailleurs, elle a pour objectif de réaliser une analyse SWOT pour évaluer l'utilisation du RCSF dans l'irrigation au Maroc en termes de forces, faiblesses, opportunités et menaces. Ainsi, à travers ce travail, nous comblons les lacunes actuelles dans ce domaine en abordant les trois aspects mentionnés ci-dessus. Pour mener à bien ce travail, nous considérons les questions de recherche suivantes : Quels sont les principaux facteurs à prendre en compte lors de la conception d'un réseau de capteurs sans fil en général et plus particulièrement dans le domaine de l'irrigation ? Quelles mesures et solutions doivent être prises ? Y a-t-il des facteurs à améliorer pour obtenir un système d'irrigation efficace et cohérent grâce au RCSF ? Quelles sont les forces, faiblesses, opportunités et menaces (SWOT) de l'utilisation du RCSF dans l'irrigation au Maroc ?

Les contributions de ce travail sont les suivantes. Nous présentons une analyse des principaux facteurs affectant les réseaux de capteurs sans fil, notamment le facteur d'échelle, la topologie du réseau, la durée de vie du réseau, la tolérance aux pannes et le déploiement des nœuds de capteurs. Par ailleurs, nous identifions, étudions et analysons les principaux facteurs qui doivent être pris en compte lors de la conception d'un réseau de capteurs sans fil dans le domaine de l'irrigation, notamment le boîtier du nœud de capteurs, le coût, la consommation et la gestion de l'énergie, la taille et le déploiement du nœud de capteurs et le placement du nœud de capteurs. Nous proposons également un ensemble de procédures et de solutions à suivre pour surmonter les défis liés à l'utilisation du RCSF en irrigation. Nous mettons également en évidence un certain nombre de facteurs d'amélioration pour parvenir à un système d'irrigation efficace et cohérent utilisant le RCSF. En outre, nous effectuons une

analyse SWOT pour évaluer les forces, les faiblesses, les opportunités et les menaces de l'utilisation du RCSF dans l'irrigation au Maroc dans le but de mieux comprendre ce type d'application, étant donné que ce type d'analyse n'a pas été largement effectué par les chercheurs dans ce domaine.

Ces contributions ont été publiées dans :

- Hamami L., Nassereddine B., 2021. Factors influencing the use of wireless sensor networks in the irrigation field. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 12(3), 2021.
- Hamami L., Nassereddine B., 2019. A Study of the Main Factors Affecting Wireless Sensor Networks. In: 2019 Third International conference on IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud (I-SMAC). IEEE, pp. 211-215.

En effet, en raison du manque de ressources en eau, l'adoption d'un système d'irrigation optimal est devenue une nécessité. Dans ce cadre, notre troisième contribution à cette thèse est d'étudier un scénario d'un système d'irrigation intelligent en utilisant les réseaux de capteurs sans fil. Par conséquent, nous proposons une solution pour un système d'irrigation intelligent utilisant RCSF. Le système proposé est basé sur un RCSF, qui utilise un ensemble de nœuds de capteurs spécifiques pour effectuer des mesures des caractéristiques météorologiques et du sol afin d'aider à prendre des décisions concernant le système d'irrigation, dans le but de le contrôler correctement.

Les contributions de ce travail sont les suivantes. Nous proposons une méthodologie pour la mise en œuvre d'un système automatisé typique pour gérer intelligemment l'irrigation en utilisant le RCSF en définissant un ensemble de règles de base, d'étapes et de procédures à suivre ainsi qu'une structure typique. Par ailleurs, nous effectuons une analyse fonctionnelle du système d'irrigation proposé en présentant le diagramme bête à corne, le diagramme pieuvre et la carte mentale pour définir clairement et formaliser les objectifs de ce système. Nous présentons également une étude conceptuelle du système étudié en montrant ces différentes fonctionnalités souhaitées et en décrivant les différentes interactions qui existent. Nous fournissons une description détaillée du système d'irrigation à travers une présentation d'un ensemble de technologies, de méthodes et d'outils qui seront utilisés, ainsi qu'une présentation du prototype, des architectures, des sous-systèmes et du flux de travail.

Ces contributions ont été publiées dans :

- Loubna H., Bouchaib N., 2020. Wireless Sensor Network Application for Intelligent Irrigation System. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*, 12 (3 Special Issue), 163–173.
- Hamami L., Nassereddine B., 2018. Towards a Smart Irrigation System based on Wireless Sensor Networks (WSNs). In : *Proceedings of the 1st International Conference of Computer Science and Renewable Energies*, Vol. 1 - ICCSRE, ISBN 978-989-758-431-2, pp. 433-442. K. Salah-ddine et al., ICCSRE 2018 Book (2020). SciTePress Digital Library.
- Hamami L., Nassereddine B., 2018. Integration of irrigation system with wireless sensor networks: prototype and conception of intelligent irrigation system. *Lecture Notes in Engineering and Computer Science* 2238, pp. 56–62. Newswood Limited. ISSN: 2078-0958.
- Hamami L., Nassereddine B., 2016. Toward an intelligent irrigation based on wireless sensor network (WSN) in Morocco. *International Workshop on New Services and Networks 2016 (WNSN'16)*, Mai 2016.

1.4 Organisation de la thèse

Cette thèse est composée de six chapitres. Après l'introduction générale qui représente le premier chapitre, le chapitre deux est consacré à la présentation des thématiques et des concepts qui ont permis de comprendre le contexte problématique de cette recherche. Il est dédié à la présentation de thématiques suivantes : l'agriculture de précision, l'irrigation de précision et la crise mondiale de l'eau. Dans ce chapitre, nous donnerons d'abord un aperçu de la crise de l'eau dans le monde et au Maroc. Puis, nous nous intéresserons à la situation de l'agriculture au Maroc, aux ressources en eau disponibles et aux systèmes d'irrigation en place afin de dresser un ensemble de déficits qui existent à ce niveau. Finalement, nous présenterons une vue générale sur l'agriculture de précision et l'irrigation de précision.

Le chapitre trois présente une description détaillée des capteurs et des réseaux de capteurs sans fil. Dans ce chapitre, nous donnerons d'abord une vue générale sur les réseaux sans fil. Ensuite, nous donnerons une présentation détaillée sur les réseaux de capteurs sans fil en décrivant leur fonctionnement, leurs domaines d'applications, leurs caractéristiques, leur situation par rapport aux autres réseaux sans fil, leurs classifications, leurs architectures, leur

pile protocolaire ainsi qu'un bref aperçu du routage en RCSF. Nous clôturons ce chapitre par une présentation des nœuds de capteurs.

Le chapitre quatre présente notre première contribution à cette thèse. Il s'agit de fournir une revue systématique exhaustive de la littérature dans le domaine de l'irrigation basé sur des réseaux de capteurs sans fil. Dans ce chapitre, nous présenterons d'abord la méthodologie de la revue systématique utilisée pour développer cette étude en définissant plusieurs étapes pour collecter des études pertinentes liées au domaine de l'irrigation basée sur les réseaux de capteurs sans fil. Deuxièmement, nous donnerons un aperçu de la littérature à partir des articles sélectionnés. De plus, nous démontrons l'importance des capteurs et des réseaux de capteurs sans fil dans le domaine de l'irrigation. Ensuite, nous présenterons les résultats de cette étude. Nous fournirons une analyse complète des différents capteurs utilisés pour mettre en œuvre des systèmes d'irrigation intelligents basés sur des réseaux de capteurs sans fil, tout en identifiant les paramètres les plus surveillés dans ce contexte. Nous fournirons également une analyse complète des types de cultures, de sols et de techniques d'irrigation les plus couramment utilisées dans le domaine de l'irrigation en utilisant RCSF. Par ailleurs, nous fournirons une analyse complète des technologies de communication sans fil utilisées pour mettre en œuvre des systèmes d'irrigation intelligents basés sur RCSF. Nous concluons ce chapitre par un résumé de nos résultats en présentant une synthèse des différents travaux et recherches sélectionnés liés à l'utilisation et à l'application de la technologie RCSF dans le domaine de l'irrigation ainsi qu'un résumé des paramètres les plus surveillés dans le domaine de l'irrigation en utilisant RCSF.

Le chapitre cinq constitue notre deuxième contribution à cette thèse. Il vise à aborder trois aspects liés aux réseaux de capteurs sans fil dans le domaine de l'irrigation qui sont : les principaux facteurs affectant les RCSF, les principaux facteurs affectant les RCSF dans le domaine de l'irrigation et une analyse SWOT pour évaluer l'utilisation du RCSF dans l'irrigation au Maroc. Dans ce chapitre, nous présenterons d'abord une analyse des principaux facteurs affectant les réseaux de capteurs sans fil. Deuxièmement, nous identifierons, étudierons et analyserons les principaux facteurs qui doivent être pris en compte lors de la conception d'un RCSF dans le domaine de l'irrigation. Nous proposerons également un ensemble de procédures et de solutions à suivre pour surmonter les défis de la conception et du déploiement de ce type d'application. Ensuite, nous présenterons une synthèse dans ce contexte ainsi que nous mettrons en évidence un certain nombre de facteurs d'amélioration

pour obtenir un système d'irrigation efficace et cohérent utilisant le RCSF. Enfin, nous présenterons les avantages de l'utilisation de la technologie RCSF dans le domaine de l'irrigation et nous effectuerons une analyse SWOT pour évaluer les forces, les faiblesses, les opportunités et les menaces de l'utilisation du RCSF dans le domaine de l'irrigation au Maroc.

Le chapitre six présente notre troisième contribution à cette thèse. Dans ce chapitre, nous présenterons et détaillerons la solution proposée pour un système d'irrigation intelligent utilisant le RCSF. Dans la première partie de ce chapitre, nous proposerons une méthodologie pour la mise en œuvre d'un système automatisé typique pour gérer intelligemment l'irrigation à l'aide de réseaux de capteurs sans fil. Dans la deuxième partie, nous présenterons une analyse fonctionnelle du système d'irrigation proposé. Une étude conceptuelle de ce dernier sera présentée en troisième partie. Ensuite, nous présenterons et décrirons l'ensemble des technologies, méthodes et outils qui seront utilisés dans la solution proposée, à savoir le système d'irrigation, la technologie de communication sans fil et les types de capteurs utilisés. Une description détaillée du système d'irrigation sera également présentée, dans laquelle le prototype et les architectures de ce système, ainsi que les sous-systèmes et le flux de travail seront exposés.

Finalement nous conclurons cette thèse par une conclusion et présenterons les différentes perspectives et directions des futures recherches.

Chapitre 2

Crise mondiale de l'eau et Agriculture et Irrigation de précision : Notions, concepts et chiffres

Sommaire

2.1	Introduction.....	38
2.2	Crise mondiale de l'eau : Vue d'ensemble.....	38
2.3	Agriculture, irrigation et ressources hydrauliques au Maroc.....	47
2.4	Agriculture de précision.....	65
2.5	Irrigation de précision.....	67
2.6	Conclusion.....	69

2.1 Introduction

L'eau est ce qui garde le monde en vie, cette ressource est un élément clé qui permet de générer et garder la richesse de l'agriculture. Au Maroc, le secteur agricole est le plus gourmand en eau, mais les ressources hydriques disponibles demeurent très limitées, outre les grandes périodes de sécheresse, le manque d'eau et l'accroissement constant de son utilisation dans l'agriculture. Tout ça, nous conduit à réfléchir continuellement sur les économies d'eau. Ceci doit être traduit par une gestion efficace de l'irrigation ainsi que le choix adéquat du système d'irrigation afin d'avoir un système complet et autonome qui permettra de mieux gérer l'irrigation et l'utilisation de l'eau.

Dans ce chapitre, nous donnerons d'abord un aperçu de la crise de l'eau dans le monde et au Maroc. Ensuite, nous nous concentrerons sur la situation de l'agriculture au Maroc, les ressources en eau disponibles et les systèmes d'irrigation en place, pour présenter un ensemble de déficits qui existent à ce niveau. Deuxièmement, nous présenterons une vue générale sur l'agriculture de précision et l'irrigation de précision.

2.2 Crise mondiale de l'eau : Vue d'ensemble

2.2.1 Crise mondiale de l'eau

Au cours des dernières décennies, une grave crise de l'eau touche le monde entier. La pénurie d'eau est une préoccupation croissante à l'échelle mondiale dans les pays arides ainsi que dans les pays relativement plus humides. A première vue, l'eau semble la ressource la plus abondante sur terre. Il y a seulement 3% d'eau qui est douce, représentant environ 35,2 millions de milliards de mètres cubes, où la plus grande partie de cette eau est stockée sous forme de glacier, environ 70 %, ou d'eau souterraine profonde, environ 29%, et seulement une petite quantité d'eau, environ 1%, est disponible pour l'utilisation humaine [21], [37], [38]. Le reste de l'eau sur terre n'est pas disponible pour une utilisation, ni pour l'agriculture ni pour la consommation, représentant environ 97 % de l'eau salée et contenue dans les océans [21]. Les ressources en eau douce ne sont pas extensibles, la demande explose sous l'effet d'une croissance rapide de la population mondiale qui puise dans les réserves de la planète, et d'une augmentation exponentielle de la consommation.

Selon plusieurs rapports présentés dans ce contexte, on constate :

- Selon des données fournies par l'ONU [14], d'ici 2030, la moitié de la population mondiale pourrait faire face à la crise de l'eau et devrait vivre dans des conditions de stress hydrique.
- Selon un rapport de l'ONU [85], la population mondiale devrait augmenter de 2 milliards de personnes, passant de 7,7 milliards actuellement à 9,7 milliards en 2050. La pression démographique augmente la demande en eau, soit une augmentation de 55% de la demande mondiale en eau entre 2000 et 2050, passant de 3 500 à 5 425 km³ [44], [86].
- D'après les données d'un rapport du Forum économique mondial [87], la crise mondiale de l'eau en 2020 s'est classée cinquième dans la liste des problèmes qui menacent la survie de l'humanité.
- D'après un rapport commun de Le Fonds des Nations unies pour l'enfance (UNICEF) et de l'Organisation mondiale de la Santé (OMS) [88], une personne sur 3 dans le monde n'a pas accès à de l'eau potable. Au total, 844 millions de personnes n'ont toujours pas d'accès à l'eau près de chez elles [14], [21].
- Selon l'UNICEF [89], dans le monde entier, les femmes et les filles passent 200 millions d'heures à chercher et à collecter de l'eau chaque jour.
- Selon un rapport de l'Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO) [90], environ 3,6 milliards de personnes vivent déjà dans des zones qui sont potentiellement déficitaires en eau pendant au moins un mois par an. Ces chiffres pourraient atteindre 5,7 milliards d'ici 2050 [90].
- Selon le Centre de l'Information sur l'eau (Cieau) [91], Moins de 40 %, soit la part de la population qui a accès à l'eau potable dans certains pays tels que le Tchad, l'Éthiopie, le Cambodge ou l'Afghanistan.

La crise de l'eau ne se limite pas aux pays en développement, mais peut toucher même les pays développés.

Par exemple, en Afrique, la demande d'eau a considérablement augmenté, multipliée par 4 au cours des 40 dernières années, à ce rythme la limite maximale du potentiel hydrique sera atteinte avant l'an 2050 et des millions de personnes pourraient souffrir de pénurie d'eau [13], [21], [91].

D'autre exemple, aux Etats-Unis, la population a doublé depuis 1900, mais la consommation d'eau par personne a été multipliée par huit à cause de la technologie et le progrès du niveau de vie. Aujourd'hui, les Américains utilisent en moyenne plus de 382 litres d'eau par

personne et par jour, dépassant de beaucoup le minimum de 78 litres par jour estimé nécessaire pour les besoins vitaux, l'hygiène et la production de nourriture [13], [21], [91].

2.2.2 Causes et raisons de la crise mondiale de l'eau

De nombreux facteurs sont en cause. Le monde est témoin des changements climatiques dangereux et d'une croissance démographique rapide.

Le changement climatique est considéré comme l'un des défis politiques et scientifiques les plus dangereux et les plus urgents dans le temps présent [23], [92]. Les émissions de gaz à effet de serre telles que le dioxyde de carbone, p. ex., une augmentation de plus de 50% des émissions de CO₂ a été enregistré depuis 1990 [93], continuent à augmenter à un rythme plus rapide au cours des dernières années qui augmentent l'intensité du réchauffement climatique [48], [94]. Ce réchauffement [95] provoque des modifications multiples et durables dans notre système climatique. Un rapport réalisé par l'IPCC [96] indique que les risques climatiques futurs dépendent du pic, de la durée, et du taux du réchauffement climatique. Ce rapport indique également que ces risques seront plus importants si le réchauffement climatique dépasse 1,5 ° C avant de revenir à ce niveau d'ici 2100. Les effets du changement climatique se font déjà sentir partout dans le monde et s'aggravent d'année en année. De nombreux pays dans le monde vivent avec ces effets tels que la variabilité des précipitations et des approvisionnements en eaux de surface, les inondations, l'élévation du niveau des mers, les longues et graves périodes de sécheresse [24], et la diminution des ressources en eau disponibles [97], [98].

La Figure 2.1 montre des anomalies dans les températures mondiales moyennes dans ces dernières années. Au niveau mondial, la température moyenne à la surface de la planète a augmenté de près de 0,9 °C depuis le XIXe siècle [11]. La majorité de ce réchauffement est survenu lors des 40 dernières années, et les dix années les plus chaudes qui aient été enregistrées sont survenues après 2010 [11], [99] (voir Figure 2.2).

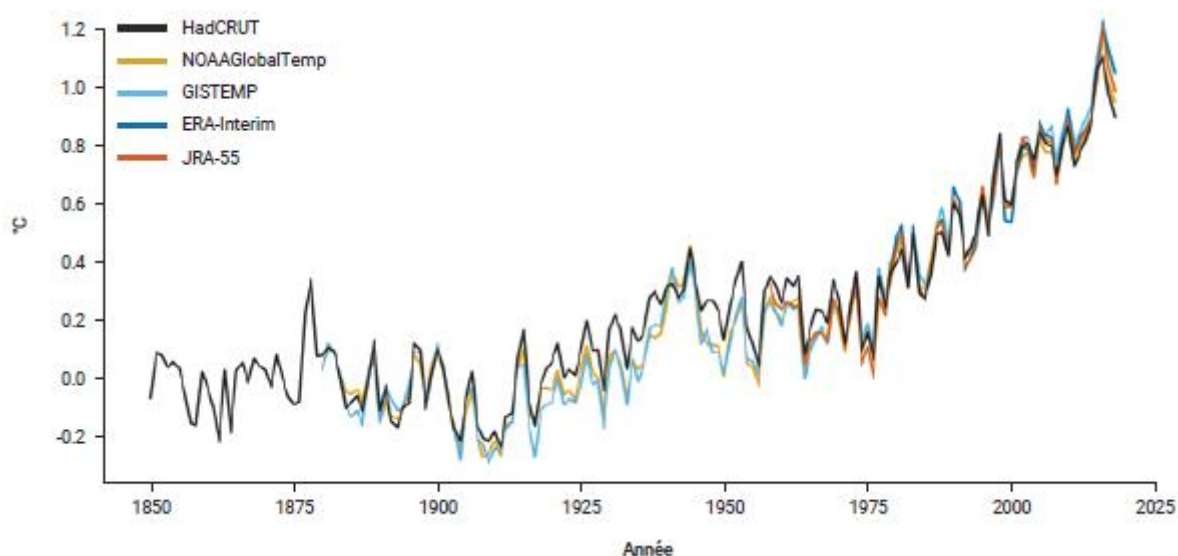


Figure 2.1 Evolution des températures moyennes mondiales [11].

Année	2016	2020	2019	2015	2017	2018	2014	2010	2013	2005
Anomalie de Température en °C	0.99	0.98	0.95	0.93	0.91	0.82	0.74	0.73	0.68	0.67

Figure 2.2 Les 10 années les plus chaudes depuis 1880 [99].

Dans le même temps, une croissance démographique rapide a été marquée au cours des dernières années. Selon un rapport de l'ONU [85], la population mondiale devrait augmenter de 2 milliards de personnes, passant de 7,7 milliards actuellement à 9,7 milliards en 2050, et le nombre d'habitants sur terre pourrait atteindre près de 11 milliards vers l'an 2100 (voir Figure 2.3). Cette croissance a entraîné une augmentation de la demande alimentaire et de la demande de l'eau. Les estimations indiquent une augmentation de la demande mondiale de produits alimentaires de 70% d'ici 2050 [100], p. ex., une augmentation de la demande alimentaire mondiale en équivalent céréales devrait atteindre environ 10 094 millions de tonnes en 2030 et 14 886 millions de tonnes en 2050 [101]. D'autres estimations [44], [86] prévoient une augmentation de la demande mondiale en eau de 55% entre 2000 et 2050, passant de 3 500 à 5 425 km³.

Au cours des 100 dernières années, l'utilisation mondiale d'eau a été multipliée par six, comme la Figure 2.4 montre, et continue d'augmenter rapidement de 1 % par an en conséquence de la croissance démographique, du développement économique et de l'évolution des tendances de consommation [11].

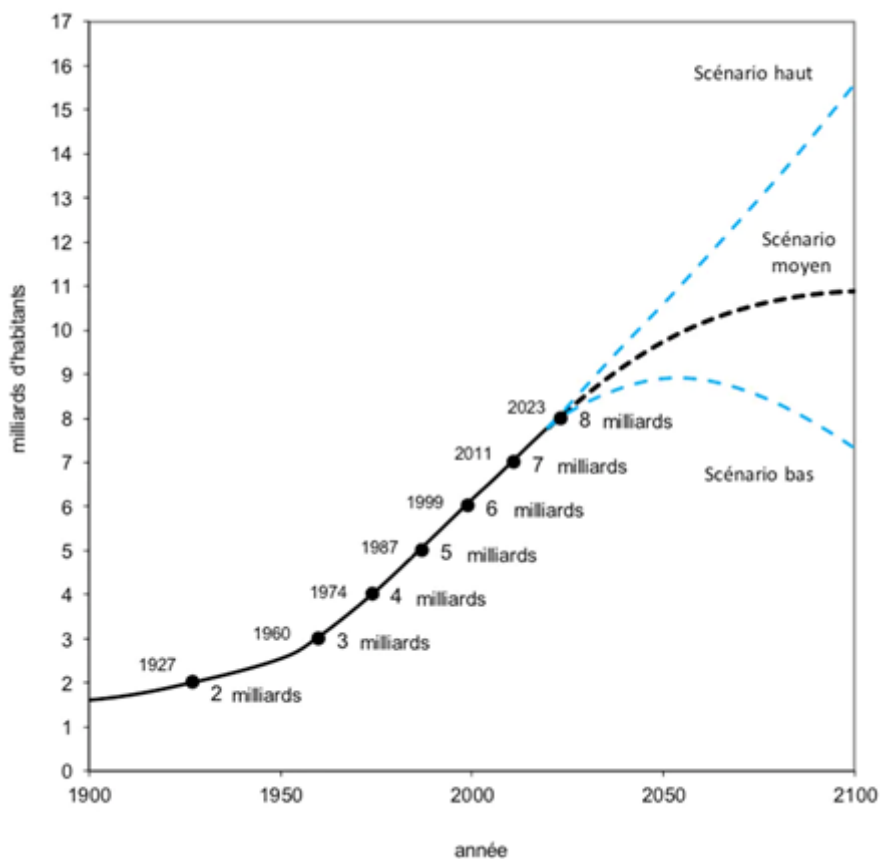


Figure 2.3 Evolution de la population mondiale depuis 1900 et projections jusqu'en 2100 [85].

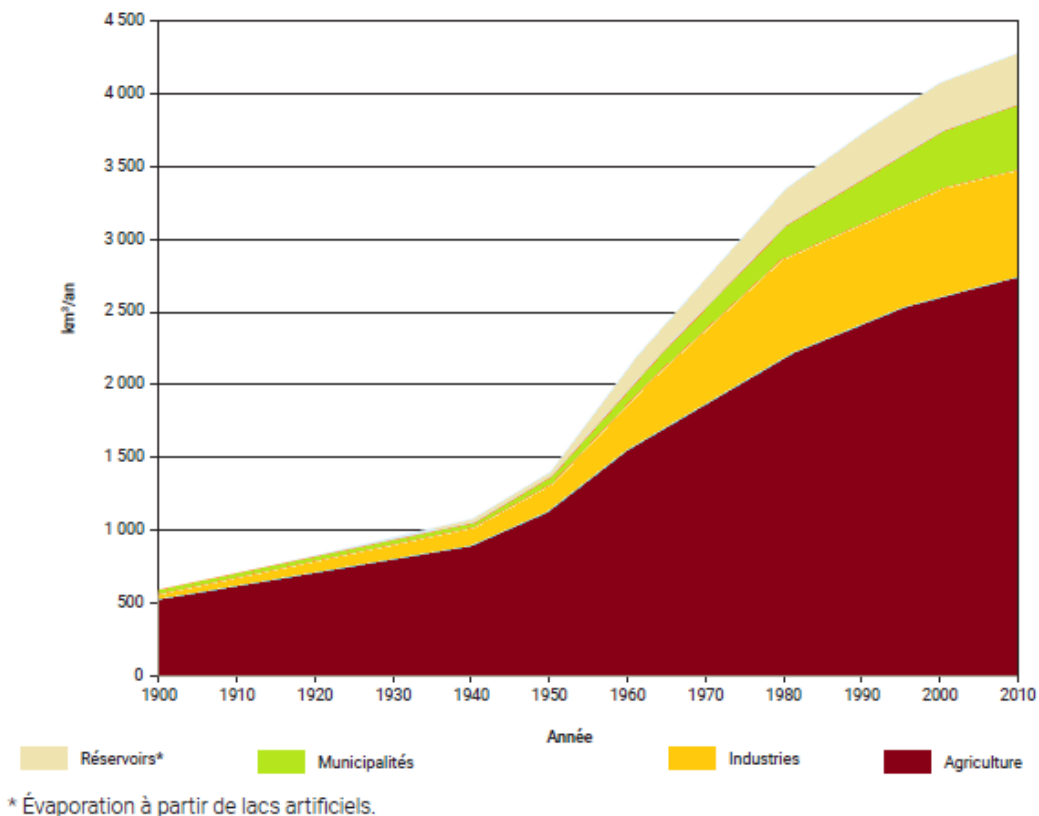


Figure 2.4 Prélèvements d'eau dans le monde au cours du 20e siècle (1900-2010) [11].

Donc ce changement climatique et cette explosion démographique se combinent pour exercer une pression croissante sur les ressources nécessaires à la vie humaine comme l'eau. La pression démographique augmente la demande en eau et conduit à une surexploitation de cette ressource. En plus, plusieurs effets du changement climatique (p. ex., les longues périodes de sécheresse, la hausse des températures et la diminution des précipitations) aggravent l'aridité et affectent les ressources en eau et écosystèmes d'eau douce en termes de qualité et de quantité. Ces deux problèmes sont principalement responsables de la réduction et de la dégradation croissante des ressources en eau dans le monde.

On peut citer d'autres facteurs : la surconsommation, le gaspillage, la pollution, la déforestation et la dégradation des sols qui modifient sérieusement le cycle hydrologique.

On résume que les ressources en eau sont vulnérables, limitées et inégalement réparties. De plus, elles ont subi durant ces dernières décennies les effets négatifs de la sécheresse, de la pollution et de l'utilisation irrationnelle.

2.2.3 Solutions face à la crise de l'eau dans le monde

Aurons-nous suffisamment d'eau pour répondre aux besoins en eau de 9,7 milliards d'habitants sur terre en 2050, soit près de 11 milliards en 2100 ?

Le secteur agricole est considéré l'un des secteurs le plus grand consommateur d'eau douce dans le monde, représentant près de 70% des prélèvements d'eau douce, utilisée principalement pour l'irrigation, et les 30% restants dans les secteurs énergétique, industriel, et municipal [9], [21]. L'eau destinée à l'irrigation représente actuellement environ 70% des prélèvements d'eau dans le monde et près de 90% de l'eau consommée [9], [12]. Selon la communauté scientifique et des praticiens de ce secteur [13], [14], [21], il est clair que « c'est le secteur agricole qui doit en priorité économiser l'eau si le monde veut éviter une crise des ressources hydriques, liée à la fois à l'augmentation des besoins et aux effets du réchauffement climatique ». L'Institut international de gestion de l'eau (IWMI) [102] a également expliqué: « Il faut doubler la production agricole d'ici quarante ans et, si rien ne change, les besoins en eau pour l'agriculture doubleraient aussi. Nous devons impérativement produire plus avec moins d'eau ».

La Figure 2.5 montre la consommation d'eau par secteur et par groupe de pays.

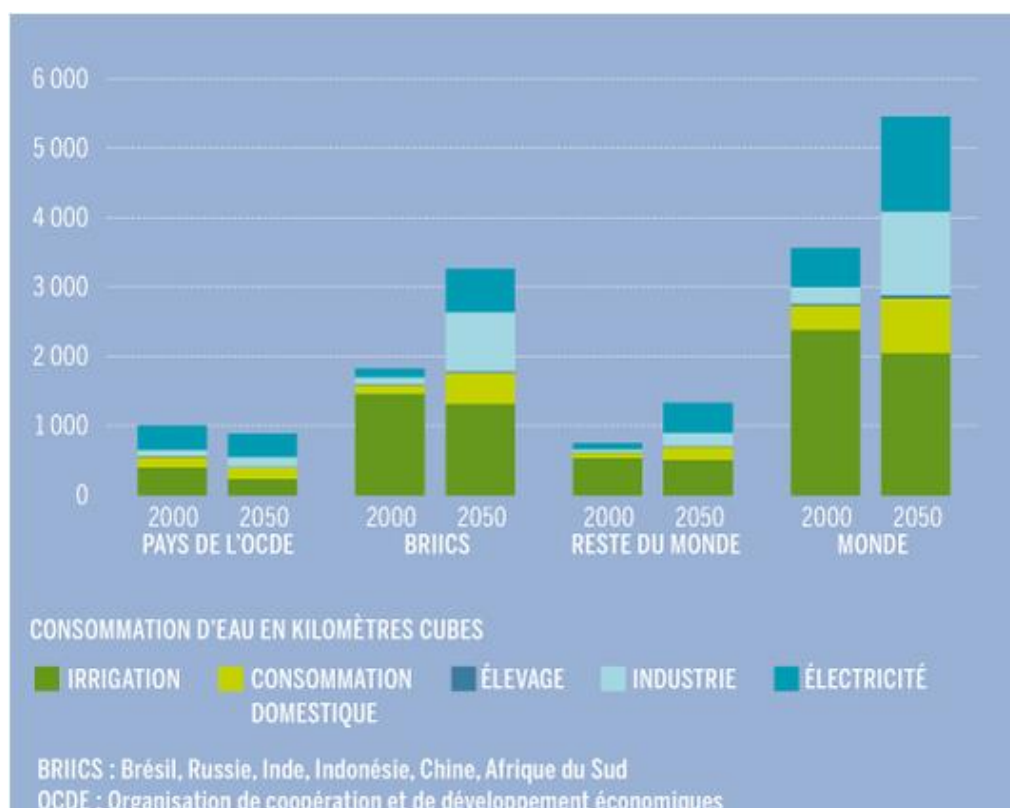


Figure 2.5 Consommation d'eau par secteur et par groupe de pays [21].

L'irrigation est l'un des services les plus vitaux du secteur agricole. Il est devenu une partie indispensable dans l'agriculture, il joue également un rôle essentiel pour augmenter la production des cultures et améliorer le rendement dans le but de répondre aux besoins alimentaires de la population mondiale en croissance constante. L'irrigation est définie comme l'action de l'approvisionnement artificiel d'eau dans les terres agricoles. Ceci est une pratique importante dans la plupart des cultures agricoles dans les zones où le taux de précipitations ne suffit pas pour répondre aux besoins en eau des cultures. Cependant les techniques d'irrigation actuellement utilisées restent inefficaces avec des faibles performances et ces techniques visent uniquement à contrôler la distribution de l'eau aux endroits voulus sans compromettre les besoins de ce dernier, et par conséquent une quantité importante d'eau est perdue durant chaque irrigation. En outre, plusieurs zones peuvent être affectées par l'augmentation ou la diminution de la quantité d'eau utilisée pendant l'irrigation, alors que les zones mal irriguées sont soumises à une production médiocre et au stress hydrique et les zones sur-irriguées sont affectées par des maladies des plantes.

Cela conduit à considérer que l'irrigation est aussi une source de gaspillage de l'eau dans l'agriculture. Donc le recours à des nouvelles technologies telles que les réseaux de capteurs sans fil peut soutenir le secteur agricole et réduire sensiblement la consommation d'eau dans l'agriculture, en particulier l'irrigation, tout en économisant de l'eau et augmentant le

rendement et la qualité de la productivité des cultures. L'utilisation de la technologie du réseau de capteurs sans fil soutient l'agriculture, et donc renforcer l'efficacité des systèmes d'irrigation dans une direction très positive et promouvoir l'irrigation à un meilleur niveau d'efficacité, d'automatisation, de précision et de production intelligente.

2.2.4 Crise de l'eau au Maroc

Les prévisions de l'IPCC [96] indiquent que la sécheresse sera plus importante et plus fréquente dans les régions déjà arides, ce qui réduit les ressources en eau. En Afrique du Nord et au Moyen-Orient, les ressources en eau douce ont baissé de deux tiers au cours des quarante dernières années.

Selon les données de la FAO [103], certains pays comme l'Afrique du Sud, Chypre ou le Maroc souffrent du cas d'une pénurie, c.-à-d., moins de 1000 mètres cubes par personne et par an. Parmi eux, l'Algérie, Israël et le Qatar sont en cas d'une grave pénurie, c.-à-d., moins de 500 mètres cubes.

La région du Moyen Orient et l'Afrique du Nord sont les régions du monde où il y a le moins d'eau et la situation s'aggrave en raison des impacts des conflits, du changement climatique et de la récession économique [13], [14], [21]. La région est chaude et sèche, donc l'approvisionnement en eau est faible, mais la demande est croissante. La crise de l'eau menace la stabilité, le développement humain et la croissance durable de la région.

Le stress hydrique commence lorsque la disponibilité en eau est inférieure à 1.700 mètres cubes par an et par personne, explique l'Institut des ressources mondiales (WRI) [104].

Selon un rapport du WRI [105], la situation du Maroc est extrêmement grave, comme la Figure 2.6 montre. Le Maroc est classé parmi les pays au stress hydrique élevé, ce qui signifie que la demande en eau est supérieure à la quantité disponible.

Le Maroc est classé à la 22e place sur un total de 164 pays [105], comme la Figure 2.7 montre. Par ailleurs, en ce qui concerne l'Afrique du Nord, le Maroc arrive second juste après la Libye, 6ème pays le plus menacé [105].

Selon le WRI et la FAO [13], [104], les zones les plus touchées au Maroc sont les régions les plus densément peuplées, où l'agriculture est la plus développée. La région de Chaouia-Ouadigha est la plus menacée de carence de l'eau. Le Grand Casablanca est situé dans les régions les plus tendues, juste devant les régions de Marrakech - Tensift - Al Haouz, Tanger - Tétouan et Taza - Al Hoceima – Taounate.

La Figure 2.6 montre les pays qui seront affectés par le stress hydrique extrême en 2040 selon le WRI.

Water Stress by Country: 2040

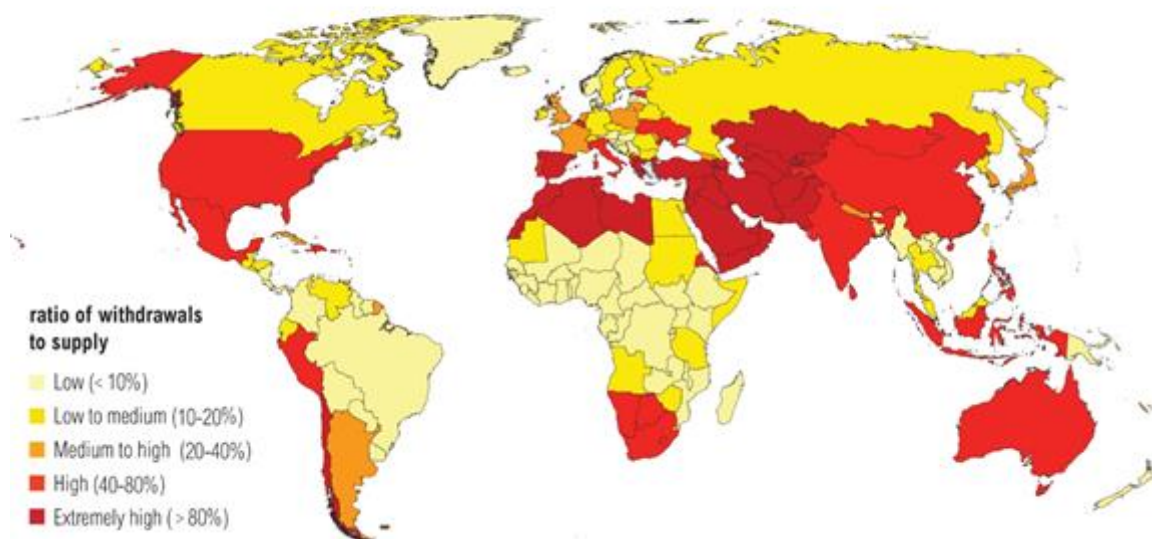


Figure 2.6 Stress hydrique au niveau des pays en 2040 selon WRI [104].



Figure 2.7 Classement des pays en situation de stress hydrique (2019) [105].

2.3 Agriculture, irrigation et ressources hydrauliques au Maroc

Le Maroc se situe à l'extrême Nord-Ouest du continent africain, il dispose de deux avantures maritimes, l'Atlantique et la Méditerranée, qui enregistrent de fortes précipitations. Le reste du pays a un climat semi-aride à aride.

Selon des données fournies par la direction générale de l'eau [106] et la Banque mondiale (WB) [107], le Maroc a un climat diversifié en accord avec sa géographie variée, allant de conditions désertiques à des conditions alpines sur les hauts plateaux. L'intérieur du pays connaît des variations de température saisonnières, avec des températures moyennes de 25-30°C en été et de moins de 15°C en hiver. Les températures dans les régions côtières varient entre 22-25°C en été (juillet-septembre) et 10-12°C en hiver (janvier-mars). La saison des pluies dure de novembre à mars et ne concerne que le nord du Maroc. Le Maroc connaît également les vents chergui, qui sont des vents chauds et poussiéreux provenant du Sahara.

2.3.1 Ressources en eau au Maroc

De par sa situation géographique, le Maroc est caractérisé par un climat à la fois méditerranéen au nord et aride au sud et au sud-est de l'Atlas, avec une saison sèche et chaude et une saison froide et humide [106].

Les ressources en eau ont été influencées par une irrégularité annuelle et une variabilité interannuelle très marquées des précipitations et une disparité de leur répartition spatiale. Le régime pluviométrique au Maroc est caractérisé par une forte variabilité spatio-temporelle [108].

2.3.1.1 Une ressource irrégulière dans le temps

Sur l'ensemble de son territoire, le Maroc reçoit annuellement une pluviométrie estimées en moyenne de 140 milliards de m³, varient selon les saisons et les années de 50 à 250 Milliards de m³ [30], [106], ce qui est d'une excessivité déconcertante.

Le régime hydrologique de l'ensemble des bassins est caractérisé par une très grande variabilité interannuelle marquée par l'alternance des séquences humides et sèches, intercalées par des années de forte hydraulité ou de sécheresse sévère [106], [108]. Les précipitations sont généralement concentrées en automne (octobre-novembre), en hiver

(décembre) et au printemps (mars-avril), avec des précipitations extrêmement faibles entre juin et août (voir Figure 2.8).

Au Maroc, un ensemble des ressources en eau sont devenues secs à cause de la sécheresse et une grande partie de ses eaux est livrée à la mer grâce à des écoulements superficiels.

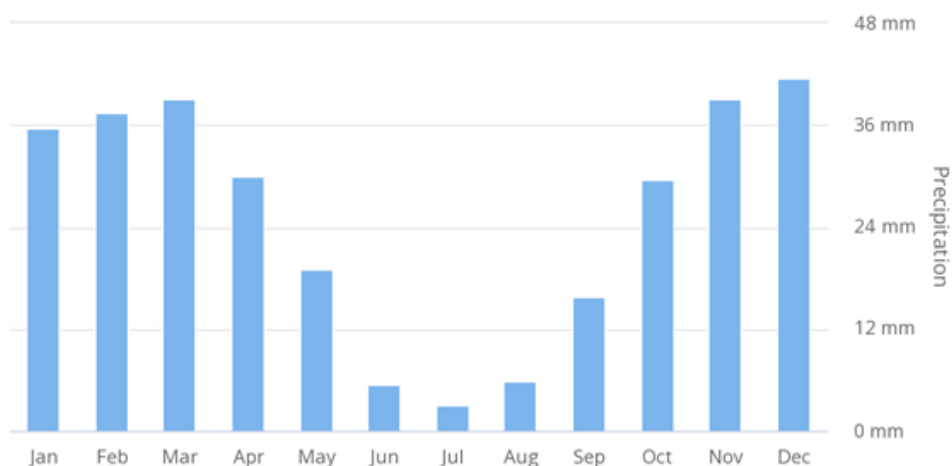


Figure 2.8 Précipitations mensuelles moyennes pour le Maroc au cours de la période 1991-2020 [107].

2.3.1.2 Une ressource inégalement répartie dans l'espace

Les précipitations au Maroc connaissent des variations très importantes entre les différentes régions du pays. En effet, les précipitations atteignent plus de 800 mm par an dans les zones les plus arrosées au Nord et à moins de 100 mm par an dans les zones arides au sud du pays [30]. Selon des données fournies par la direction générale de l'eau [106], Les précipitations moyennes annuelles se répartissent comme suit (voir Figure 2.9) :

- Moins de 50 mm dans les bassins de Sakia El Hamra et Oued Eddahab,
- Entre 50 et 200 mm dans les zones sud-atlasiques,
- Entre 200 et 400 mm dans la région de l'Oriental et du Souss,
- Entre 400 à 600 mm dans la région du Centre,
- Supérieures à 800 mm dans la région la plus arrosée du nord.

La grande disparité régionale des précipitations induit également une grande variabilité spatiale des écoulements d'eau de surface [106]. Le taux des apports en eau naturelle varie entre quelques millions de m³/an dans les bassins pauvres en ressources en eau (régions Sud-Est et Sud du Maroc) à quelques milliards de m³/an pour les bassins les plus humides, tels que les bassins du Sebou, du Loukkos, du Tangérois et des Côtiers méditerranéens [109]. Les bassins du nord (Loukkos, Tangérois et Côtiers méditerranéens) et le Sebou qui couvrent près de 7 % de la superficie du pays disposant de plus de la moitié des ressources en eau [106].

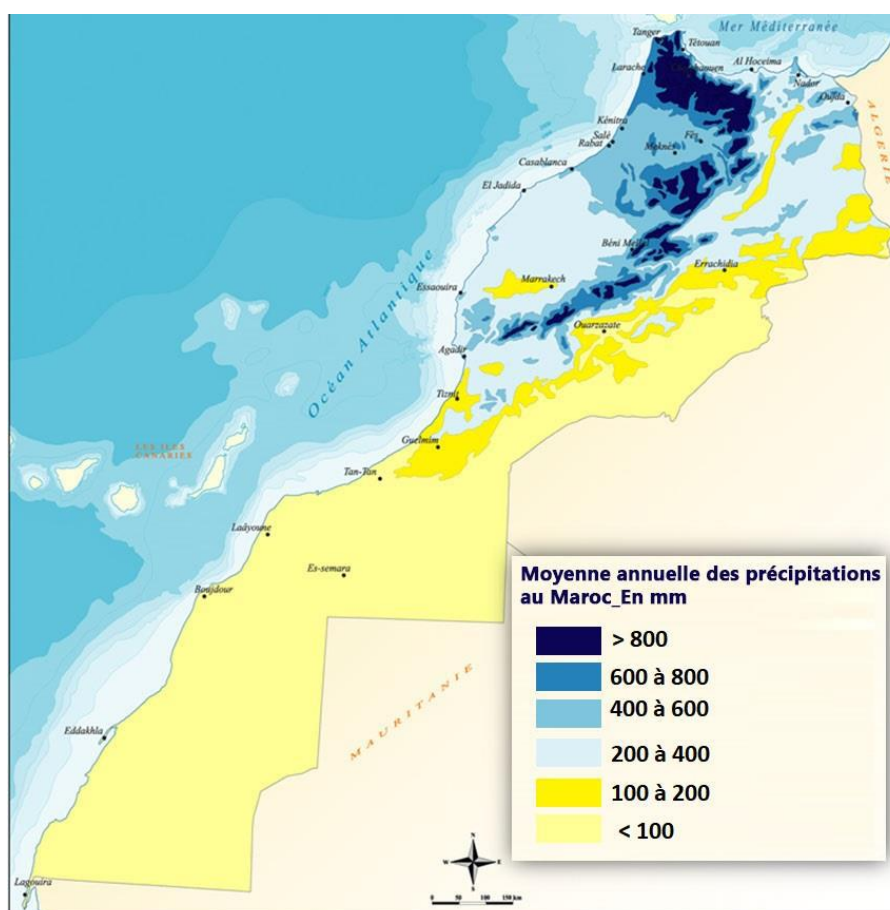


Figure 2.9 Répartition spatiale des précipitations moyennes au Maroc [106].

2.3.1.3 Impact sévère des changements climatiques

Au Maroc, le climat méditerranéen domine en effet la saison fraîche y est pluvieuse et la saison chaude sèche. Le changement du climat se reflète de façon plus accentuée sur les régions arides et semi-arides. Par exemple, le climat de l'année 2020 s'est distingué par une température moyenne annuelle la plus chaude depuis 1981 et par un déficit pluviométrique d'environ -35% [110] (voir Figure 2.10 et Figure 2.11).

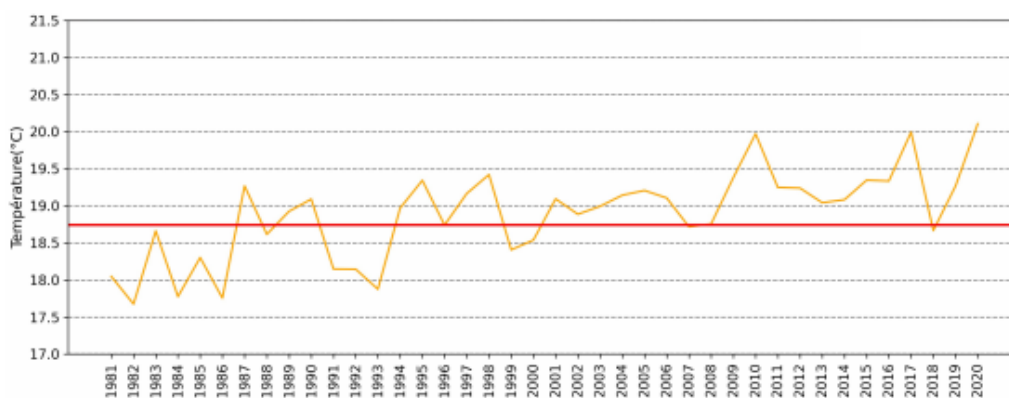


Figure 2.10 Evolution temporelle de la température moyenne annuelle au niveau national ; la ligne rouge représente la normale climatologique de la température moyenne pour la période 1981-2010 [111].

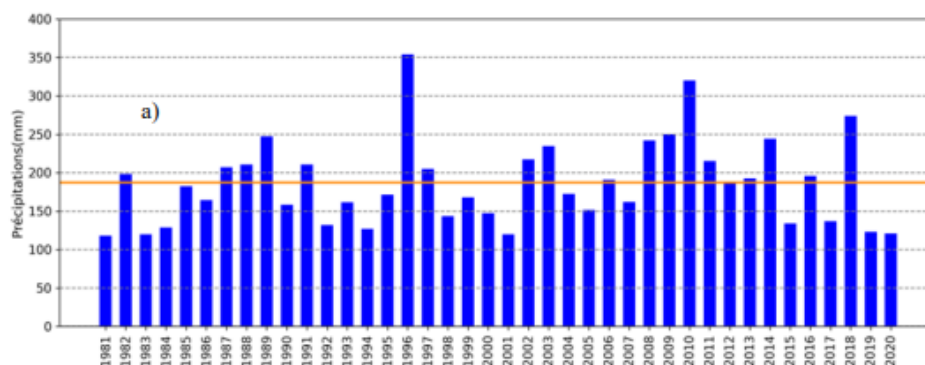


Figure 2.11 Evolution temporelle de la pluviométrie annuelle au niveau national ; la ligne orange représente la normale climatologique pour la période 1981-2010 [111].

Sous l'effet négatif de ces changements climatiques sur le régime des précipitations, la moyenne nationale des apports en eau de surface au niveau des sites de barrages a chuté de l'ordre de 20% au cours des trente dernières années [106].

2.3.1.4 Potentialités hydrauliques limitées

Les ressources en eau disponibles actuellement sont évaluées à environ 22 milliards de m³ [30], [109]. Les ressources potentielles mobilisables au Maroc sont divisées en eaux de surface et en eaux souterraines. Le potentiel des eaux superficielles s'élève à environ 18 milliards de m³/an, soit 13% environ seulement des précipitations moyennes du Maroc [109] (voir Figure 2.12). Par ailleurs, l'eau de surface, qui représente les trois quarts du potentiel hydrique, subit des fluctuations d'apports importantes selon l'hydraulicité de l'année.

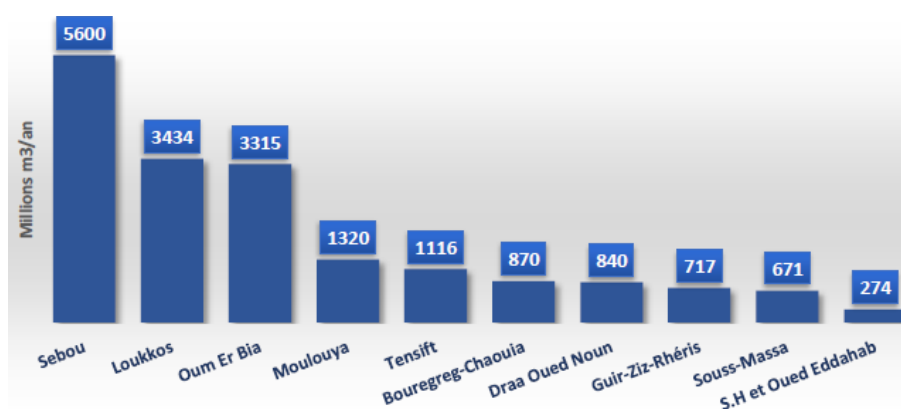


Figure 2.12 Potentiel des ressources en eau superficielles des bassins au Maroc [106].

Le potentiel des eaux souterraines s'élève à environ 4 milliards de m³/an, environ 18 % du potentiel global des ressources en eau du pays [109] (voir Figure 2.13). Ces ressources sont contenues dans 130 formations géologiques aquifères [109]. Les ressources en eau souterraine jouent un rôle important dans le développement socio-économique du pays en assurant

notamment l'approvisionnement en eau des populations rurales et les fournitures pour l'irrigation. L'effort de mobilisation des eaux souterraines, entrepris depuis 1961, a permis un développement sans précédent de l'exploration et de l'exploitation de l'eau souterraine [106].

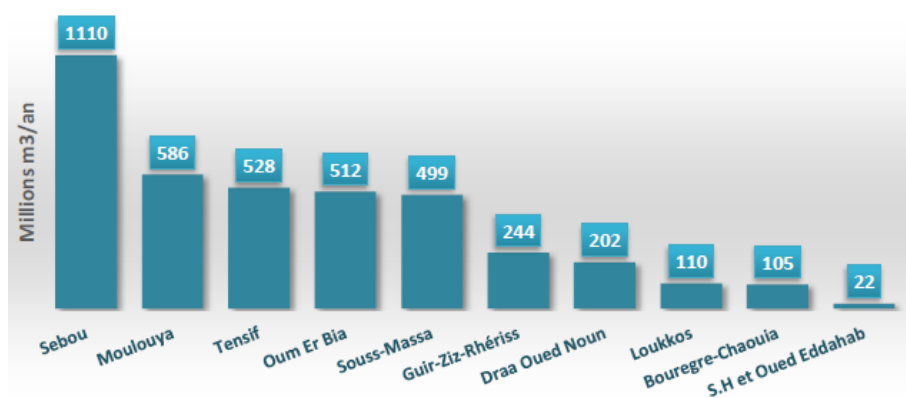


Figure 2.13 Potentiel des ressources en eau souterraines des bassins au Maroc [106].

Suite à l'accroissement démographique et l'indisponibilité des eaux, la demande en eau continue d'augmenter, et le volume mobilisable par habitant, qui était de 833 m³/an en 1994 à près de 650 m³/an en 2019 et de 632 m³/an en 2020, passera en dessous du seuil de pénurie de moins 500 m³ d'ici 2030 [34], [112] (voir Figure 2.14), ce qui place le Maroc dans la catégorie des pays pauvres en eau.

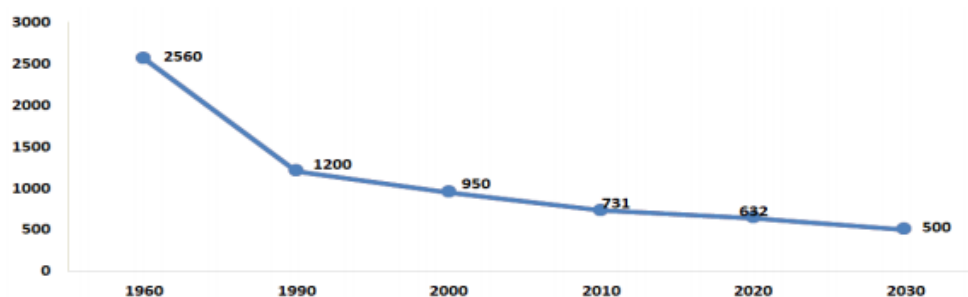


Figure 2.14 Evolution de la dotation des ressources en eau au Maroc (en m³/hab./an) [106].

2.3.1.5 Analyse de la consommation et la demande en eau et de son évolution

Compte tenu des ressources disponibles et des conditions climatiques, l'irrigation est une nécessité technique impérative, et ses avantages économiques et sociaux ne peuvent être niés. Le secteur agricole, et donc l'irrigation, utilise 86% des ressources en eau, alors que 5,5% sont utilisés pour l'industrie et 8,5% pour les besoins humains [30] (voir Figure 2.15).

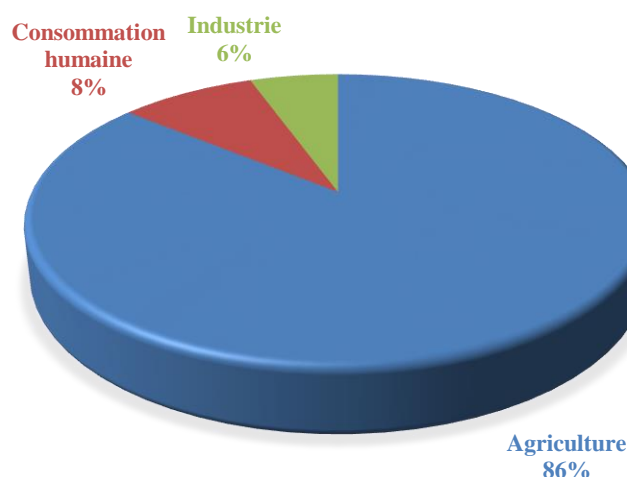


Figure 2.15 Consommation d'eau par secteur au Maroc.

Selon des données fournies par un rapport de la WB [113], la demande en eau urbaine au Maroc devrait augmenter en raison des changements socio-économiques rapides. En effet, le Plan national de l'eau [114] a évalué les besoins en eau domestique et industrielle du Maroc à 1 437 Mm³/an en 2010 contre 2 368 Mm³/an en 2030, ce qui représente une augmentation de 65%. Certaines villes, comme Tétouan et Tanger, pourraient même doubler leur demande en eau urbaine, comme indiqué dans la Figure 2.16.

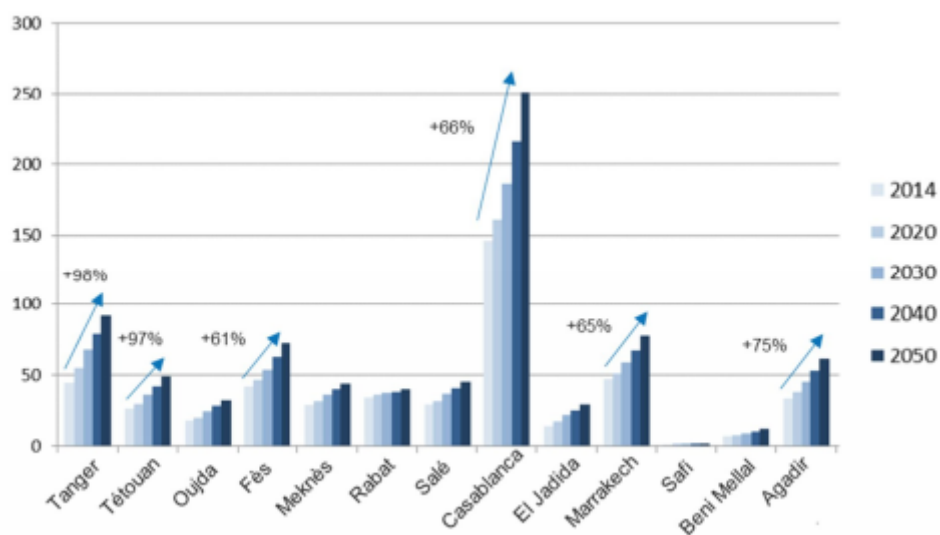


Figure 2.16 Prévission de la demande en eau par ville entre 2014-2050 (litres par habitant et par jour) [113].

Selon la direction générale de l'eau [106] et Sinan et al. [109], la demande en eau globale par secteur est évaluée à 16,28 milliards de m³/an. Elle est répartie en 1,75 milliards de m³/an d'eau potable, industrielle et touristique (AEPIT), soit environ 10,74 % de la demande en eau globale du Maroc, et 14,53 milliards de m³/an pour l'agriculture, soit environ 89,26 % de la demande en eau globale du Maroc. La demande en eau globale estimée à l'horizon 2050 serait

à près de 18,69 milliards de m³/an. Elle est répartie en 2,6 milliards de m³/an d'AEPIT, soit environ 13,91 % de la demande en eau globale du Maroc, et 16,09 milliards de m³/an pour l'agriculture, soit environ 89,09 % de la demande en eau globale du Maroc, comme indiqué dans la Figure 2.17.

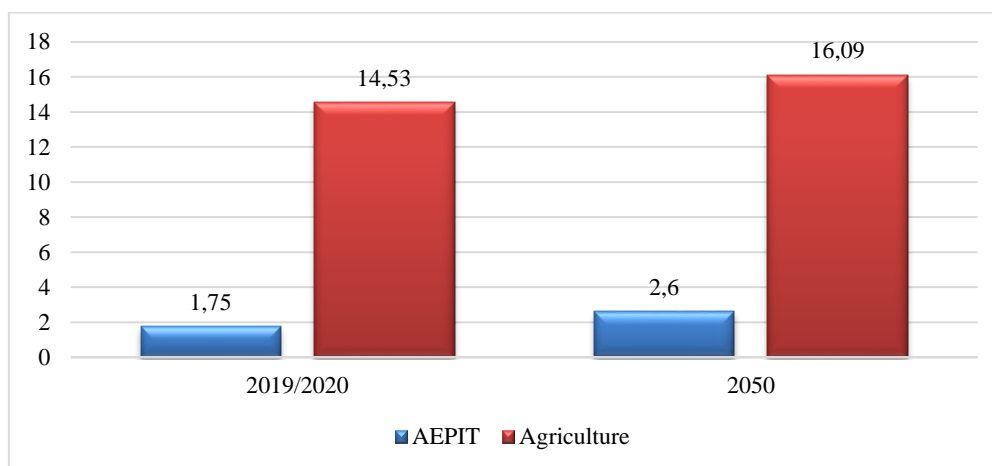


Figure 2.17 Prévission de la demande en eau par secteur au Maroc à l'horizon 2050 (en milliards de m³/an).

2.3.2 Agriculture au Maroc

2.3.2.1 Evolution des stratégies et politiques agricoles

Le secteur agricole a une importance et une position sociale et économique indéniable au Maroc, en raison des différentes politiques agricoles que le Maroc a suivie [28], [34]. Depuis son indépendance, le Maroc a choisi une stratégie de développement économique et social, en améliorant le secteur agricole, notamment l'irrigation, dans le but de développer les ressources en eau.

Ainsi, jusqu'à la fin des années 2000, lors de la transition d'une politique d'intervention de l'État dans le secteur, à savoir le soutien des prix à la production de produits stratégiques dans le cadre d'une politique d'autosuffisance, le soutien des productions alternatives aux importations et autres, vers une politique plus libérale, à savoir le remplacement du soutien aux prix à la production par un soutien à l'investissement agricole et autres [28]. Ces efforts ont permis à ce secteur d'enregistrer de nombreuses réalisations dont en particulier l'investissement de savoirs ancestraux reconnus (p. ex., pratiques agricoles et pratiques d'irrigation), la diversification des productions végétales et animales et la construction d'infrastructures hydrauliques et agricoles.

Cependant, il existe encore quelques limites qui entravent l'efficacité du modèle marocain de développement agricole. Ces limites sont notamment liées à la mauvaise organisation de certains services, au manque de rationalisation de la gestion des ressources en eau (c.-à-d., faible efficacité de l'irrigation des parcelles dominée par les systèmes gravitaires), aux faibles investissements agricoles et à l'insuffisance de préparation du capital humain pour contribuer à la modernisation de l'agriculture.

La Figure 2.18 résume l'évolution des stratégies et politiques du secteur agricole au Maroc depuis l'indépendance.



Figure 2.18 Aperçu de l'évolution des stratégies et politiques dans le secteur agricole au Maroc [34].

2.3.2.2 Secteur agricole : Moteur de la croissance marocaine

Le secteur agricole représente le secteur économique le très important au Maroc. Il est un moteur de croissance économique et un outil efficace de lutte contre la pauvreté rurale [115]. Au Maroc, la Surface Agricole Utile (SAU) est estimée à près de 8 700 000 d'hectares, ce qui ne représente que presque 13% de la superficie totale du pays [34], [116], cette surface est répartie de façon inégale entre les différentes régions du Maroc. Ce secteur contribue à

l'économie de près de 14% du PIB [116], sachant que cette contribution est variable selon les territoires. Pour certaines régions, le secteur agricole représente une part prépondérante de l'activité économique. Il a considéré le principal pourvoyeur d'emplois du pays, avec une part plus de 38% dans l'emploi total au niveau national et environ 74% en milieu rural [116], [117] (voir Figure 2.19 et Figure 2.20).

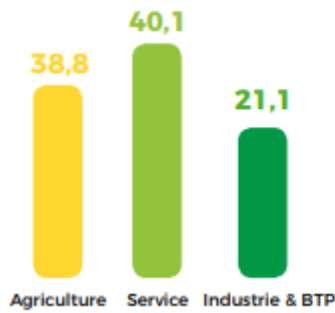


Figure 2.20 Structure de l'emploi selon le secteur d'activité économique (en %) [117].

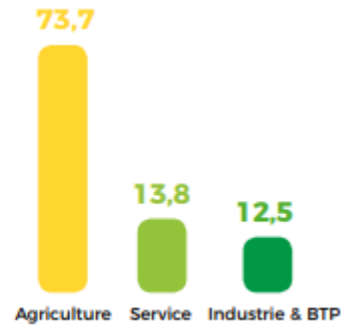


Figure 2.19 Structure de l'emploi selon le secteur d'activité économique en milieu rural (en %) [117].

Selon des données fournies par le ministère de l'Agriculture, de la Pêche Maritime, du Développement Rural et des Eaux et Forêts [28], [116], le poids du PIB agricole dans le PIB a varié entre 12 % et 14 % avec une moyenne de 12,8 %, entre 2008 et 2018. Ainsi, la contribution du secteur agricole à la croissance économique a progressé d'une manière notable en passant de 7,3 % à près de 17,3 %. En outre, une valeur ajoutée additionnelle moyenne de plus de 31 milliards DH a été réalisée entre la période 2003-2007 et la période 2008-2018 avec toutes ses implications sur l'amélioration du niveau de vie des populations rurales. En 2018, le secteur agricole a réalisé pour la deuxième année consécutive des résultats satisfaisants, bénéficiant des conditions climatiques favorables caractérisées par une bonne distribution pluviométrique. La valeur ajoutée agricole de la campagne 2017-2018 a atteint près de 125 milliards de DH, comme le montre la Figure 2.21.

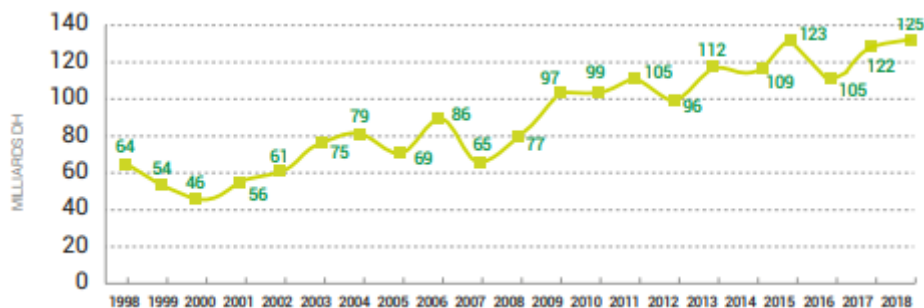


Figure 2.21 Produit intérieur brut de la branche agricole [117].

Durant ces dernières décennies, l'agriculture a constitué un secteur d'investissement prioritaire pour le gouvernement marocain surtout dans l'irrigation. Plusieurs projets a été

réalisé dans ce contexte, la plupart de ces projets a orienté vers la création de grands barrages plus de 128 grands barrages ont été bâtis et offrent une capacité plus de 17 milliards de m³ [106]. Ces barrages et d'autres modestes infrastructures ont permis d'irriguer des périmètres de plus de 1,2 million d'hectares [28], [30]. Parmi les zones irriguées les plus importantes : la région d'Agadir, la Moulouya au nord-est, le Gharb et le Loukkos au nord-ouest, le Tafilalet. Les produits agricoles varient en fonction des conditions régionales et climatiques, ces produits trouvés surtout d'un type familial cependant il existe aussi des produits pour l'exportation. Les principales productions végétales du Maroc sont composées par les olives, les légumineuses, les céréales (p. ex., le blé et l'orge), les rosacées fruitières (p. ex., les abricots et les amandes), les agrumes (p. ex., les oranges et les clémentines), betteraves à sucre, les primeurs, les figues et les dattes, les produits maraichères [118]. L'exportation agricole marocaine se base sur l'huile d'olive, les primeurs, les agrumes.

Selon les classifications des terres marocaines, on trouve 56 millions d'hectares soit 78% de la superficie dans des zones sèches et désertiques où les précipitations annuelles moyennes est inférieure à 250 mm, 15% de la superficie soit 10 millions d'hectares trouvés dans la zone semi-aride avec des précipitations annuelles allant de 250 à 500 mm et 7% dans les zones subhumides et humides avec des précipitations supérieur à 500 mm par an [13], [28]. Les terres agricoles en général au Maroc représentent près de 8,7 millions d'hectares de la superficie, dont plus de 80% en moyenne sont cultivés [116].

Selon les données fournies par le ministère de l'Agriculture, de la Pêche Maritime, du Développement Rural et des Eaux et Forêts, la SAU est forte d'une richesse en systèmes agro-climatiques qui lui permet de produire une très large gamme de produits agricoles. L'importance de la superficie des céréales (59 % de la SAU) ainsi que la jachère (12 % de la SAU), témoignent des énormes possibilités d'intensification et de reconversion [116] (voir Figure 2.22).

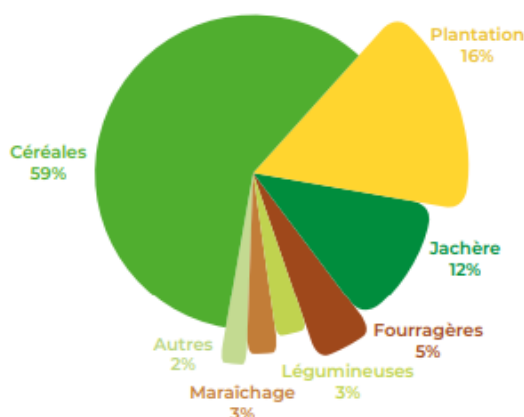


Figure 2.22 Répartition de la SAU selon le type d'utilisation [116].

La reconfiguration du soutien public en faveur du secteur agricole a fortement contribué au renforcement du poids des productions agricoles à forte valeur ajoutée, à savoir l'arboriculture (27,7% en moyenne sur la période 2008-2018), l'élevage (30,6%) et le maraîchage (16,1%) et ce, au détriment de la filière céréalière qui a vu sa part baisser de 21,4% en 2009 à 13,5% en 2018, pour se situer en moyenne autour de 15,6% sur la période 2008-2018 [34] (voir Figure 2.23).

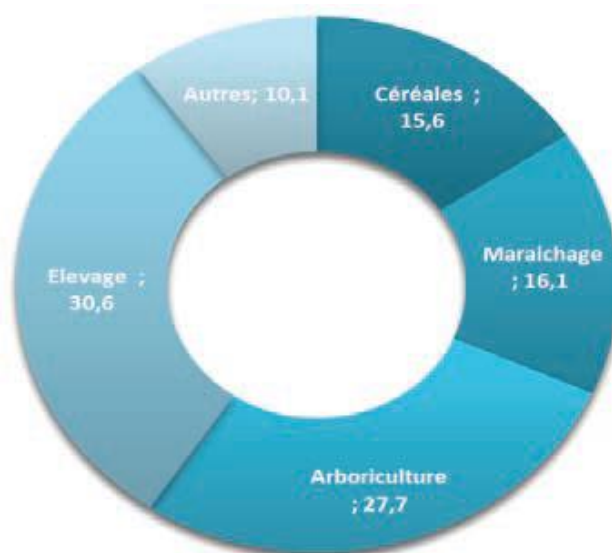


Figure 2.23 Structure de la valeur ajoutée agricole entre 2008 et 2018 (en %) [117].

2.3.2.3 Zones agro-écologiques au Maroc

Suivant d'un ensemble des critères tels que le critère climatique, le critère pédologique, les moyennes de la précipitation annuelles et les périodes végétatives, nous pouvons préciser les zones agro-écologiques au Maroc. Pour cela, nous expliquons deux critères qui sont les plus importants : le critère de climat et le critère pédologique.

Le critère de climat : le climat méditerranéen domine au Maroc, il se base sur le calcul de la longueur de la période de l'année pendant laquelle les conditions climatiques sont favorables à la croissance et au développement des plantes, on peut citer climat aride, semi-aride, subhumide et humide. Le critère pédologique : se base sur la classification des sols, les types des sols sont composés de : Hamri est un sol rouge et généralement argileux, R'mel (sable), Tirs est un type lourd argileux et de couleur foncée, Harch c'est un sol caillouteux, Merzag est un type sableux à concrétions ferrugineuses, Dess (alluvions), etc.

Grâce à l'homogénéité de ces critères, on peut diviser le Maroc en plusieurs zones agro-écologiques. Selon des données fournies par le ministère de l'Agriculture, de la Pêche Maritime, du Développement Rural et des Eaux et Forêts [28] et la FAO [13], parmi ces zones figurent :

- Rif : il est varié en termes de précipitations et de paysage. Les grandes terres d'agriculture au Rif se situent à Chefchaouen par 23% du total et à Taounate par 76%. Les exploitations de la plupart des produits agricoles sont de type familial, et pour l'élevage et les cultures. Les produits agricoles trouvés : les arbres fruitiers représentent 16% des terres cultivées, les céréales occupent plus de 50%, les légumineuses représentent 9% et aussi le fourrage.
- Doukkala, Chaouia et la plaine des Abda : ces zones se caractérisent par des précipitations entre 300 et 400 mm, des hivers cléments et des longues saisons sèches (mai-octobre). La terre est divisée en quelque 80% cultivés et 20% occupés par des parcours ou des forêts. Dans la plaine des Doukkala, il y a presque à 61 000 ha de périmètre irrigué, où l'on trouve les céréales, le fourrage, les légumes et les cultures industrielles. La production agricole consiste en céréales environ à 80% de la superficie cultivée, légumineuses, plantations arboricoles, légumes, produits maraîchers (essentiellement des tomates) et fourrages. Ces zones sont vulnérables à la sécheresse et les cultures étant pour l'essentiel pluviales. Concernant l'élevage, il est bien intégré avec les cultures.

2.3.3 Irrigation au Maroc

Selon le glossaire international d'hydrologie [119], « l'irrigation c'est un rapport artificiel d'eau sur des terres à des fins agricoles ». Donc l'irrigation consiste l'opération qui permet d'apporter l'eau à des végétaux cultivés afin d'augmenter la production et de permettre leur développement normal en cas déficit pluviométrique.

2.3.3.1 Plan Maroc vert et l'irrigation

Le secteur agricole au Maroc a connu un tournant majeur avec le lancement du Plan Maroc Vert en 2008. L'objectif de ce plan est d'adopter une approche moderne visant à contribuer à la promotion des investissements dans l'agriculture et à tirer parti des expériences réussies dans ce domaine, tant au niveau national qu'international [28], [33]. Le PMV s'articule autour de deux piliers [28], [115]:

- Pilier I : vise le développement accéléré d'une agriculture moderne, compétitive, à haute valeur ajoutée et adaptée aux règles du marché.
- Pilier II : vise la mise à niveau des acteurs fragiles et la lutte contre la pauvreté rurale à travers l'amélioration du revenu agricole.

Face à la situation difficile des ressources en eau, PMV place l'eau parmi les réformes globales les plus importantes qui doivent créer les conditions de leur mise en œuvre réussie. Parmi les principaux enjeux identifiés pour la question de l'eau dans cette stratégie [28] figurent la valorisation des ressources en eau mobilisées par les barrages, la modernisation de l'agriculture irriguée, la réforme institutionnelle du secteur de l'irrigation et la mobilisation des ressources en eau conventionnelles et non conventionnelles.

Une série de programmes d'irrigation ont été lancés dans le cadre du PMV, dont les principaux effets attendus sont : la protection des ressources en eau et de l'environnement, l'augmentation des rendements des cultures et des revenus des agriculteurs et l'économie de l'eau. Le secrétaire général du ministère de l'Agriculture, de la Pêche Maritime, du Développement Rural et des Eaux et Forêts dans le cadre du webinaire "Adaptation de l'agriculture au contexte de rareté croissante de l'eau: consolider le programme d'amélioration de la productivité de l'eau dans le cadre de Génération Green et de l'approche RISE" [28], [120] a expliqué que « ces programmes sont en particulier du Programme National d'Economie d'Eau en Irrigation (PNEEI), du Programme d'Extension de l'Irrigation (PEI) à l'aval des barrages, du Programme de la Réhabilitation et de Sauvegarde des Périmètres de Petite et Moyenne Hydraulique (PMH) ou encore le Programme de Promotion du Partenariat Public-Privé (PPP), qui ont permis à fin 2019, d'équiper près de 800 000 ha en irrigation, soit environ 50% de la superficie irriguée au niveau national, avec un investissement de 36,1 milliards de DH au profit de 235 000 exploitations, relève la même source. Ces initiatives ont permis d'économiser et de valoriser annuellement plus de 2 milliards de m³ d'eau d'irrigation, dont 1,6 milliard de m³ au titre du PNEEI et la superficie irriguée en goutte à goutte dans la superficie irriguée totale s'est améliorée pour passer de 9% en 2008 à 37% en 2019».

2.3.3.2 Potentialités d'irrigation

Au Maroc, l'agriculture irriguée est considérée comme une composante très importante dans l'économie régionale et nationale car elle permet de développer la richesse de la production et donc la création d'emplois. Le potentiel irrigable est estimé actuellement à 1 664 000 d'hectares [109].

Cette superficie irriguée est divisé en 1 364 000 d'hectares en irrigation pérenne et 300 000 d'hectares en irrigation saisonnière, l'irrigation pérenne est composée de 880 000 d'hectares en Grande Hydraulique (GH) et 484 000 d'hectares en Petite et Moyenne Hydraulique (PMH)

[28], [121]. Rapportée à l'effectif de la population, la superficie irriguée en eau pérenne passera de 0,34 ha par habitant en 1990 à 0,25 ha par habitant en l'an 2020 [28].

En effet, l'agriculture irriguées au Maroc, bien qu'elle ne représente qu'environ 15% des superficies cultivées, contribue à environ 45% du PIB agricole [27], [28]. Par ailleurs, elle contribue en moyenne à 50% des emplois ruraux et constitue à hauteur 75% aux exportations agricoles [27], [28]. Dans ce sens, l'aménagement des cultures irriguées constitue un véritable catalyseur pour l'économie nationale et le développement rural.

2.3.3.3 Typologie des zones irriguées

La politique d'intervention de l'Etat dans l'agriculture irriguée s'est toujours différenciée selon 3 sous-secteurs (voir Figure 2.24) :

- Le sous-secteur de l'Irrigation Privée (IP) comprend tous les aménagements individuels pour l'irrigation réalisés à l'initiative privée des agriculteurs, pouvant aller d'un aménagement rudimentaire à partir d'un puits pour irriguer parfois moins d'un hectare, à un aménagement moderne de grande taille de plusieurs centaines d'hectares. Pour ce sous-secteur, il n'y a pas de chiffres officiels relatifs aux pourcentages des techniques d'irrigation utilisées, mais les différentes sources indiquent que l'irrigation par le gravitaire reste dominante.
- Le sous-secteur de la GH correspond à un potentiel irrigable pérenne de 880 000 ha, et concerne neuf grands périmètres dont la superficie irrigable peut aller de 30 000 à 250 000 ha par périmètre : Haouz, Moulouya, Loukous, Gharb, Doukala, Tadla, Souss-Massa, Tafilalet et Ouarzazate [28], [121]. L'eau d'irrigation provient principalement des barrages. L'aménagement hydro-agricole et la gestion des infrastructures d'irrigation y sont assurés par l'Etat par le biais de neuf Office Régionaux de Mise en Valeur Agricole.
- Le sous-secteur de la PMH comprend tous les périmètres irrigués de taille petite à moyenne répartis sur la totalité du territoire national, et alimentés par des ressources en eau plus ou moins régulières. Dans les périmètres de PMH, dont la superficie aménagée a atteint près de 334 130 ha, la gestion du service de l'eau est confiée aux Associations des Usagers des Eaux Agricoles (AUEA) Ouarzazate [28], [121], qui prennent en charge tous les frais d'exploitation d'entretien et de renouvellement des équipements du réseau d'irrigation.

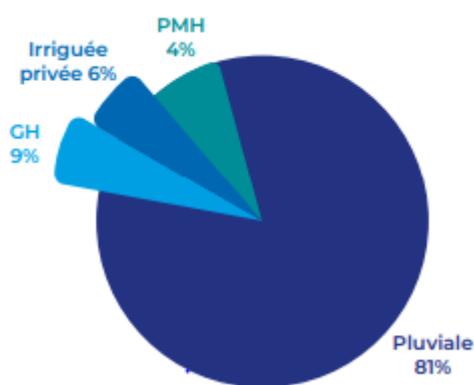


Figure 2.24 Répartition de la SAU selon le type d'irrigation [116].

2.3.3.4 Techniques d'irrigation

Au Maroc, le secteur agricole est l'un des secteurs qui consomme le plus d'eau, principalement pour l'irrigation, il consomme plus de 86% des ressources en eau disponibles [30]. Les performances des systèmes d'irrigation actuels et la régularité de l'irrigation sont restées faibles à très moyennes ce qu'il influe négativement sur la production de ce secteur, aussi les pertes d'eau des systèmes d'irrigation sont croissantes continuellement. Donc la maîtrise de l'utilisation et la gestion du système d'irrigation et de l'eau d'irrigation devient très importante et urgente de nos jours.

Les systèmes d'irrigation au Maroc peuvent être classés selon trois grandes catégories, irrigation gravitaire, irrigation par aspersion et irrigation gouttes-à-gouttes (voir Figure 2.25) :

i. Irrigation gravitaire (Irrigation de surface)

L'irrigation gravitaire est la plus courante et la plus ancienne technique d'irrigation adoptée dans le monde. Elle comprend toute technique d'irrigation dans laquelle l'application et la distribution de l'eau sur la surface du sol se font complètement à l'air libre en utilisant l'écoulement par gravité [122]. Ce mode d'irrigation est composé d'un canal d'amenée, une prise d'eau, un ou plusieurs canaux principaux dominant chacun une zone d'irrigation et des autres canaux. L'utilisation de rivières, de puits tubulaires profonds et de canaux est observée dans ce type d'irrigation.

Cette technique d'irrigation est caractérisée par une faible efficacité d'utilisation de l'eau au niveau de la parcelle. Elle occupe environ 80 % des superficies irriguées à l'échelle mondiale [13] et environ 60 % au Maroc [28], [34]. Cette situation résulte du fait que cette technique n'est pas très complexe à mettre en œuvre et moins exigeante en terme de moyens matériels à l'échelle de la parcelle par rapport à l'irrigation par aspersion ou localisée.

ii. Irrigation par aspersion

L'irrigation par aspersion consiste à reproduire le phénomène naturel de la pluie avec un contrôle de l'altitude et de l'intensité de la pluie. Elle permet d'appliquer et de distribuer l'eau à la surface du sol comme une pluie artificielle. Dans ce type, l'eau est distribuée par un système de tuyaux sous pression puis elle est pulvérisée dans l'air par un ensemble d'asperseurs sous forme de pluie [123]. L'irrigation par aspersion occupe 9% de la superficie équipée en irrigation [28], [30].

Ce type est recommandé dans les cas suivants :

- Un sol trop perméable qui ne permet pas une répartition uniforme de l'eau.
- Un sol de faible profondeur.
- Un terrain à pentes irrégulières.

Par contre, elle est à écarter dans les régions très régulièrement ventées et lorsque l'irrigation se fait avec l'eau salée sur des plantes au feuillage sensible au sel

iii. Irrigation goutte à goutte (Irrigation localisée)

L'irrigation goutte à goutte est une méthode d'irrigation moderne qui permet d'économiser beaucoup d'eau par rapport aux autres systèmes d'irrigation. Cette méthode permet de distribuer l'eau sous forme de gouttes en laissant l'eau s'égoutter lentement jusqu'à la racine de la plante grâce à un ensemble de goutteurs répartis le long des rangées de cultures [124]. Dans l'irrigation goutte à goutte, l'eau est fréquemment appliquée pendant de longues périodes à faible dose, sous faible pression et à faible débit. Elle permet également de réduire le développement des mauvaises herbes. Cette technique occupe environ 37% de la superficie totale irriguée au niveau national [28], [34].



Figure 2.25 Différents systèmes d'irrigation au Maroc.

Les périmètres irrigués sont répartis au Maroc comme le montre la Figure 2.27 et la Figure 2.28. Les actions mises en œuvre dans le cadre du PMV ont permis la réalisation d'une superficie qui adopte l'irrigation goutte-à goutte d'environ 560 000 hectares à la fin de 2018 (soit 37 % de la superficie totale irriguée au niveau national) [28], [34] (voir Figure 2.26). L'irrigation gravitaire représente 63 % de la superficie totale irriguée au niveau national, dont les superficies équipées d'une irrigation de surface couvrent environ 54 % et les superficies équipées d'une irrigation par aspersion couvrent environ 9 % de cette superficie totale [28], [34].

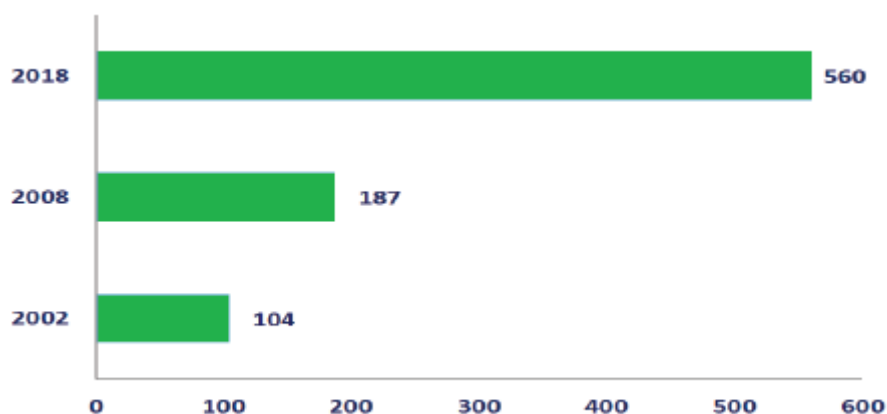


Figure 2.26 Evolution des superficies équipées par une irrigation localisée (en milliers d'hectares) [34].

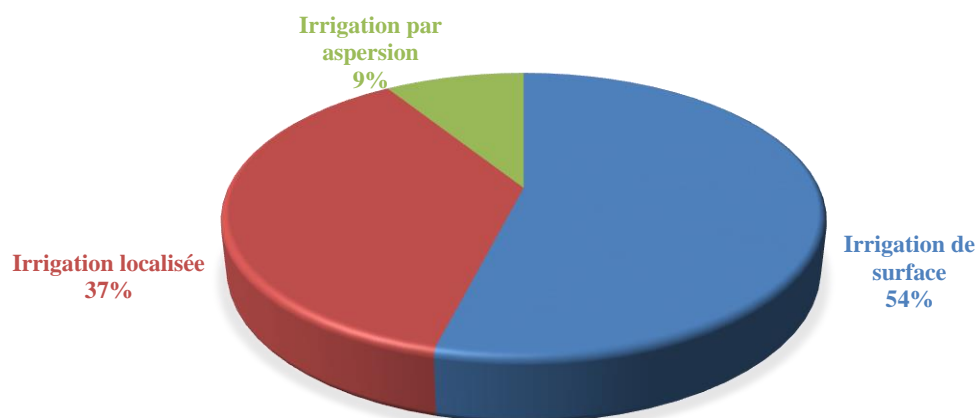


Figure 2.27 Superficies irriguées au Maroc selon le mode d'irrigation.

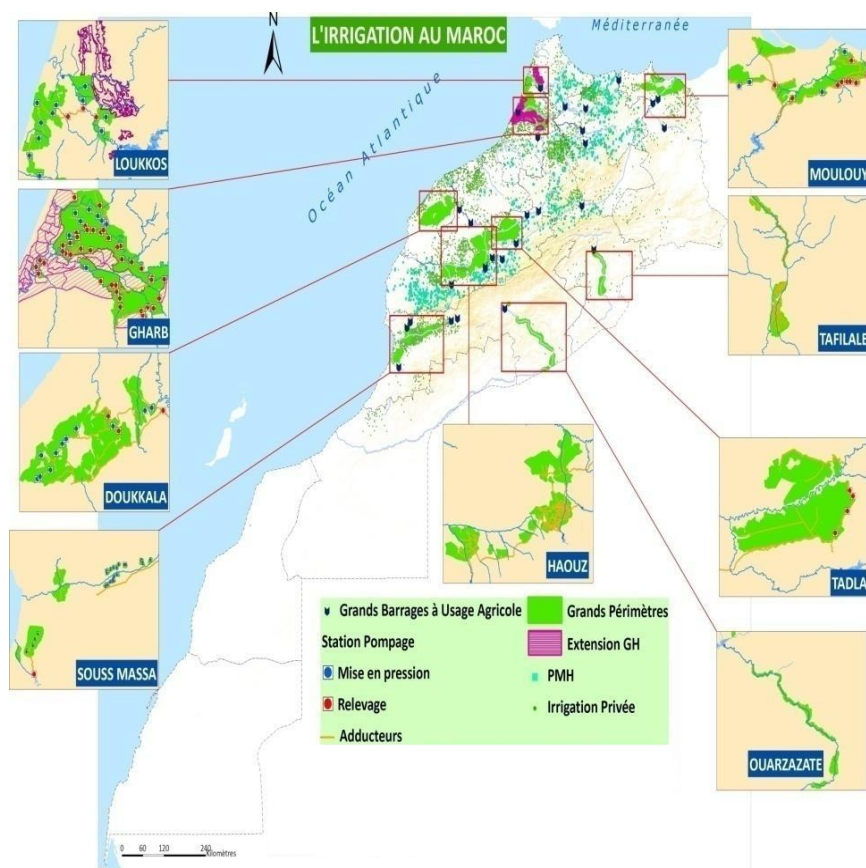


Figure 2.28 Superficies irriguées au Maroc [28].

2.3.4 Synthèse

D'après des données ci-dessus, on peut résumer :

Agriculture irriguée :

15% Superficie Agricole Utile

Plus 86% Ressources en eau

75% Exportations agricoles

50% Emplois en milieu rural

45% Valeur ajoutée agricole

L'irrigation au Maroc a toujours été un impératif et un instrument privilégié pour assurer l'accroissement de la productivité agricole, garantir une stabilité de la production et améliorer le revenu des agriculteurs. Son développement reste cependant tributaire des potentialités du pays notamment, en matière de ressources en eau.

A partir des données que nous avons déjà présentées, l'irrigation de surface est la plus utilisée, elle occupe plus de 54% de la superficie équipée en irrigation. Donc le système d'irrigation utilisé au Maroc s'effectue par des voies traditionnelles, chaque fois on arrose

l'ensemble des terres et en conséquence on perd une quantité importante d'eau, et selon les spécialistes la pénurie d'eau sera l'un des plus grands freins au développement pour les années à venir.

En outre, l'eau est considérée comme l'un des enjeux majeurs de nos jours car l'eau disponible pour l'utilisation humaine ne représente que 1% de toute l'eau terrestre. Alors que les ressources en eau douce ne sont pas extensibles, la demande explose sous l'effet d'une croissance rapide de la population mondiale qui puise dans les réserves mondiales d'eau de notre planète, et d'une augmentation exponentielle de la consommation, la diminution des quantités d'eau superficielles captées, l'impératif de l'augmentation de la productivité du secteur agricole irrigué et les sécheresses consécutives (marqués durant les deux dernières décennies). Ces raisons nous poussent à rationaliser l'utilisation de l'eau d'irrigation afin de réduire les pertes de cette dernière. Une rationalisation qui passe par le développement et l'amélioration de l'efficacité des techniques utilisées, une gestion efficace de l'eau d'irrigation, le choix adéquat du système d'irrigation et par l'introduction de techniques plus économes en eau.

2.4 Agriculture de précision

Selon la société internationale d'agriculture de précision [125], l'agriculture de précision (PA) est défini comme suit : " une stratégie de gestion qui recueille, traite et analyse des données temporelles, spatiales et individuelles et les combine avec d'autres informations pour soutenir les décisions de gestion en fonction de la variabilité estimée pour une meilleure efficacité d'utilisation des ressources, la productivité, la qualité, la rentabilité et la durabilité de la production agricole".

PA est également définie comme un concept de gestion des terres agricoles qui cherche à prendre plus efficacement en compte la diversité des environnements et des conditions, ainsi que la diversité des parasites, les différents besoins des cultures et les différentes caractéristiques des sols [126], [127]. Elle vise à améliorer et à développer le processus de prise de décision pour gérer l'ensemble de l'exploitation agricole grâce à une gamme de nouvelles technologies et pratiques tout en améliorant les rendements des cultures et en réduisant la consommation d'eau, d'intrants et d'énergie. Elle a donc touché la plupart des services agricoles tels que la pulvérisation de pesticides, l'irrigation, la fertilisation, les semis et le travail du sol, ce qui a amélioré l'efficacité de la lutte contre les parasites et l'application d'eau, de nutriments, de semences et d'autres intrants agricoles.

PA nous permet de développer et d'améliorer des outils pour aider les agriculteurs à prendre de meilleures décisions en améliorant l'analyse et la compréhension des besoins physiologiques de la culture. De manière générale, nous pouvons considérer quatre étapes importantes à suivre dans une approche de ce concept. (1) Mesure et collecte d'un ensemble de données spécifiques sur une parcelle agricole particulière, les données peuvent être collectées à l'aide de réseaux de capteurs sans fil. (2) Traitement de ces données, ce traitement peut être effectué à l'aide de logiciels embarqués. (3) Analyse des données traitées pour une prise de décision efficace. Enfin, la quatrième étape est l'adaptation et la mise en œuvre des décisions de gestion agricole.

En général, les terres agricoles sont hétérogènes (p. ex., les besoins en eau et engrais ne sont pas toujours les mêmes, ils diffèrent selon les zones cultivées), en fonction de cette hétérogénéité, le principe de l'agriculture de précision repose sur l'amélioration des différentes étapes de la gestion des parcelles agricoles pour déterminer la bonne dose, au bon moment, et au bon endroit. PA repose sur l'utilisation des nouvelles technologies et notamment des technologies numériques telles que l'analyse d'images satellites, le drone agricole, l'application d'intrants à doses variables, la cartographie électromagnétique des sols, les capteurs connectés, le système d'information géographique, les outils d'aide à la décision, les robots, le système de positionnement global et les applications mobiles [128]–[131], qui aident l'agriculteur à prendre les meilleures décisions possibles pour ses cultures.

Il est clair que ces outils technologiques sont très essentiels pour l'agriculture de précision, mais ce ne sont que des outils, selon Gilbert Grenier [132]. Ces outils doivent servir un objectif, un projet agricole et une cause. La révolution numérique en agriculture ne doit pas être considérée comme une avancée purement technologique, mais plutôt comme une avancée agronomique car elle inclut des méthodes de travail, des outils et surtout des connaissances agronomiques [132]. Par conséquent, on peut dire que PA est un concept basé sur l'information et dirigé par la technologie.

Étant donné la précision de la production agricole et l'amélioration des intrants au niveau de PA, cette dernière est considérée comme le moyen optimal de faire progresser le secteur agricole au cours des dernières décennies [128]. L'agriculture de précision permet une optimisation significative des besoins des cultures. De sorte qu'elle offre de nombreux avantages grâce à une gestion plus précise, comme l'obtention d'une meilleure empreinte écologique, l'offre de rendements agricoles plus élevés et la réalisation d'importantes économies [133], [134]. Aussi, elle répond à de nombreux enjeux, notamment environnementaux et sociaux afin d'assurer une réduction de l'empreinte écologique de

l'activité agricole tout en répondant aux besoins alimentaires croissants, économiques afin d'augmenter la compétitivité par des pratiques plus efficaces, et agronomiques et zootechniques, c'est-à-dire l'optimisation de la production et des besoins des animaux et des cultures.

Bien que de nombreuses technologies modernes soutiennent l'agriculture de précision, son adoption est souvent influencée par une variété de facteurs. Les facteurs technologiques ((p. ex., la complexité du système, la disponibilité de l'équipement, la disponibilité du soutien technique, la volonté d'utiliser des ordinateurs et la facilité d'utilisation), les perceptions des agriculteurs, les facteurs agro-écologiques (p. ex., la qualité du sol, le rendement, le capital, l'emplacement, les taux d'engrais variables, la spécialisation de l'exploitation et la taille de l'exploitation), les facteurs informationnels, les facteurs institutionnels et les facteurs socio-économiques (p. ex., le statut d'emploi de l'exploitant agricole, le niveau d'éducation, l'âge, le sexe et la situation financière) sont parmi les facteurs importants qui influencent le succès de l'agriculture de précision, le statut professionnel de l'exploitant agricole, le niveau d'éducation, l'état civil, l'âge, le sexe et la situation financière) sont parmi les facteurs importants qui influencent le taux de réussite de l'adoption de l'agriculture de précision dans le secteur agricole [135], [136]. Ces facteurs sont soit des facteurs modifiables (p. ex., les facteurs informationnels et institutionnels), soit des facteurs relativement fixes dans le temps (p. ex., les facteurs technologiques et socio-économiques) [136], qui fournissent une base de données précieuse pour la gestion efficace de PA.

2.5 Irrigation de précision

Il est aujourd'hui admis que jusqu'à 50% de l'eau d'irrigation est gaspillée [21] en raison d'un excès d'arrosage causé par l'inefficacité des méthodes et systèmes d'irrigation traditionnels.

L'irrigation de précision est une nouvelle technique d'irrigation fondée sur le savoir qui offre aux agriculteurs des possibilités souples et fiables d'irrigation. Les systèmes d'irrigation de précision permettent d'adapter les programmes et les durées d'arrosage pour répondre aux besoins spécifiques et particuliers de chaque culture. Ces systèmes améliorent considérablement l'efficacité de l'utilisation de l'eau d'irrigation.

Selon la FAO [13], la définition de l'irrigation de précision est la gestion durable des ressources en eau ce qui implique l'application d'eau à la récolte au bon moment, la bonne quantité, au bon endroit et la bonne manière aidant ainsi à gérer la variabilité du domaine de

l'eau et par conséquent, augmenter l'efficacité de la productivité des cultures ainsi que la réduction des coûts de l'énergie sur les opérations d'irrigation.

L'irrigation de précision alimente la plante, pas le sol, elle permet d'apporter de l'eau et des nutriments directement aux racines, ce que réduisent les pertes par évaporation ou par percolation et donc les coûts.

Plusieurs techniques ont été développées à cet effet, y compris les systèmes d'irrigation goutte à goutte. Plusieurs facteurs tels que les propriétés du sol et les conditions météorologiques peuvent affecter la gestion et le contrôle des systèmes d'irrigation. Ces systèmes donnent des résultats visibles, mais nous pouvons accroître leurs efficacités et performances en utilisant des nouvelles technologies, dans le but de minimiser la consommation d'eau.

Pour atteindre cet objectif, l'automatisation et la prise de décision intelligente deviennent de plus en plus importantes. Des technologies telles que les réseaux de capteurs sans fil, l'Internet des objets (IoT) et le cloud computing soutiennent le service d'irrigation pour améliorer la surveillance et la capacité de prise de décision de manière intelligente.

Les avancées technologiques dans les réseaux de capteurs sans fil ont aidé à soutenir les systèmes d'irrigation dans une direction très positive. Ainsi, l'utilisation de la technologie de réseau de capteurs sans fil pour contrôler et gérer les systèmes d'irrigation est une solution idéale pour assurer une utilisation efficace et rationnelle de l'eau et réduire ainsi la gravité de la crise mondiale de l'eau.

➤ Avantages

L'irrigation intelligente a pour objectif d'augmenter à la fois le rendement et la qualité de la production agricole et l'efficacité de l'utilisation de l'eau.

L'irrigation intelligente vise à économiser l'eau utilisée pendant l'irrigation et réduire ainsi la gravité de la crise mondiale de l'eau.

Il permet également de réduire les coûts, la main-d'œuvre, l'énergie et le temps.

De nombreux chercheurs ont mentionné que l'irrigation intelligente est la solution la plus appropriée pour réaliser d'importantes économies d'eau dans le secteur agricole.

➤ Inconvénients :

Pour bien gérer l'irrigation intelligente, la personne responsable doit recevoir une formation pour une gestion appropriée.

L'automatisation des systèmes d'irrigation sur grandes surfaces est très compliquée.

➤ Obstacles à surmonter :

Parmi les principaux obstacles qui doivent être surmontés est d'aider les agriculteurs à adopter des méthodes d'irrigation intelligentes. Donc il doit élever le niveau de conscience des avantages de l'irrigation intelligente grâce à la diffusion des recherches sur ce sujet. Il doit également fournir des formations et un soutien technique aux agriculteurs dans ce contexte. Des zones à forte salinité du sol ou à mauvaise qualité de l'eau est un autre obstacle.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté en premier lieu la crise de l'eau dans le monde et au Maroc, en expliquant certaines causes et solutions à cette crise. Ensuite, nous avons présenté la situation de l'agriculture au Maroc, les ressources en eau disponibles et les systèmes d'irrigation en place. Enfin, nous avons présenté l'agriculture de précision et l'irrigation de précision.

Le contexte problématique de notre thèse est bien expliqué dans ce chapitre. Dans ce qui suit, nous présenterons une description détaillée des capteurs et des réseaux de capteurs sans fil, qui est une solution idéale pour l'amélioration des systèmes d'irrigation.

Chapitre 3

Technologie des réseaux de capteurs sans fil

Sommaire

3.1	Introduction.....	71
3.2	Réseaux sans fil.....	71
3.3	Réseaux de capteurs sans fil.....	77
3.4	Nœuds de capteur.....	102
3.5	Conclusion.....	116

3.1 Introduction

Les réseaux de capteurs sans fil ont suscité un grand intérêt aux niveaux académique et industriel en raison du l'énorme développement technologique auquel le monde entier est témoin, en particulier le développement des technologies électroniques et de communications sans fil et la révolution dans l'industrie. Le réseau de capteurs sans fil est une classe particulière de réseaux Ad Hoc, qui est le résultat de la fusion de la technologie microélectronique et des technologies de communication sans fil. Un RCSF est un réseau de grand nombre des éléments de détection, nœuds de capteurs, qui intègrent des capacités avancées et communiquent entre eux par le biais d'une communication sans fil pour l'échange d'informations et le traitement en coopération. Ce réseau est capable de transmettre, détecter, gérer, convertir, et recevoir des données environnementales d'une manière autonome sans intervention humaine, notamment dans des environnements éloignés ou hostiles ; Tout cela est dû aux efforts de collaboration du grand nombre de nœuds de capteurs dans le RCSF. Cela permet au réseau de participer activement à la création d'environnements intelligents.

Ce chapitre est scindé en trois parties. Dans la première partie, nous donnerons un aperçu sur les réseaux sans fil. Dans la deuxième partie, nous ferons une présentation détaillée des réseaux de capteurs sans fil en décrivant leur fonctionnement, leurs domaines d'applications, leurs caractéristiques, leur situation par rapport aux autres réseaux sans fil, leurs classifications, leurs architectures, leur pile protocolaire ainsi qu'un bref aperçu du routage en RCSF. Dans la troisième partie, nous présenterons les nœuds de capteurs.

3.2 Réseaux sans fil

Un réseau sans fil [137] est un réseau informatique qui connecte différents postes ou systèmes entre eux par des ondes radio (sans liaison filaire). Où les terminaux du réseau se déplacent librement, tandis que le système doit assurer toutes les fonctionnalités et tous les services d'un réseau classique. Grâce à ce réseau sans fil, un utilisateur a la possibilité de rester connecté tout en se déplaçant dans un périmètre géographique plus ou moins étendu.

Les réseaux sans fil permettent de relier très facilement des équipements distants d'une dizaine de mètres à quelques kilomètres. De plus l'installation de tels réseaux ne demande pas de lourds aménagements des infrastructures existantes comme c'est le cas avec les réseaux filaires.

3.2.1 Caractéristiques des réseaux sans fil

Il existe plusieurs caractéristiques qui distinguent les réseaux sans fil, parmi lesquelles on trouve :

3.2.1.1 Fiabilité

Dans les réseaux sans fil, la propagation des signaux peut être perturbée à partir de plusieurs critères (p. ex., erreur de transmission et délai d'attente) dues à l'environnement qui abîme l'information transmise.

3.2.1.2 Sécurité

Plus que dans les réseaux filaires, la sécurité est d'une importance primordiale dans les réseaux sans fil. Cela est dû à l'absence du câblage dont il résulte la diffusion de l'information facilitant l'interception à distance et la sensibilité au brouillage augmentant les interférences dans le réseau.

3.2.1.3 Facilité de l'utilisation et de déploiement

L'absence de câbles dans les réseaux sans fil permet une flexibilité soit dans l'utilisation ou le déploiement de ce réseau.

3.2.1.4 Topologie dynamique

Les réseaux sans fil changent souvent de topologies en raison de la mobilité constante des nœuds qui forment la topologie de ce réseau.

3.2.1.5 Faible débit

Les débits des connexions sans fil ont toujours été loin derrière ceux des connexions filaires [138]. Pendant longtemps, Il a fallu se contenter de quelques kilobits par seconde qui ne pouvaient être comparés aux débits des réseaux filaires où l'on parle depuis longtemps en mégabits par seconde, alors que la filaire peut atteindre sans difficulté le gigabit par seconde, voire même le téra-bit par seconde [138].

3.2.2 Classification des réseaux sans fil

Un réseau sans fil est un réseau où au moins deux nœuds peuvent avoir une communication sans liaison filaire. Les réseaux sans fil peuvent être classés en deux catégories principales : l'une en fonction l'architecture et l'infrastructure de communication adoptée et l'autre selon la zone de couverture ou la taille du réseau, comme illustré à la Figure 3.1.

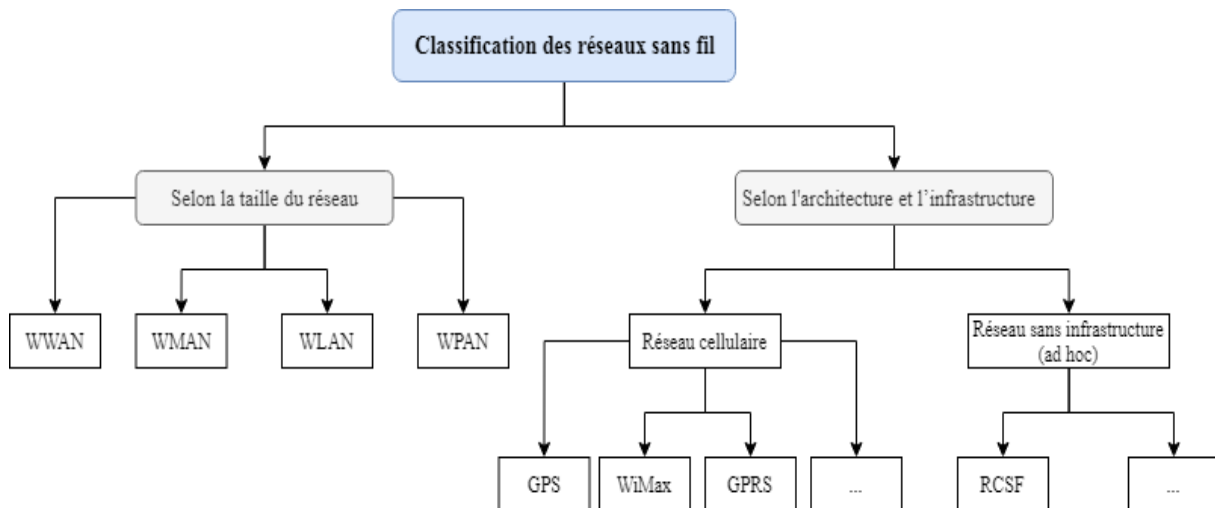


Figure 3.1 Catégories des réseaux sans fil.

3.2.2.1 Réseaux sans fil selon l'architecture et l'infrastructure de communication

Cette classification est adoptée en deux catégories : les réseaux Ad Hoc sans infrastructure fixe, où les nœuds communiquent directement entre elles et les réseaux cellulaires avec infrastructure, où les nœuds communiquent par le biais de points d'accès. Plusieurs technologies sont apparentées aux réseaux cellulaires tels que GPS, WiMax et GPRS, et aux réseaux Ad Hoc comme les RCSF (voir Figure 3.2).

i. Réseaux cellulaires

Un réseau sans fil avec infrastructure est un système de communication utilisé principalement des réseaux filaires et des stations de base qui couvrent les différentes unités mobiles du système.

Un réseau cellulaire est un réseau dont l'architecture de communication est déterminée au préalable. Il est constitué de sites fixes interconnectés entre eux à travers un réseau de communication filaire, généralement fiable et d'un débit élevé. Parmi les sites fixes, on

retrouve les stations de bases (SB). Chacune d'eux définit une région appelée cellule et administre un ensemble d'unités mobiles (UM) qui communiquent entre elles par une liaison sans fil possédant une bande passante limitée qui réduit sévèrement le volume des informations échangées.

Une cellule est une zone de couverture où les nœuds communiquent avec d'autres nœuds à l'intérieur ou à l'extérieur de la cellule.

La Figure 3.2 schématise l'architecture, les principales caractéristiques des réseaux cellulaires.

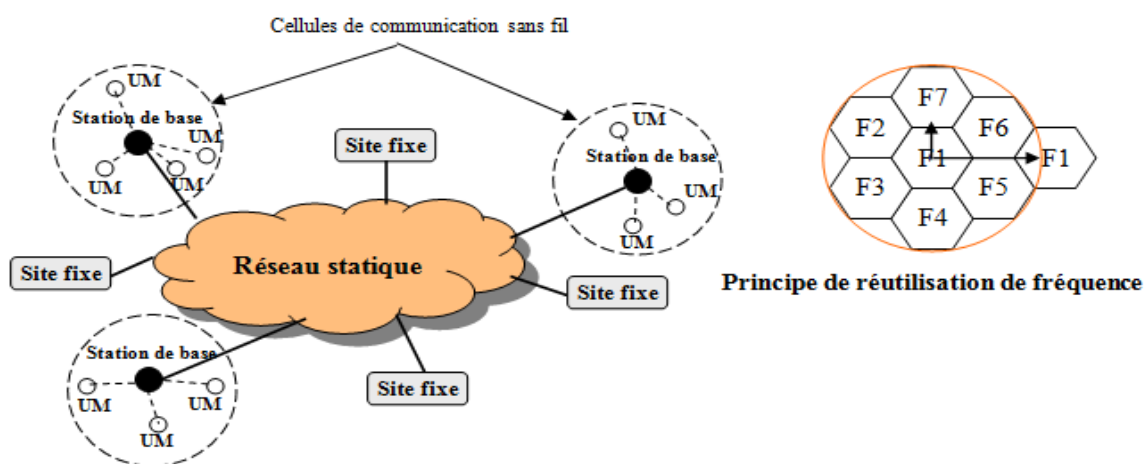


Figure 3.2 Modèle de réseaux sans fil avec infrastructure.

Parmi les sites fixes, on retrouve les stations de bases, appelées aussi points d'accès. Chaque station de base définit une région appelée cellule, celle-ci correspond à la zone de couverture à partir de laquelle les unités mobiles peuvent émettre et recevoir des messages venants d'autres nœuds de l'intérieur ou de l'extérieur de la cellule. La communication entre deux nœuds connectés à deux points d'accès différents passe forcément par les SB correspondant aux cellules. Ces SB sont reliées entre elles par des liens filaires.

La configuration standard d'un système de communication cellulaire est un maillage de cellules hexagonales. C'est-à-dire que chaque cellule couvre une zone géographique selon la portée de la SB correspondante, mais lorsque la compétition devient importante pour l'allocation des canaux, la cellule est généralement divisée en sept cellules plus petites, comme le montre la Figure 3.2.

Le principal avantage de l'utilisation d'un réseau cellulaire est qu'il utilise un nombre minimum de fréquences, et la même fréquence peut être utilisée par plusieurs systèmes tant qu'ils sont situés dans une cellule différente.

ii. Réseaux Ad Hoc

Un réseau ad hoc est un type particulier de réseau sans fil qui étend le concept de mobilité : chaque périphérique communique directement avec les périphériques situés à sa portée, sans passer par un intermédiaire.

De nombreux systèmes utilisent déjà le modèle cellulaire et connaissent une très forte expansion, mais nécessitent une importante infrastructure logistique et physique fixe. La contrepartie des réseaux cellulaires sont les réseaux mobile Ad Hoc. Un réseau mobile Ad-hoc peut être défini comme un groupe d'entités mobiles interconnectées par une technologie sans fil qui forme un réseau temporaire sans l'aide de toute administration ou de tout support fixe [139] (voir Figure 3.3).

Une définition de ces réseaux est formellement fournie dans la RFC2501 [140]: « Un réseau mobile Ad-hoc comprend des plates-formes mobiles (par exemple, un routeur interconnectant différents hôtes et équipements sans fil) appelées nœuds qui sont libres de se déplacer sans contrainte. Un réseau mobile Ad-hoc est donc un système autonome de nœuds mobiles. Ce système peut fonctionner d'une manière isolée ou s'interfacer à des réseaux fixes au travers de passerelles». C'est la caractéristique qui distingue les réseaux mobiles Ad-hoc des réseaux sans fil plus traditionnels comme les réseaux cellulaires et les réseaux locaux sans fil.

Il n'y a aucune supposition ou limitation sur la taille du réseau. Cela signifie que ce type de réseau peut avoir très grande taille.

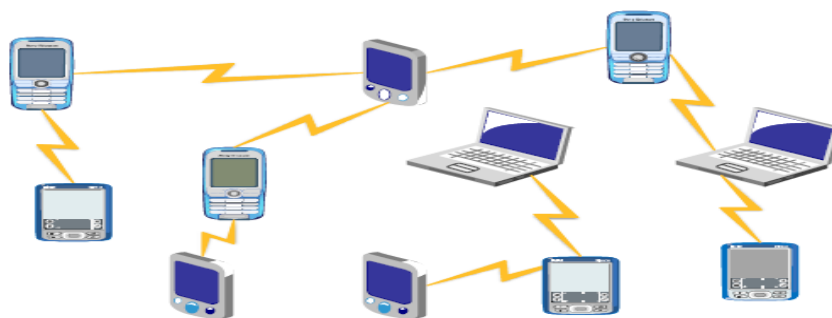


Figure 3.3 Modèle de réseaux sans fil sans infrastructure.

On peut donc dire que le réseau mobile Ad Hoc est un réseau sans fil sans infrastructure fixe, utilisant généralement le médium radio, où chaque nœud peut jouer le rôle de client et de routeur. Les réseaux ad hoc sont auto-organisés, ce qui signifie que la connectivité doit être maintenue autant que possible automatiquement lorsque la topologie du réseau change [141].

On dit qu'un nœud N1 est adjacent à un autre nœud N2, si N1 se trouve dans la zone d'émission de N2. Donc, il est nécessaire de définir des règles de gestion d'accès. En ce sens, lorsqu'un nœud envoie, tous ses voisins ne peuvent être qu'en mode réception. A cause de la

limite de la portée de transmission des nœuds, des relais doivent être spécifiés pour assurer la communication entre deux nœuds qui ne s'entendent pas. Ce processus est appelé routage multi-sauts (voir Figure 3.4). Ainsi, tous les nœuds du réseau Ad hoc collaborent pour assurer les services fournis habituellement par les stations de base dans les réseaux avec infrastructure.

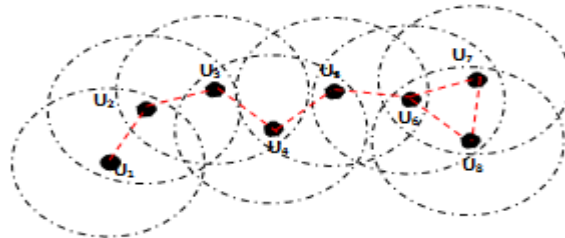


Figure 3.4 Routage multi-saut.

3.2.2.2 Réseaux sans fil selon leur zone de couverture

Une autre classification peut être faite selon la zone de couverture ou la taille du réseau pour les réseaux sans fil est possible, ils sont donc divisés en quatre catégories : les réseaux personnels, les réseaux locaux, les réseaux métropolitains et les réseaux étendus (voir Figure 3.1).

i. Les réseaux personnels sans fil (WPAN)

Les réseaux personnels sans fil sont des réseaux sans fil à très faible portée. Ce sont des réseaux à l'échelle humaine dont la portée maximale est limitée à quelques dizaines de mètres autour de l'utilisateur. Ce type de réseau sert généralement à relier des périphériques. Il est souvent utilisé pour connecter les matériels d'une personne (p. ex., une oreillette et un téléphone portable) entre eux. Il est également utilisé pour relier des équipements informatiques entre eux sans liaison filaire (p. ex., une imprimante à un ordinateur de bureau). Il existe plusieurs technologies utilisées pour les réseaux personnels sans fil telles que les liaisons infrarouges, ZigBee et Bluetooth.

ii. Les réseaux locaux sans fil (WLAN)

Les réseaux locaux sans fil [142] sont des réseaux sans fil qui couvrent une portée d'environ une centaine de mètres. Ils sont utilisés pour relier entre eux des terminaux qui se trouvent dans la zone de couverture. Ils sont associés à des applications couvrant un campus, un bâtiment, un aéroport ou un hôpital. Les réseaux locaux sans fil sont généralement utilisés à l'intérieur d'une entreprise ou d'une université, mais également chez les particuliers. Ces réseaux reposent principalement sur des technologies telles que HiperLAN et Wi-Fi.

iii. Les réseaux métropolitains sans fil (WMAN)

Les réseaux métropolitains sans fil sont similaires aux réseaux locaux sans fil en ce sens qu'ils utilisent le même matériel requis pour configurer un WLAN, mais ils peuvent couvrir une plus grande zone de la taille d'une ville avec une portée allant jusqu'à 50 Km [143]. Ce réseau est également connu sous le nom de Boucle Locale Radio (BLR). La BLR permet, en plaçant une antenne parabolique sur le toit d'un immeuble, de transmettre la voix et les données à haut débit par voie hertzienne pour l'accès Internet et la téléphonie. Il existe plusieurs types de WMAN, dont les plus connus sont HiperMAN et WiMAX.

iv. Les réseaux étendus sans fil (WWAN)

C'est la catégorie de réseaux cellulaires mobiles dont la zone de couverture est très large, à l'échelle mondiale. Il est le plus répandu de tous puisque tous les téléphones mobiles sont connectés à un réseau étendu sans fil. Les principales technologies sont : UMTS, GPRS et GSM.

3.3 Réseaux de capteurs sans fil

3.3.1 Présentation et motivation des RCSF

Alors que le monde devient de plus en plus câblé, l'un des principaux avantages de la communication sans fil est la mobilité, car l'utilisateur peut accéder au réseau par voie aérienne à partir de divers endroits et profiter d'un réseau facilement extensible.

Au cours des dernières décennies, la nécessité de surveiller et de contrôler les environnements hostiles ou éloignés est devenue essentielle dans de nombreux domaines de notre vie. Le réseau de capteurs sans fil est aujourd'hui l'une des technologies de communication sans fil les plus avancées qui pourraient être incluses comme application potentielle dans divers domaines de notre vie.

Les RCSF sont des réseaux qui ont émergé à la suite des énormes progrès de la technologie sans fil et de la prolifération de la technologie des MEMS. Ils sont auto-configurables qui utilisent des signaux radio et sont constitués de milliers de petits appareils indépendants répartis dans l'espace, équipés de capteurs qui leur permettent de détecter et de mesurer des changements de comportement environnemental dans le monde physique.

3.3.2 Définitions

Un réseau de capteurs sans fil est composé d'un nombre très important d'éléments de détection, nommés nœuds de capteurs, qui communiquent entre eux via des communications sans fil pour l'échange d'informations et le traitement en coopération. Les nœuds de capteurs possèdent diverses capacités (p. ex., traitement, transmission et sensation) de sorte qu'ils peuvent s'auto-organiser et se déployer de manière précise ou aléatoire.

Un RCSF est un réseau de nœuds qui collectent un ensemble de conditions physiques ou environnementales afin de les transmettre de manière coopérative et autonome vers des points de traitement pour contrôler un phénomène particulier [4]–[6]. Le réseau de capteurs remplit trois fonctions fondamentales [57], ce qui le rend actif dans la création d'environnements intelligents [5], à savoir :

- Détection : les nœuds collectent les données nécessaires.
- Communication : les nœuds communiquent entre eux et avec la station de base, et la station de base communique avec le contrôleur.
- Calcul via des programmes, un microcontrôleur, du matériel et des algorithmes.

Le réseau de capteur sans fil contient trois éléments principaux [144], [145]. (1) Un nœud assure que les données collectées sont converties en signaux électriques et transmises à la passerelle. (2) Une passerelle collecte l'ensemble de données que les nœuds envoient et s'assure que ces données sont transmises à la station de base. (3) Une station de base garantit que toutes les données collectées sont traitées et que les résultats obtenus sont analysés.

3.3.3 Fonctionnement

Dans un réseau de capteurs sans fil, comme décrit dans la Figure 3.5, les nœuds de capteur sont dispersés sur le champ dans une zone de détection. Chaque nœud utilise ses capacités pour recueillir et acheminer des données afin de créer une vue globale du champ contrôlé. Les données collectées sont acheminées directement ou via d'autres nœuds selon une architecture à sauts multiples vers un point de collecte, appelé station de base, pour un traitement ultérieur. La station de base peut également servir de nœud passerelle lorsqu'il est nécessaire de communiquer et de se connecter au réseau externe pour l'analyse des données et la prise de décision [4]–[7].

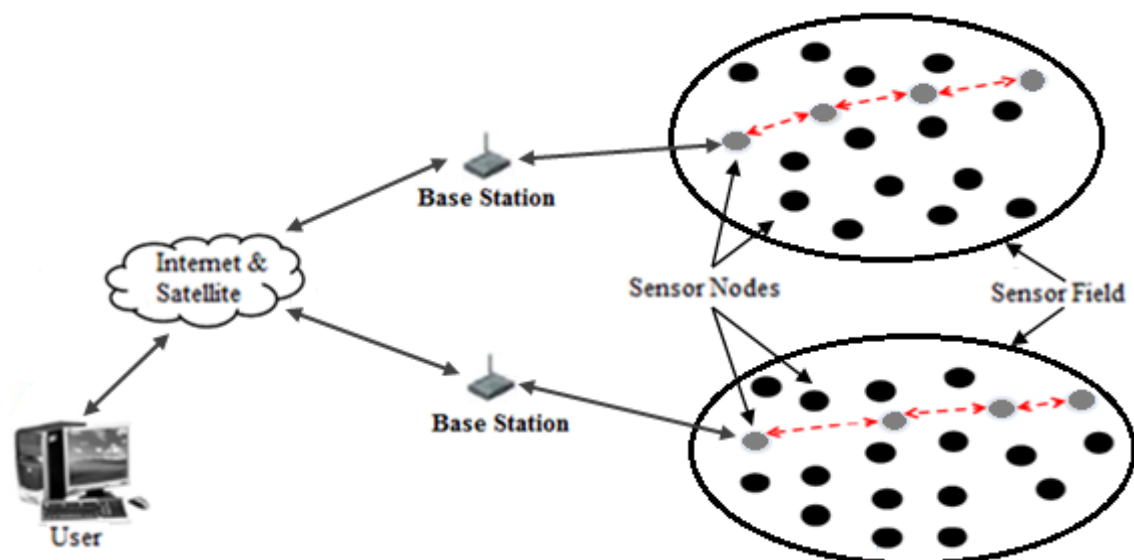


Figure 3.5 Structure d'un réseau de capteurs sans fil.

Dans la Figure 3.5, on observe que les capteurs sont déployés d'une manière aléatoire dans une zone d'intérêt, et que la station de base (située à l'extrémité de cette zone), se charge de récupérer les données collectées par les capteurs. Lorsqu'un capteur détecte un événement pertinent, un message d'alerte est envoyé à la station de base par le biais d'une communication entre les capteurs. Les données collectées sont traitées et analysées par des machines puissantes.

3.3.4 Principales caractéristiques des RCSF

Certaines des principales caractéristiques d'un réseau de capteurs sans fil [72]–[74] qui en ont fait un outil potentiel dans divers services agricoles, tels que l'irrigation, sont les suivantes :

3.3.4.1 Topologie dynamique

Les capteurs peuvent être attachés à des objets mobiles qui se déplacent d'une façon libre et arbitraire rendant ainsi la topologie du réseau fréquemment changeante.

Donc la topologie du réseau de capteurs sans fil est dynamique avec des changements fréquents ce qui provoque de nombreux problèmes dans le réseau [146]. Les techniques de gestion et de contrôle de la topologie [147], [148] permettent de mieux configurer la topologie dynamique du réseau afin d'établir une bonne communication et une bonne collaboration entre les capteurs du réseau, ainsi que d'obtenir une meilleure topologie de communication.

3.3.4.2 Haute densité de nœuds

Un réseau de capteurs sans fil peut contenir un grand nombre de nœuds (des dizaines à des milliers). Les RCSF se distinguent par leur densité élevée telle que leur densité, selon le type d'application, peut atteindre 20 nœuds / m³ [4].

3.3.4.3 Évolutivité

Indépendamment de la taille du réseau et du nombre de nœuds déployés, la conception des protocoles RCSF a été conçue pour permettre une bonne mise en œuvre dans différentes circonstances, que ce soit avec une charge de travail accrue ou avec la croissance du réseau [149]. Cette caractéristique élargit sans aucun doute le potentiel des RCSF pour de nombreuses applications agricoles [56].

3.3.4.4 Tolérance aux pannes

Le réseau de capteurs sans fil est soumis à une série de défaillances de nœuds de capteurs telles que l'épuisement de la batterie, les interférences environnementales et la défaillance du composant matériel [150]. En utilisant des stratégies de tolérance aux pannes dans RCSF [151], la caractéristique de tolérance aux pannes vise à améliorer la fiabilité et la disponibilité du RCSF.

3.3.4.5 Propriété d'adaptation à différents environnements

Un réseau de capteurs sans fil peut s'adapter à différents environnements, de sorte qu'il est souvent déployé dans des environnements hostiles où l'intervention humaine ne peut être maintenue [152], [153].

3.3.4.6 Collaboration et la prise de décision intelligente

Les réseaux de capteurs sans fil sont de nature à sauts multiples [4]. Dans une grande zone, cette fonction améliore l'efficacité énergétique de l'ensemble du réseau et, par conséquent, la durée de vie du réseau augmente. En utilisant cette fonctionnalité, plusieurs nœuds de capteurs collaborent pour atteindre un objectif ciblé, c.-à-d., prendre une décision finale collectivement [154], [155].

3.3.4.7 Hétérogénéité des nœuds

Les réseaux de capteurs sans fil sont souvent supposés être composés de dispositifs homogènes fixés à des capteurs [147], [156]. Cependant, dans de nombreux scénarios réalistes, les dispositifs sont hétérogènes en ce qui concerne la puissance de traitement et de calcul, la mémoire, la capacité de détection, l'unité émettrice-réceptrice et la capacité de mouvement.

3.3.4.8 Mode de fonctionnement autonome

Une caractéristique importante des réseaux de capteurs sans fil est leur mode de fonctionnement autonome sans surveillance dans des zones éloignées ou hostiles [157] et leur capacité d'adaptation [153]. Cette caractéristique joue certainement un rôle important et permet un mode de fonctionnement simple et avancé dans des applications agricoles.

3.3.4.9 Tolérance aux défaillances de communication dans des conditions environnementales difficiles

Un réseau de capteurs sans fil est souvent soumis à diverses conditions environnementales difficiles en raison de son application dans des environnements hostiles ou inaccessibles, par exemple des environnements agricoles ouverts [56]. Pour contourner ce problème, la pile de protocoles RCSF comprend des techniques permettant de résister aux effets des défaillances de communication dans le réseau dues aux effets environnementaux.

3.3.4.10 Auto-configuration des nœuds

L'auto-configuration est une caractéristique nécessaire des RCSF [145] car, d'une part, le nombre de nœuds capteurs est très important, et d'autre part, le RCSF est déployé de manière aléatoire dans la plupart des applications. Ainsi, dans un RCSF, un nœud de capteur doit avoir les capacités de s'auto-configurer et de collaborer avec d'autres nœuds afin de reconfigurer dynamiquement le réseau en cas de changement de topologie du réseau [158].

3.3.5 Comparaison entre les RCSF et les réseaux sans fil classiques

Le réseau de capteurs sans fil est un type particulier de réseau Ad-hoc. Cependant, plusieurs raisons font la différence entre les RCSF et les réseaux Ad-hoc [159], [160].

- Le flux de données pour les réseaux de capteurs est « Many to one », c.-à-d., à partir de plusieurs nœuds capteurs vers le nœud puits, alors qu'il est « Any to Any », c.-à-d., entre n'importe quelle paire de nœuds, pour les réseaux Ad-hoc.
- Le nombre de nœuds dans les réseaux de capteurs sans fil est beaucoup plus important que celui dans un réseau Ad-hoc.
- Les nœuds de capteur sont déployés de manière dense à cause de leur faible portée de communication, tandis que les nœuds des réseaux ad hoc sont, quant à eux, plus éloignés les uns des autres grâce à leur portée de communication supérieure.
- Le grand nombre de nœuds déployés ainsi que la nature des applications rendent difficile et inappropriée l'identification globale des nœuds des réseaux de capteurs, ce qui contraste avec les réseaux ad hoc qui utilisent par exemple l'adressage IP.
- Les nœuds du réseau de capteurs sans fil collaborent pour atteindre un objectif ciblé, alors que dans un réseau Ad-hoc chaque nœud a son objectif.

Le Tableau 3.1 résume une comparaison entre les réseaux de capteurs sans fil et les réseaux sans fil classiques. Cette comparaison s'appuie sur six critères : les types de communication, l'importance de la QoS, l'identification des nœuds, l'importance de consommation d'énergie, la collaboration entre les nœuds et le nombre de nœuds.

Tableau 3.1 Différence entre les RCSF et les réseaux sans fil classiques.

	Réseau WLAN	Réseau WPAN	Réseaux Ad-hoc	RCSF
Nombre de nœuds	Diminué	1 nœud maître avec 7 nœuds esclaves (p. ex., Cas de Bluetooth)	Elevé	Très élevé
Type de communication	Communication point à point	Du nœud maître vers le nœud esclave	Communication point à point	Utilisation du broadcast
Importance de la consommation d'énergie	Diminué du fait que les nœuds peuvent être rechargés facilement	Diminué	Diminué du fait que les nœuds peuvent être rechargés facilement	Très élevé
Identification des nœuds	Existe	Existe	Existe	Dépend de l'application (généralement pas de mécanismes d'identification)
Collaboration entre les nœuds	Chaque nœud a son propre objectif	Chaque nœud a son propre objectif	Chaque nœud a son propre objectif	Nœuds en collaboration pour remplir un objectif
Importance de la qualité de service	Elevée	Elevée	Elevée	Diminué

3.3.6 Domaines d'application des RCSF

Les réseaux de capteurs sans fil peuvent être composés de différents types de nœuds de capteurs (p. ex., des capteurs infrarouges, des capteurs optiques et des capteurs thermiques) en fonction de leur utilisation, ces capteurs sont capables de surveiller une grande variété de phénomènes ambiants tels que l'humidité, la température et la pression. Les capteurs peuvent être utilisés pour la détection et l'identification d'un événement, la surveillance et le contrôle d'un terrain et la surveillance continue d'un phénomène. De plus, la miniaturisation des capteurs, le coût de plus en plus faible, la large gamme de capteurs disponibles et la technologie de communication sans fil utilisée, permettent aux réseaux de capteurs sans fil d'impliquer et de se développer dans plusieurs domaines d'application tels que le militaire, l'agriculture, l'environnement, l'industrie et la santé [78]–[80], [161]–[165].

La Figure 3.6 montre quelques exemples illustratifs d'applications de réseau de capteurs sans fil.

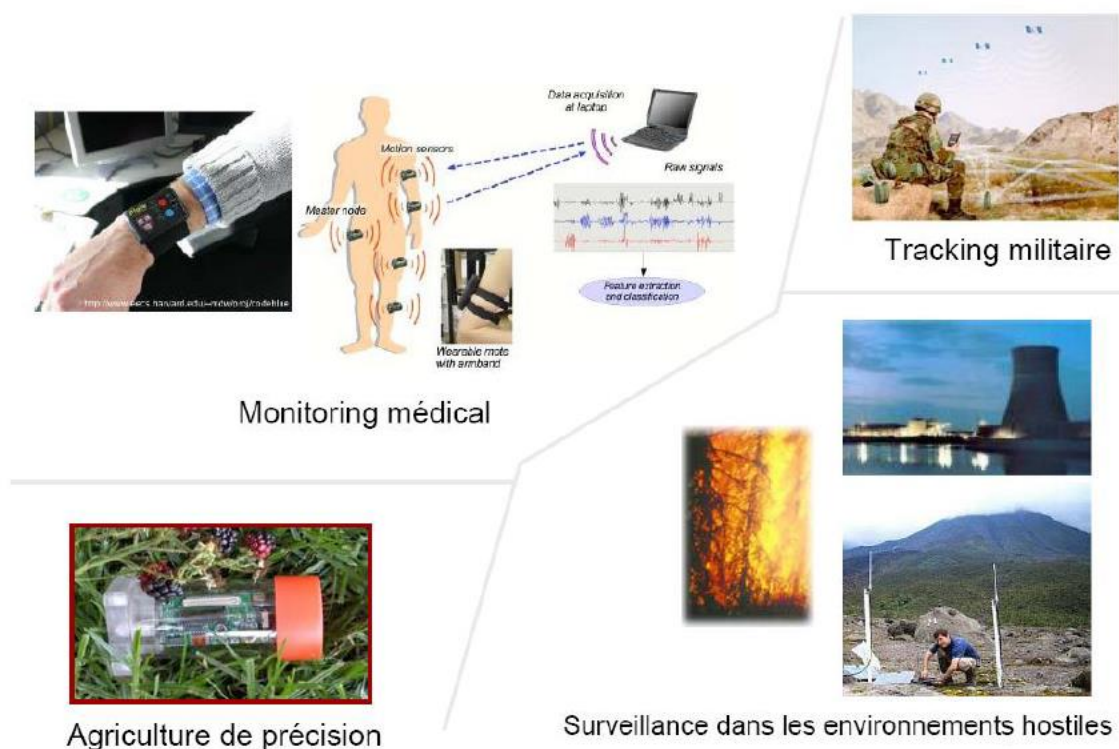


Figure 3.6 Exemple d'applications des RCSF.

Les applications de réseau de capteurs sans fil peuvent être divisées en deux catégories : le suivi et la surveillance [6] (voir Figure 3.7). Les applications de suivi peuvent inclure le suivi des personnes, des animaux, des véhicules, des objets et autres. Les applications de surveillance peuvent inclure de l'environnement, la surveillance médicale, la surveillance de l'énergie et autres.

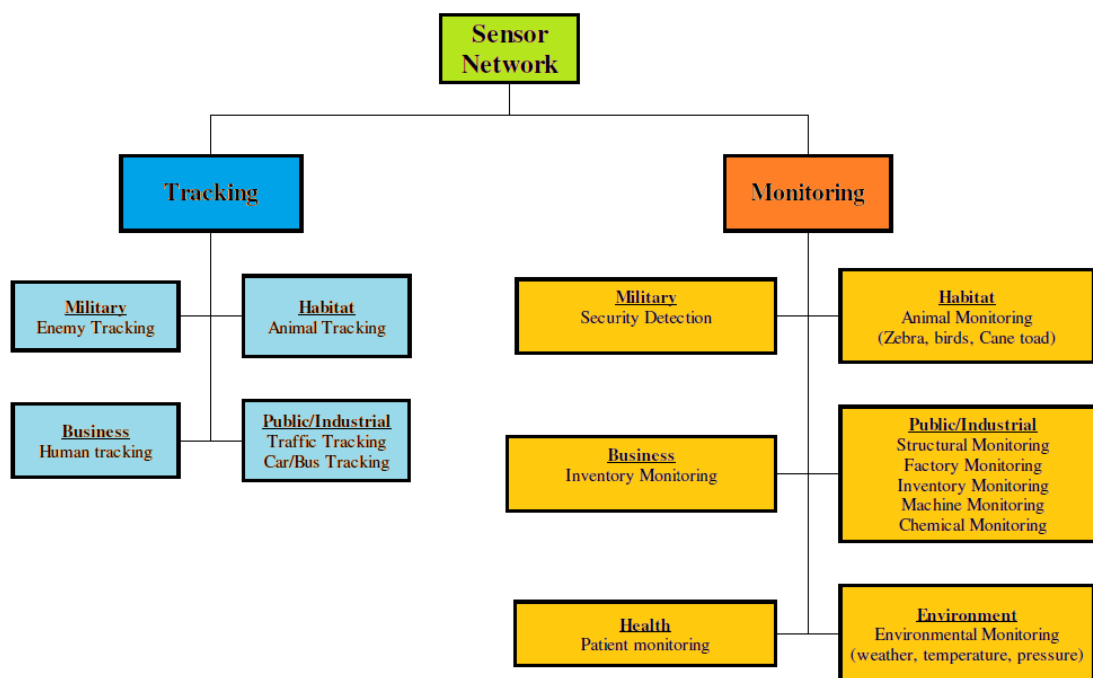


Figure 3.7 Vue d'ensemble des applications de RCSF [6].

Les réseaux de capteurs sans fil ont été utilisés dans plusieurs scénarios militaires [166], [167]. Il peut également être déployé dans des applications agricoles [55]–[57] pour soutenir les services agricoles et améliorer la production agricole. Différents application de réseau de capteurs sans fil dans le domaine médical comme le suivi des soins de santé, la surveillance des conditions des patients et le suivi de la pression artérielle ont été présentées dans [168]–[170]. En plus, les RCSF jouent un rôle très essentiel dans le domaine d'environnement, ils permettent de détecter les incendies [171], détecter les inondations [172], surveiller les volcans [173], surveiller la pollution de l'air [174] et autres.

Parmi les domaines où les RCSF peuvent offrir les meilleures contributions, nous citons [139]:

3.3.6.1 Applications militaires

Le faible coût et le déploiement rapide sont des caractéristiques qui ont rendu les réseaux de capteurs efficaces pour les applications militaires. Plusieurs projets ont été lancés pour aider les unités militaires dans un champ de bataille et protéger les villes contre des attaques, telles que les menaces terroristes. Par exemple on a : Le projet Distributed Sensor Network (DSN) au DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) était l'un des premiers projets dans les années 80 ayant utilisé les réseaux de capteurs pour rassembler des données distribuées [77].

3.3.6.2 Applications commerciales

Il est possible d'intégrer des capteurs au processus de stockage et de livraison dans le domaine commercial.

3.3.6.3 Applications médicales

Dans le domaine de la médecine, les réseaux de capteurs peuvent être utilisés pour assurer une surveillance permanente des organes vitaux de l'être humain grâce à des micro-capteurs qui pourront être avalés ou implantés sous la peau (p. ex., surveillance de la glycémie et détection de cancers). Ils peuvent aussi faciliter le diagnostic de quelques maladies en effectuant des mesures physiologiques à l'aide des capteurs ayant chacun une tâche bien particulière.

3.3.6.4 Applications domestiques

Avec le développement technologique, les capteurs peuvent être embarqués dans des appareils, tels que les aspirateurs, les fours à micro-ondes, les réfrigérateurs ou les magnétoscopes. Ces capteurs embarqués peuvent interagir entre eux et avec un réseau externe via Internet pour permettre à un utilisateur de contrôler les appareils domestiques localement ou à distance.

3.3.6.5 Applications environnementales

Le contrôle des paramètres environnementaux par les réseaux de capteurs peut donner naissance à plusieurs applications. Par exemple, le déploiement des thermo-capteurs dans une forêt peut aider à détecter un éventuel début de feu et par suite faciliter la lutte contre les feux de forêt avant leur propagation. Le déploiement des capteurs chimiques dans les milieux urbains peut aider à détecter la pollution et analyser la qualité d'air.

3.3.6.6 Applications de la surveillance et sécurité

L'application des réseaux de capteurs dans le domaine de la sécurité peut diminuer considérablement les dépenses financières consacrées à la sécurisation des lieux et des êtres humains. Ainsi, l'intégration des capteurs dans de grandes structures telles que les ponts ou les bâtiments aidera à détecter les fissures et les altérations dans la structure suite à un séisme ou au vieillissement de la structure. Le déploiement d'un réseau de capteurs de détection de

mouvement peut constituer un système d'alarme qui servira à détecter les intrusions dans une zone de surveillance.

3.3.6.7 Applications agricoles

Dans le domaine de l'agriculture, les capteurs peuvent être utilisés pour réagir convenablement aux changements climatiques par exemple le processus d'irrigation lors de la détection de zones sèches dans un champ agricole.

3.3.7 Classification de RCSF

Nous pouvons distinguer plusieurs types de réseaux de capteurs sans fil tels que les réseaux de capteurs sans fil mobiles (MWSN), les réseaux de capteurs sans fil sous-marin (UWSN), les réseaux de capteurs sans fil terrestres (TWSN) et les réseaux de capteurs souterrains sans fil (WUSN).

3.3.7.1 Réseaux de capteurs sans fil terrestres

Le réseau de capteurs sans fil terrestre est un réseau de capteurs composé de centaines à de milliers de nœuds de capteurs, ces nœuds sont répartis au-dessus de la surface du sol [56] dans une zone spécifique de manière aléatoire ou planifiée. Dans le TWSN, un grand nombre de nœuds de capteurs déployés dans un environnement donné collaborent pour collecter, suivre, détecter, et contrôler une variété de données ambiantes afin de répondre aux exigences d'une application. Ces données détectées peuvent être communiquées de manière efficace et économe en énergie.

Pour le TWSN, différentes stratégies de déploiement, protocoles de routage et techniques de minimisation de l'énergie peuvent être appliqués. La collaboration entre les nœuds de capteurs, la faible puissance, les économies d'énergie et le faible coût sont quelques-unes des caractéristiques qui rendent les réseaux de capteurs sans fil terrestres attrayants pour un large éventail d'applications dans les secteurs militaire, agricole, industriel et commercial [175].

Parmi les applications possibles, nous citons la détection des menaces terroristes, la protection des infrastructures critiques, la surveillance militaire, la surveillance des processus industriels, la surveillance des habitats, la surveillance sanitaire et la surveillance environnementale. Les réseaux de capteurs terrestres sans fil sont également largement utilisés dans les services agricoles, en particulier l'irrigation.

3.3.7.2 Réseaux de capteurs souterrains sans fil

Le réseau de capteurs souterrains sans fil [176], [177] est un réseau de capteurs permettant la surveillance des conditions souterraines, composé de nœuds de capteurs souterrains sans fil. Ces nœuds sont placés à certaines profondeurs du sol ou dans une mine ou une grotte pour transmettre et recevoir sans fil des modules fonctionnels dans le sol [178].

En général, les WUSN sont plus coûteux et diffèrent des TWSN en termes de maintenance, de déploiement, de planification, et d'équipement [179]. Dans ce type de réseau, les fréquences relativement basses peuvent pénétrer le sol et les fréquences plus élevées peuvent souffrir d'une forte atténuation, ce qui rend nécessaire l'installation de nœuds supplémentaires au-dessus du sol pour transmettre les données à la station de base.

En plus de la surveillance des paramètres des profondeurs du sol, les réseaux de capteurs souterrains sans fil peuvent être utilisés dans diverses applications dans des domaines tels que les sciences de la terre, l'ingénierie structurelle, les transports et l'agriculture [176]–[178]. Les WUSN permettent de suivre, de localiser et de surveiller des objets au-dessus du sol sans être détectés, par exemple lors des patrouilles aux frontières. De plus, ils contribuent à prévenir les catastrophes en les utilisant dans les mines de charbon souterraines. Ils permettent également de surveiller la présence et la concentration de substances toxiques pour éviter une contamination, par exemple.

3.3.7.3 Réseaux de capteurs sans fil sous-marin

Le réseau de capteurs sans fil sous-marin [175], [180] est un réseau de capteurs composé de nombreux véhicules et nœuds de capteurs, ces derniers étant déployés sous l'eau. Dans ce type de réseau, les nœuds de capteurs se propagent de manière clairsemée et pré-planifiée, et les communications sans fil sous-marines typiques sont réalisées par transmission d'ondes acoustiques.

Les réseaux de capteurs sans fil sous-marins peuvent être utilisés dans diverses applications [175], [181] telles que le contrôle et la surveillance des structures sous-marines (p. ex., les conduites de gaz et les plates-formes pétrolières), le suivi des micro-organismes et des poissons, la surveillance des courants océaniques, l'analyse de la qualité de l'eau, l'exploration sous-marine et la surveillance de la prévention des catastrophes.

Les UWSN sont similaires aux TWSN [182]. Cependant, dans les RCSF sous-marins, moins de nœuds de capteurs sont déployés par rapport au déploiement dense des nœuds de capteurs

dans les RCSF terrestres. En outre, les nœuds de capteurs sous-marins sont plus coûteux, ont une bande passante limitée et une faible puissance de batterie.

3.3.7.4 Réseaux de capteurs sans fil mobiles

Le réseau de capteurs sans fil mobile [183], [184] est un réseau de capteurs adapté aux environnements où il est dangereux et/ou difficile de déployer des nœuds de capteurs. Ce type de réseau est composé de nœuds de capteurs mobiles, c.-à-d., équipés de plates-formes de locomotives, capables de réagir avec l'environnement physique et de se déplacer après le déploiement initial [184].

Dans les réseaux de capteurs sans fil mobiles, les nœuds déployés peuvent offrir une connectivité et une couverture efficaces par rapport aux nœuds fixes. En outre, les données peuvent être distribuées par un routage dynamique, alors qu'un RCSF statique utilise un routage par inondation ou statique. Le MWSN est généralement appliqué pour la surveillance militaire, le suivi des cibles et la surveillance des habitats. La maintenance, la couverture, l'auto-organisation, la localisation et le déploiement sont quelques-uns des défis du RCSF mobile.

3.3.8 Architecture des RCSF

Les architectures dans les RCSF dépendent des applications et des techniques utilisées pour envoyer des données capturées par différents nœuds de capteurs à la station de base. Il existe deux principaux types d'architectures pour RCSF, l'architectures à plat et l'architectures hiérarchique [4], [6], [7].

3.3.8.1 Architecture hiérarchique

Dans les architectures hiérarchiques [6], le réseau est divisé en groupes (cluster). Dans chaque cluster, un nœud-chef appelé « Cluster Head (CH) » est élu et ce dernier représente tous les nœuds de son groupe. Par conséquent, tout nœud de capteurs doit être soit cluster head ou un membre de cluster. Un nœud qui n'est pas nœud-chef ne peut pas envoyer ses données capturées directement à la station de base. Ainsi, il les envoie à son CH qui à son tour peut envoyer ces données à la station de base. Les nœuds-chef peuvent également agréger des données reçues de plusieurs sources différentes avant de les envoyer à la station de base, atténuant ainsi certaines tâches de traitement et réduisant également le trafic réseau.

Les avantages de ce type d'architecture sont la simplicité, une consommation d'énergie moindre, notamment pour les nœuds capteurs non nœud-chef, et une latence moindre entre les

CH et la station de base, puisqu'ils envoient des données directement à cette dernière. Le principal inconvénient est que chaque nœud-chef constitue un point de défaillance unique. De plus, ce mode nécessite de nombreux messages de signalisation pour la sélection et la maintenance du nœud-chef.

La Figure 3.8 illustre un RCSF fonctionnant selon une architecture hiérarchique en clusters.

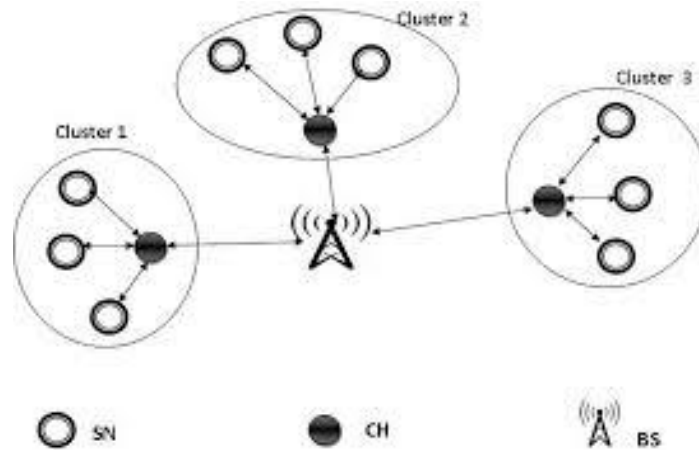


Figure 3.8 Architecture hiérarchique en clusters pour les RCSF.

3.3.8.2 Architecture à plat

Dans les architectures à plat [4], tout nœud de capteur peut communiquer directement avec le centre de traitement en utilisant une puissance de transmission élevée ou via un mode de communication multi-sauts en utilisant beaucoup moins de puissance de transmission. Dans le premier cas, la consommation énergétique du nœud à envoyer au centre de traitement est plus importante du fait de la puissance plus élevée utilisée. Par conséquent, ces nœuds peuvent rapidement épuiser leur énergie en utilisant cette méthode de transmission. Dans le cas d'une communication multi-sauts, qui est plus courante, un nœud de capteur qui veut transmettre ses données vers un autre nœud destinataire en dehors de sa plage de transmission peut utiliser d'autres nœuds intermédiaires comme relais.

Les principaux avantages de ce mode sont l'évolutivité, la gestion de la redondance et la tolérance aux pannes. Cependant, on peut noter que l'un des inconvénients est la forte consommation d'énergie de l'ensemble du réseau. Cette dernière est induite par une communication multi-sauts dans laquelle les autres nœuds participeront au routage et dissiperont leur énergie pour relayer des paquets provenant d'autres nœuds. Toujours en ce qui concerne la mode de communication multi-saut, on peut noter une latence plus élevée causée par les messages passant par plusieurs relais multi-sauts avant d'atteindre la destination. Enfin, dans ce mode de communication, on peut souligner des problèmes de

sécurité dus au fait que des données non destinées à des nœuds tiers intermédiaires peuvent être reçues, traitées et transmises.

La Figure 3.9 illustre un exemple de RCSF fonctionnant selon un mode d'architecture à plat.

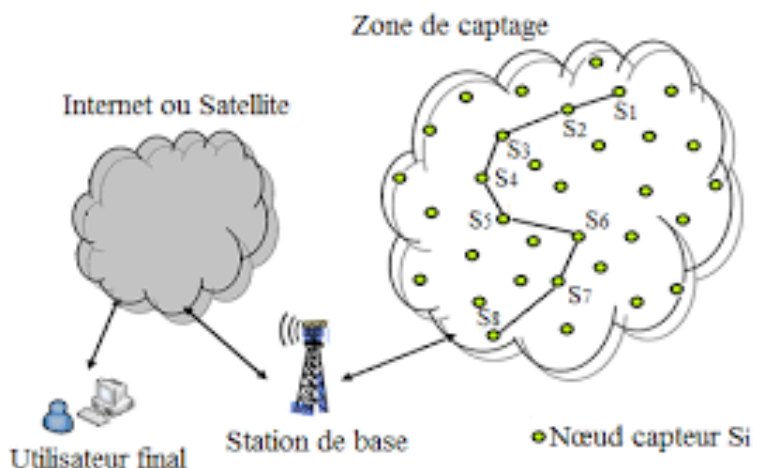


Figure 3.9 Architecture à plat pour les RCSF.

3.3.9 Topologies des RCSF

Un réseau de capteurs sans fil se compose d'un ensemble de nœuds de capteurs et de nœuds passerelles qui collectent les données des capteurs et les transmettent à l'utilisateur via Internet ou par satellite. Il existe plusieurs topologies pour les RCSF.

3.3.9.1 Topologie en étoile

La topologie en étoile est un système uni-saut. Tous les nœuds envoient et reçoivent des données uniquement via la station de base. Cette topologie est simple et nécessite une faible consommation d'énergie, mais la station de base est vulnérable et la distance entre les nœuds et la station est limitée.

3.3.9.2 Topologie Mesh

La topologie Mesh est un système à sauts multiples. La communication entre les nœuds et la station de base est possible. Chaque nœud a plusieurs chemins de transmission de données. Cette architecture a un plus grand potentiel d'extension du réseau, avec redondance et tolérance aux pannes, mais nécessite une plus grande consommation d'énergie.

3.3.9.3 Topologie hybride

La topologie hybride est une combinaison des deux topologies mentionnées ci-dessus. Les stations de base forment une topologie en toile et les nœuds autour d'elles sont en topologie étoile. Elle assure la minimisation d'énergie dans les réseaux de capteurs.

3.3.10 Pile protocolaire de RCSF

L'architecture protocolaire du réseau de capteurs sans fil est représentée sous une architecture en couches, schématisée à la Figure 3.10, cette architecture permet d'améliorer la robustesse de RCSF. Une pile protocolaire à cinq couches, proposée par Akyildiz et al. [4], est utilisée par les nœuds du réseau. Cette pile prend en charge le problème de consommation d'énergie, intègre le traitement des données transmises dans les protocoles de routage, et facilite le travail coopératif entre les capteurs.

Elle est composée de la couche application, transport, réseau, liaison de données, physique, ainsi que de trois niveaux qui sont : le niveau de gestion d'énergie, le niveau de gestion de tâches et le niveau de gestion de mobilité.

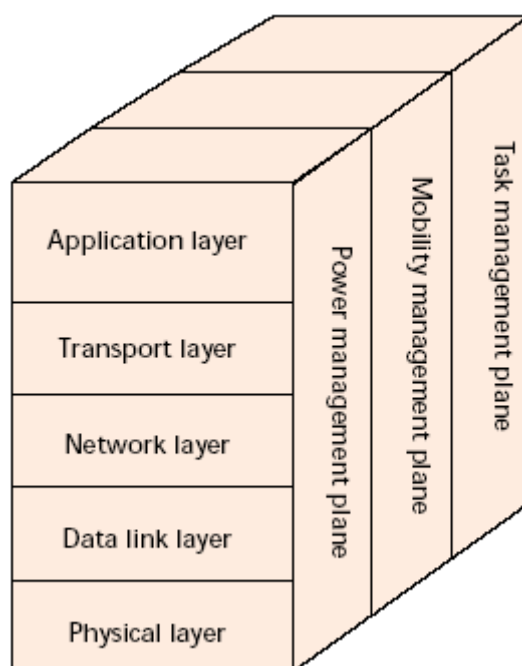


Figure 3.10 Pile protocolaire des réseaux de capteurs sans fil [4].

3.3.10.1 Couche physique

La couche physique est responsable de la sélection de fréquence, de la génération de la fréquence porteuse, de la détection du signal, de la modulation/démodulation et du cryptage/décryptage des informations.

La consommation d'énergie au niveau de la couche physique peut être affectée par l'environnement de l'application, le choix du type de modulation ou la bande de fréquence utilisée. Il est avantageux en matière d'économie d'énergie que le concepteur de la couche physique choisisse une transmission multi-sauts plutôt qu'une transmission directe qui nécessite une puissance de transmission très élevée [4].

3.3.10.2 Couche liaison de données

La couche liaison permet de contrôler la liaison logique. Elle est responsable de la détection des trames de données, du contrôle d'accès au support (MAC) et du contrôle d'erreurs. Elle maintient également la fiabilité des connections point à point ou multipoints dans les RCSF.

Cette couche contient deux sous-couches. La sous-couche MAC ; dans un réseau de capteurs sans fil, la couche MAC doit accomplir deux tâches principales: établir des liaisons de communication entre les nœuds de capteurs pour effectuer le transfert de données et permettre au réseau de s'auto-organiser et déterminer le moment et la manière dont les nœuds de capteurs peuvent accéder au canal avec un minimum de perte d'énergie [4]. La sous-couche de contrôle des erreurs pour contrôler les erreurs de transmission.

3.3.10.3 Couche réseau

La couche réseau gère les échanges au travers RCSF. Le rôle principal de cette couche est de diriger de manière fiable les données fournies par la couche de transport vers la station de base, tout en essayant d'optimiser au maximum la consommation énergétique induite par l'ensemble des nœuds capteurs participant à ce routage.

3.3.10.4 Couche transport

La couche transport est responsable du transfert de données et du contrôle de flux fiables. Cette couche intervient essentiellement lorsqu'on va accéder d'un RCSF à un autre RCSF ou à Internet.

Le protocole de transport utilisé entre le nœud émetteur et le nœud Sink peut être UDP. Il est important de noter que l'utilisation du protocole TCP est impossible en raison de la taille limitée de la mémoire du nœud de capteurs qui ne lui permet pas de stocker de grandes quantités d'informations pour la gestion de la communication. Les communications entre l'utilisateur et le nœud Sink peuvent être gérées par TCP ou UDP via Internet ou satellite.

3.3.10.5 Couche application

La couche application est la couche supérieure. Elle fournit une interface avec les applications. Ainsi, selon le type du nœud de capteur, différents types d'applications peuvent être mises en œuvre. Cette couche qui est gérée directement par des logiciels utilisateurs est le niveau le plus proche des utilisateurs. La couche application peut également gérer l'agrégation de données avant leur transfert vers la couche transport.

3.3.10.6 Plan de gestion d'énergie

Il gère la manière dont le nœud utilise son énergie. Par exemple, si le niveau d'énergie d'un capteur donné devient très faible, alors ce nœud peut diffuser une alerte à tous ses voisins les informant qu'il ne peut plus participer au routage [4], ce qui augmente la tolérance aux pannes. Ainsi, l'énergie restante de ce nœud peut être réservée pour d'autres fonctions.

3.3.10.7 Plan de gestion de la mobilité

Il permet de détecter et d'enregistrer le mouvement des nœuds et indiquer leurs positions. Un retour arrière vers l'utilisateur est toujours conservé et le nœud peut garder des traces sur tous ses nœuds voisins. Grâce aux informations sur l'état de ses voisins, les nœuds de capteurs peuvent mieux coordonner et gérer l'utilisation de leur énergie pour accomplir leurs diverses tâches [6].

3.3.10.8 Plan de gestion des tâches

Le plan de gestion des tâches garantit que les tâches de capture sont planifiées dans une zone bien définie tout en évitant la redondance des tâches de capture en même temps, afin d'économiser de l'énergie sur le réseau [4].

3.3.11 Routage dans les réseaux de capteurs sans fil

Le routage est une méthode d'acheminement des informations vers la bonne destination à travers un réseau de connexion donné donc le but de routage est l'établissement de routes qui soient correctes et efficaces entre une paire quelconque d'hôtes ce qui assure l'échange des messages d'une manière continue à travers le réseau, suivant certains critères de performance. Dans un réseau de capteurs, chaque nœud est susceptible d'être mis à contribution pour participer au routage et pour retransmettre les paquets d'un nœud qui n'est pas en mesure d'atteindre sa destination directement ; tout nœud joue ainsi le rôle de poste de travail et de routeur, donc chaque nœud participe au routage ce que lui permet de découvrir les chemins existants afin d'atteindre les autres nœuds du réseau.

Le fait que la taille d'un réseau puisse être importante dans le cas des réseaux de capteurs, souligne que les techniques de routage dans les réseaux classiques nécessitent des modifications ou de développement de nouveaux protocoles de routage spécifiques aux RCSF [185]. Le problème qui se pose dans le contexte de ces réseaux est l'adaptation de la méthode d'acheminement utilisée à un grand nombre de nœuds possédant de modestes capacités de calculs et de sauvegarde et parfois présentant des changements de topologie. Il est impossible qu'un nœud puisse garder les informations de routage concernant tous les autres nœuds, par contre dans un réseau volumineux, le manque de données de routage concernant les destinations peut impliquer une large diffusion dans le réseau.

3.3.11.1 Quelques métriques de routage

Pour mesurer l'efficacité des protocoles de routage, un ensemble de métriques sont utilisés. Un calcul de métrique est un algorithme qui traite un coût associé à un certain chemin de routage. Les protocoles de routage permettent aux nœuds de comparer les métriques calculées afin de déterminer les routes optimales à emprunter.

Donc on peut dire que la probabilité qu'un protocole de routage atteigne le nœud puits à travers un nœud intermédiaire est grande si sa métrique est plus optimale. Plusieurs métriques peuvent affecter le routage en termes d'énergie, délai et d'autres. De plus, elles peuvent être considérées seules ou combinées (c.-à-d., hybrides).

i. Longueur du chemin (nombre de sauts)

Cette métrique permet de minimiser le nombre de sauts utilisé par un protocole de routage pendant le routage. Il suffit de calculer le nombre de nœuds intermédiaires pouvant être

traversés lors d'une transmission d'un paquet de la source vers le puits et choisi la route qui contient un nombre minimum de nœuds (c.-à-d., de sauts).

ii. Perte de paquets

Les protocoles de routage utilisent cette métrique afin de minimiser le nombre de paquets de données perdus lors du transfert depuis une source vers une destination pendant le routage. Pour cela, il doit calculer le taux des paquets perdus dans le réseau : le nombre de paquets perdus sur le nombre de paquets transmis lors d'une transmission et si le taux de perte de paquets élevé, il est nécessaire de mettre en place des mécanismes pour minimiser les collisions.

iii. Délai de bout-en-bout (EED)

EED est le temps moyen nécessaire pour qu'un paquet soit acheminé à partir de la source vers la destination. Les protocoles de routage utilisent cette métrique pour minimiser le temps de propagation des paquets de données échangés pendant le routage.

iv. Consommation d'énergie

Cette métrique permet de minimiser la consommation d'énergie pendant le routage. Pour cette métrique, il suffit de calculer l'énergie disponible pour chaque nœud du réseau et l'énergie nécessaire pour les transmissions des paquets entre une paire de nœuds et le choix de routes entre les nœuds et le puits sont établies et chacune d'elles est caractérisée par la somme de l'énergie disponible (ED) des nœuds qui la constituent et par la somme de l'énergie nécessaire (EN) des liaisons qui la construisent. La consommation d'énergie suit plusieurs approches dont on peut citer :

- Par considération de puissance : la route choisie est celle caractérisée par la somme des ED la plus élevée.
- Par considération du coût : la route choisie est celle caractérisée par la plus petite somme des EN.
- Par considération de puissance et du coût : la route choisie est celle caractérisée par la plus petite somme des EN et la plus grande somme des ED.

3.3.11.2 Classification des protocoles de routage

Les protocoles de routage conçus pour les RCSF [186] peuvent être classifiés selon un ensemble de critères, comme le montre la Figure 3.11 :

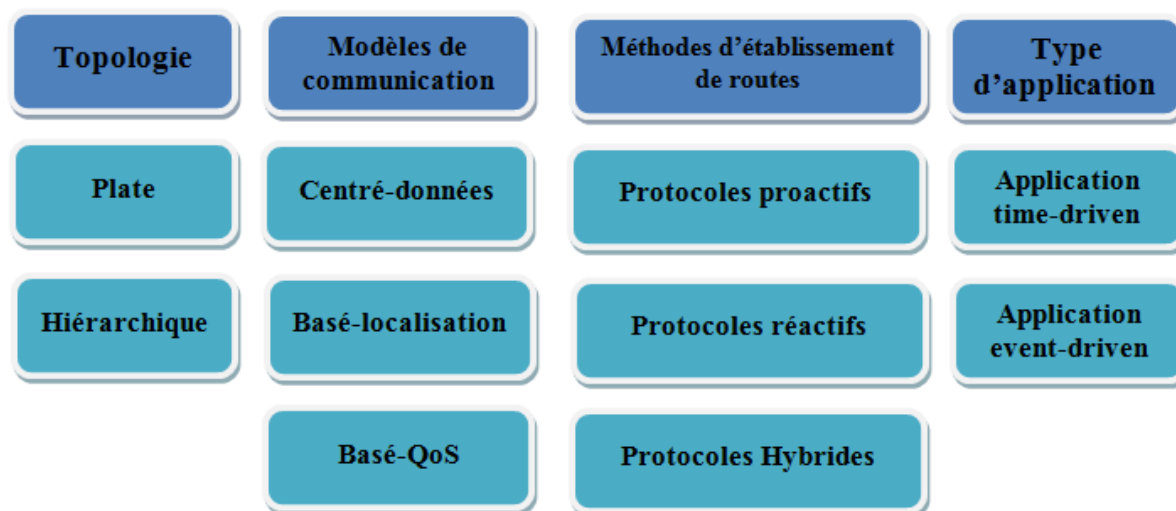


Figure 3.11 Classification des protocoles de routage dans RCSF.

i. Classification selon les modèles de communication

Le modèle de communication est déterminé par les contraintes sous lesquelles les nœuds du réseau sont interrogés. Dans les RCSF, il peut être classé comme étant centré-données, basé-localisation. Il existe également quelques protocoles basés sur la qualité de service, qui tentent de garantir certaines exigences des applications au moment du routage.

- Centré-données :

A la différence des réseaux Ad hoc, les nœuds d'un RCSF sont dépourvu d'une identification globale tel que l'adressage IP pour cela ce modèle a été utilisé. En effet, le nombre élevé de capteurs déployés aléatoirement dans un RCSF ne permet pas d'attribuer les identifiants globaux (comme les adresses IP) pour chaque nœud. Ainsi, l'identité de chaque nœud n'est pas aussi importante que les données qui lui sont associées. Ce manque d'identification, avec le déploiement aléatoire des nœuds, font qu'il est difficile de sélectionner un ensemble de nœuds pour être interrogé. Par conséquent, l'utilisateur ne s'intéresse pas à communiquer avec un nœud particulier du réseau mais envoie des requêtes, à tous les nœuds du réseau ou à une partie de celui-ci, afin d'identifier les nœuds concernés. Ainsi, des protocoles de routage centrés-données ont été proposés pour être en mesure de sélectionner un bon ensemble de nœuds demandés, sans l'utilisation d'identifiants globaux. Ils visent également à utiliser l'agrégation de données pour éviter le gaspillage d'énergie dû aux redondances de données.

- Basé-localisation :

Il est utilisé dans les applications basées sur la localisation des nœuds, et donc à partir les positions des nœuds on peut prendre des décisions qui minimisent le nombre de messages transmis pendant le routage. Il est donc nécessaire d'envisager une solution de géo-

localisation (soit une localisation absolue où le GPS peut être utilisé, soit une localisation relative où les nœuds sont localisés approximativement suivant la direction ou la durée lors d'une transmission) dans laquelle le degré de précision dépend de l'application envisagée.

- Basé-QoS :

Le domaine de la détection d'intrusions, de la sécurité ou de tout domaine a besoin d'être acheminé au plus bref délai vers le puits et toute application ayant des exigences temps-réel, il utilise les protocoles de routage basés sur la QoS. Ce type essaye de répondre aux exigences de qualité de service ainsi que la réalisation de l'équilibre avec la consommation d'énergie.

ii. Classification selon la topologie du réseau

La topologie d'un réseau permet de déterminer l'organisation logique adaptée par les protocoles de routage pour exécuter les différentes opérations de découverte de routes et de transmission de données. La topologie, comme mentionné ci-dessus, peut être hiérarchique ou plate.

- Topologie plate :

Dans cette topologie (voir Figure 3.12) tous les nœuds sont considérés homogènes et communiquent entre eux sans aucun autre intermédiaire, et seul le nœud puits est chargé de la collecte de données issues des différents nœuds capteurs afin de les transmettre vers les centres de traitement. Donc tous les nœuds possèdent le même rôle et les nœuds sont semblables en termes de ressources. Les topologies plates sont caractérisées par la simplicité des algorithmes exécutés par les protocoles de routage. Et comme les RCSF souffrent des changements brusques de la topologie, une organisation plate permet la possibilité de construire différents chemins des sources vers le nœud puits.

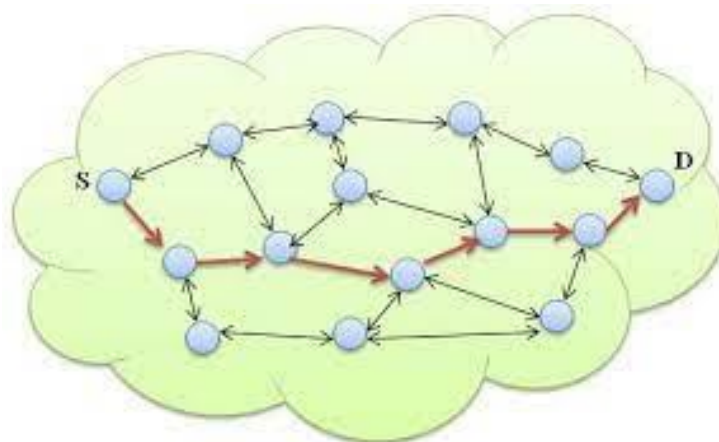


Figure 3.12 Topologie plate.

- Topologie hiérarchique :

Lorsque la taille du réseau devient de plus en plus importante, sa gestion devient plus difficile. Les protocoles de routage à plat (non hiérarchiques) fonctionnent bien quand le réseau ne comprend pas un grand nombre de nœuds. La structuration d'un réseau est un des outils principaux pour sauvegarder l'énergie dans chaque nœud du réseau, ce qui aboutit à prolonger la vie du système. Une des structures les plus connues est la hiérarchie.

La technique de hiérarchisation sert à partitionner le réseau en sous-ensembles afin de faciliter la gestion du réseau surtout le routage, qui se réalise à plusieurs niveaux. Dans ce type de protocoles, la vue du réseau devient locale ; des nœuds spéciaux peuvent avoir des rôles supplémentaires.

Deux grandes approches sont dérivées de ce type de protocoles : La première approche basée sur les groupes (cluster -based approach) et la deuxième approche basée sur les chaînes ou les zones (chaine-based approach).

- Un cluster est défini par un ensemble de nœuds et possède un nœud nommé nœud-chef (CH). Le rôle du Cluster Head est de faire le relais entre les nœuds du cluster et la station de base directement ou via d'autres Clusters Heads. Le Cluster Head possède généralement des ressources énergétiques supérieures aux autres nœuds du réseau. Cette technique est appelée clustérisation. Le Cluster Head est élu suivant différents critères et informations sur le réseau tels que le niveau de l'énergie d'un capteur, la connexion avec les autres capteurs et la position géographique.
- Une zone est définie par un ensemble de nœuds mais ne possède pas un nœud-chef (ou CH), ainsi, un cluster est une sous-classe d'une zone.

La construction des groupes (zones ou clusters) s'appuie sur des informations sur le réseau, exigeant donc son instrumentation. Cette prise de mesures peut être, dans certaines circonstances, statique, comme la position des capteurs dans un système immobile, ou dynamique, comme le niveau énergétique des capteurs.

Les topologies hiérarchiques, comme le montre la Figure 3.13, ont divisé les nœuds en plusieurs niveaux de responsabilité. L'une des méthodes les plus employées est le clustering, où le réseau est partitionné en groupes appelés "clusters". Un cluster est constitué d'un chef (cluster-head) et de ses membres.

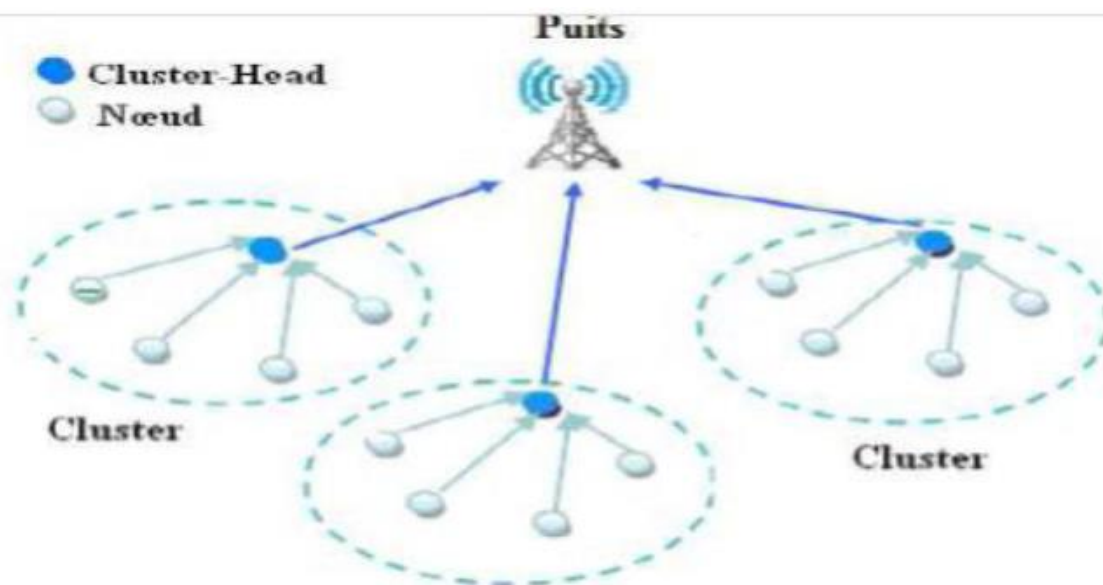


Figure 3.13 Topologie hiérarchique base sur les clusters.

iii. Classification selon la méthode d'établissement de routes

Selon les différentes manières de la création et de la maintenance de route d'cheminement des paquets de données, les protocoles de routage peuvent être : protocoles proactifs, réactifs ou hybrides.

- Protocoles de routage proactifs :

Ils permettent d'établir au préalable les meilleures routes pour chaque nœud vers toutes les destinations possibles. Le principe de base de ces protocoles est de maintenir en permanence une vision globale de l'état du réseau grâce à une gestion périodique des tables de routage et l'échange des messages de contrôle. Ceci induit un contrôle excessif d'autant plus qu'ils sont particulièrement utilisés pour les réseaux denses. De plus, ils présentent un autre inconvénient dû à la sauvegarde des routes même si elles ne sont pas utilisées.

- Protocoles de routage réactifs (ou protocole de routage à la demande) :

Ils représentent les protocoles les plus récents dans le service de routage dans les réseaux sans fil. Ces protocoles cherchent les routes suite à la demande d'une application, une procédure de découverte globale de routes est lancée lorsque le réseau a besoin d'une route afin d'obtenir une information spécifique, une fois la route n'est plus utilisée, elle sera immédiatement détruite ce qui permet une conservation d'énergie.

- Protocoles de routage hybrides :

Ils fonctionnent en mode proactif pour garder la connaissance locale de la topologie afin d'établir la route dans le proche voisinage et le mode réactif pour les nœuds lointains (c.-à-d., au-delà de la zone voisinage).

iv. **Classification selon le type d'application**

La méthode de captage des données dans un RCSF dépend de l'application et de l'importance de la donnée :

- Application time-driven :

Ce type des applications nécessitent un prélèvement périodique des données. Tels que, les applications de monitoring météo afin d'établir des rapports périodiques.

- Application event-driven :

Dans des applications temps réel, les capteurs doivent réagir immédiatement à des changements soudains des valeurs captées. Un prélèvement périodique des données est inadapté pour ce type de scénarios. Pour cela, le protocole doit être réactif et doit donner des réponses rapides en l'occurrence d'un certain nombre d'évènements.

3.3.11.3 **Protocoles de routage dans un RCSF**

Il existe plusieurs protocoles de routage dans les réseaux de capteurs [186], [187], notamment:

i. **AODV (Ad hoc On demand Distance Vector Routing)**

AODV est un protocole de type vecteur de distance, il est réactif, AODV ne demande une route que lorsqu'il en a besoin. Il utilise les numéros de séquence pour éviter les boucles de routage et pour indiquer la nouveauté des routes. Chaque entrée de la table de routage doit contenir essentiellement l'adresse de la destination, l'adresse du nœud suivant, la distance en nombre de sauts, le numéro de séquence destination et le temps d'expiration de chaque entrée dans la table.

ii. **OLSR (Optimized Link State Routing Protocol)**

Il fonctionne comme un protocole proactif, est une optimisation de l'algorithme d'état de liaison pure, ainsi qu'il permet d'obtenir des routes de plus court chemin. Dans un protocole à état des liens, chaque nœud déclare ses liens directs avec ses voisins à tout le réseau, mais pour l'OLSR, les nœuds ne déclarent qu'une sous-partie de leur voisinage à l'aide de l'utilisation des relais multipoints (MPR). Ce protocole a été proposé par l'équipe projet HIPERCOM-INRIA. Il est défini dans la RFC 3626 de l'IETF. Ce protocole est très adapté aux réseaux larges et denses. Tous les nœuds du réseau serviront de routeur et OLSR maintient sur chaque nœud une table de routage complète (comprenant une entrée pour tous les autres nœuds du réseau). Le protocole est complètement distribué, il n'y a pas d'entité

centrale. Chaque nœud choisit la route la plus adaptée en fonction des informations qu'il a reçues.

iii. DSDV (Destination Sequenced Distance Vector)

DSDV Est un protocole proactif de routage à vecteur de distance. Chaque nœud du réseau maintient une table de routage contenant le saut suivant et le nombre de sauts pour toutes les destinations possibles. Des diffusions de mises à jour périodiques tendent à maintenir la table de routage complètement actualisée à tout moment.

iv. GSR (Global State Routing)

GSR Est un protocole similaire au protocole DSDV. Ce dernier utilise les idées du routage basé sur l'état des liens (Link State (LS)), et les améliore en évitant le mécanisme inefficace d'inondation des messages de routage. GSR utilise une vue globale de la topologie du réseau, comme c'est le cas dans les protocoles basés sur LS.

v. FSR (Fisheye State Routing)

FSR est un protocole comme une amélioration du protocole GSR. Le nombre élevé de messages de mise à jour échangés implique une grande consommation de la bande passante, ce qui a un effet négatif sur les réseaux Ad-hoc caractérisés par une bande passante limitée. Le protocole FSR est basé sur l'utilisation de la technique "œil de poisson" (fisheye), proposée par Kleinrock et Stevens qui l'ont utilisée dans le but de réduire le volume d'information nécessaire pour représenter les données graphiques.

vi. LEACH

LEACH est un protocole utilise un routage à saut unique ou chaque nœud peut transmettre directement au cluster-Head et au puits. LEACH est un algorithme de clustering distribué, utilisé pour le routage dans les réseaux de capteurs homogènes. LEACH choisit aléatoirement les nœuds cluster-heads et attribue ce rôle aux différents nœuds selon la politique de gestion Round-Robin pour garantir une dissipation équitable d'énergie entre les nœuds. Dans le but de réduire la quantité d'informations transmises à la station de base, les cluster-heads agrègent les données capturées par les nœuds membres qui appartiennent à leur propre cluster, et envoient un paquet agrégé à la station de base. Il est exécuté en deux phases : la phase « set-up » et la phase « steady-state ». Dans la première phase, les clusters heads sont sélectionnés et les clusters sont formés, et dans la seconde phase, le transfert de données vers la station de base aura lieu.

3.4 Nœuds de capteur

3.4.1 Capteur et détection

La détection de très faibles concentrations d'espèces chimiques et biologiques représente un enjeu de plus en plus important dans la plupart des domaines de notre vie et dans notre environnement. En effet, la détection de plusieurs mesures dans le domaine d'environnement permet de détecter et de régler plusieurs problèmes de notre environnement. Ou encore la réalisation de diagnostics précoces et l'augmentation des chances de guérison des patients à partir de la détection de molécules biochimiques.

Donc il doit être trouvé des solutions technologiques basées sur des principes informatisés, plusieurs de recherches basés sur ce contexte, tels que le développement des capteurs permettant la détection et la mesure d'un ensemble de grandeurs physiques. Les capteurs sont des organes de prélèvement d'informations qui élaborent à partir d'une grandeur physique une autre grandeur physique de nature différente.

3.4.2 Définitions

3.4.2.1 Instrument de mesure

Georges Asch [188] a modélisé très précisément la notion d'instrument de mesure, et donc celle de capteur, comme le montre la Figure 3.14. La grandeur physique objet de la mesure, appelée mesurande (m), est appréhendée par diverses opérations expérimentales, qui sont regroupées sous le terme de mesurage, qui dans un grand nombre de cas produit un signal électrique (s) image de la grandeur physique et de ses variations. Le capteur est le dispositif physique qui, soumis à l'action du mesurande non électrique, produit la caractéristique électrique : $s = F(m)$.

Cependant, toutes les lois physiques interagissent au sein des matériaux, de sorte que le capteur est nécessairement sensible à d'autres quantités physiques, secondaires, connues sous le nom de grandeurs d'influence [189]. La caractéristique devient alors, en tenant compte des grandeurs d'influence g_1, g_2, \dots : $s = F(m, g_1, g_2, \dots)$ [139]. Les principales grandeurs d'influence sont la température, l'accélération, les vibrations, l'humidité, les champs magnétiques.

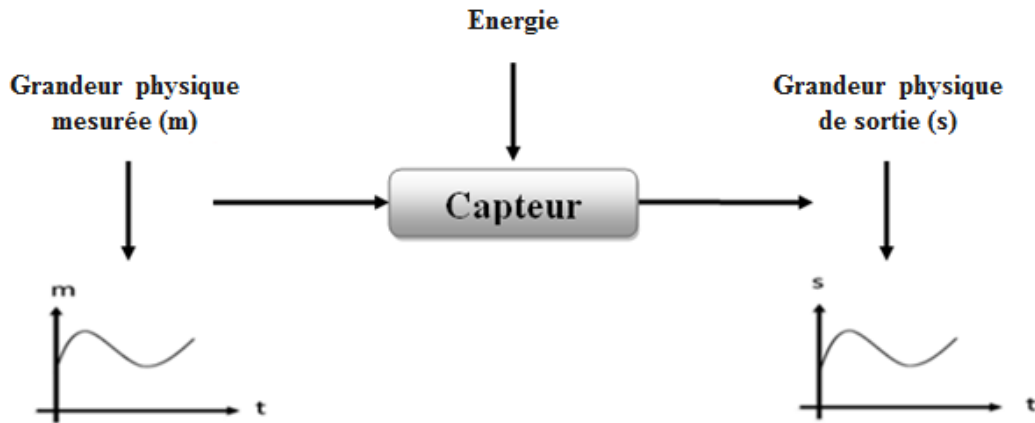


Figure 3.14 Principe d'un capteur.

3.4.2.2 Un capteur

Un capteur est un dispositif, mini-composant, équipé de fonctionnalités de sensation avancées [190]. Il mesure ou détecte un événement réel, comme le mouvement, la chaleur ou la lumière et convertit la valeur mesurée dans une représentation logique, analogique ou numérique.

Comme illustré à la Figure 3.14, un capteur permet de prélever l'information qui élabore à partir d'une grandeur physique mesurée. Cette information (signal) sera portée par un support physique. L'information délivrée pourra être logique, numérique ou analogique.

Quel que soit l'application à étudier, un capteur n'est pas utilisé seul, il intervient dans une chaîne dite chaîne de mesure. Le capteur est le premier élément d'une chaîne de mesure ou d'instrumentation, comme le montre la Figure 3.15. Parfois, Les mesures prennent par le capteur ne sont jamais parfait, donc il convient de connaître pour chaque capteur son état d'imperfection et il faut prendre en compte la perturbation apportée au système par la mesure.

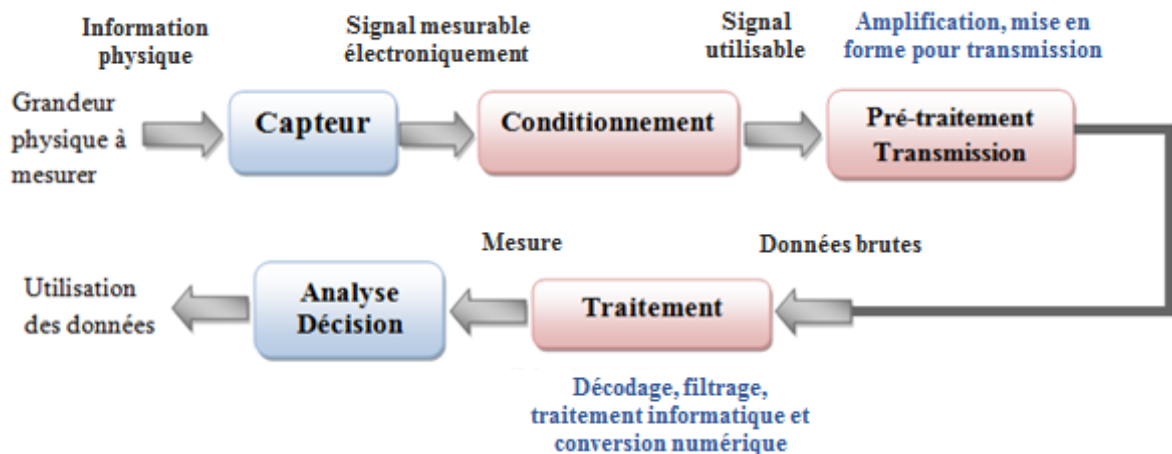


Figure 3.15 Chaîne de mesure ou d'instrumentation.

3.4.2.3 Capteur intelligent/nœud de capteur

Les capteurs intelligents (Smart Sensors) sont des dispositifs matériels dans lesquels coexistent les capteurs et les circuits de traitement et de communication. Leurs relations avec des couches de traitement supérieures vont bien au-delà d'une simple transduction de signal. Les capteurs intelligents sont des capteurs d'informations et non pas simplement des capteurs et des circuits de traitement du signal juxtaposés. De plus, ces capteurs ne sont pas des dispositifs banalisés car chacun de leurs constituants a été conçu dans l'objectif d'une application bien spécifique.

Les nœuds de capteurs sont des nœuds autonomes avec une taille miniature et dotés des ressources de calcul et de traitement. Ils détectent ou mesurent les données physiques dans un environnement à contrôlé et les convertissent en signaux pour le contrôleur. Chaque nœud de capteur est un système micro-électro-mécaniques [191] qui détecte ou mesure les attributs physiques et les convertis en signaux. Les nœuds de capteur se sont des unités de base de RCSF, et apparaissent comme des systèmes autonomes miniaturisés avec des capacités de sensation avancée.

3.4.2.4 Choix du capteur

Un capteur est composé de deux parties, une partie qui a pour rôle de détecter ou mesurer un événement et une autre qui permet de traduire un événement en un signal compréhensible par un système de contrôle PC. Un capteur est utilisé dans des différentes applications donc le choix de capteur adéquat nécessite de définir un cahier des charges contient un ensemble des paramètres, tels que le type d'évènement à détecter, la nature de l'évènement, l'environnement de l'évènement, sa fiabilité et la nature du signal délivré par le capteur (c.-à-d., analogique ou numérique).




3.4.3 Technologies des nœuds de capteur

La recherche au RCSF a été lancée par l'agence DARPA [192] à des fins de surveillance utilitaire avec le projet LWIM, et le projet SenseIT a été succédé plus-tard en 1993-1998 par le projet WINS de l'université UCLA en collaboration avec le centre de science Rockwel. Après cela, d'autres sont apparus en 1999-2000 où les participants étaient essentiellement parmi les milieux universitaires [189]. Par exemple en 1999, UC Berkeley, l'USC et MIT avec le projet μ AMPS. Ces projets ont permis le développement de plusieurs types de capteurs.

Dans le monde entier, Il existe plusieurs fabricants des nœuds de capteurs. Nous citerons Crossbow, EuroTherm et WINS par exemple.

Le Tableau 3.2 présente quelques différentes technologies des nœuds de capteur.

Tableau 3.2 Différentes technologies des nœuds de capteur.

Compagnie	Université, agence	Caractéristiques	Applications	Capteur
Smart Dust	UC Berkeley	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Small microcontroller : 8 kb code, 512 B données ▪ Low-power radio 10 kb ▪ EEPROM storage (32 KB) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Surveillance ▪ Acquisition de données 	 <p>UCB WeC 99 « Smart Rock »</p>
Crossbow	UC Berkeley	<ul style="list-style-type: none"> ▪ RAM : 4KO ▪ ROM/Flash : 128KO ▪ Flash externe : 512KB ▪ Processeur : Atmel AVR Atmega 128 8-bits 8MHz 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Environnement ▪ Militaire ▪ Sécurité 	 <p>MICA2 868</p>
WINS	UCLA, Rockwell	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Microcontroller : 32KB, RAM 1MB bootable flash ▪ StrongARM SA 1100, 32 bit RISC processor, 1MB SRAM, 4MB flash 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Surveillance ▪ Contrôle ▪ Sécurité 	 <p>Rockwell : WINS</p>

3.4.4 Caractéristiques du nœud de capteur

Deux entités sont fondamentales dans le fonctionnement d'un capteur : l'unité d'acquisition qui est le cœur physique permettant la prise de mesure et l'unité de communication qui réalise la transmission de celle-ci vers d'autres dispositifs électroniques. Ainsi, fonctionnellement chaque capteur possède un rayon de communication (RC) et un rayon de sensation (RS). La Figure 3.16 montre les zones définies par ces deux rayons pour le capteur A. La zone de communication est la zone où le capteur A peut communiquer avec les autres capteurs (par exemple le capteur B). D'autre part, la zone de sensation est la zone où le capteur A peut capter l'événement.

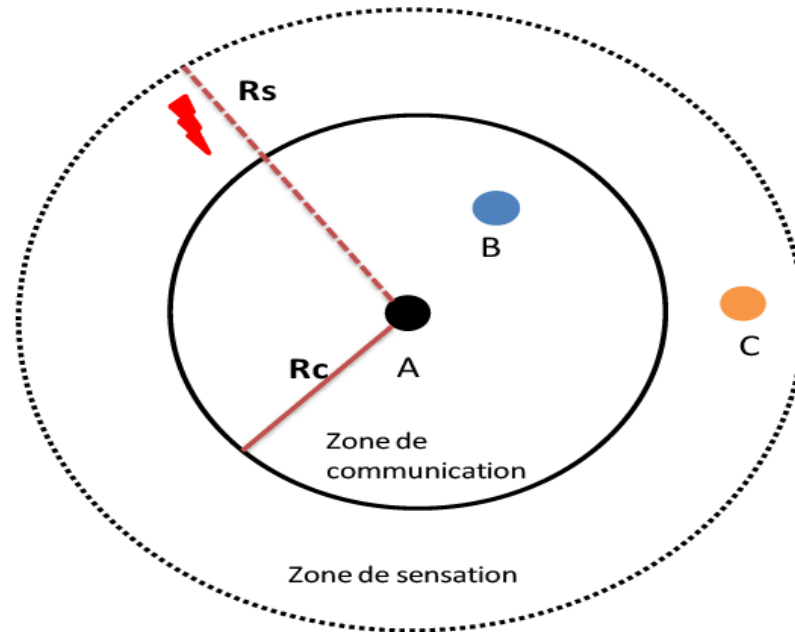


Figure 3.16 Rayons de sensation et de communication d'un capteur.

3.4.5 Architecture du nœud de capteur

3.4.5.1 Architecture physique

Un nœud de capteur est composé fondamentalement de quatre unités de base : une unité de détection, une unité de transmission (émetteur-récepteur), une unité d'alimentation (batterie) et une unité de traitement [1], [3], comme le montre la Figure 3.17.

En plus de ces principaux composants, des modules optionnels peuvent être ajoutés au nœud du capteur, tels que une mémoire externe, un système de localisation et un mobilisateur (voir Figure 3.17).

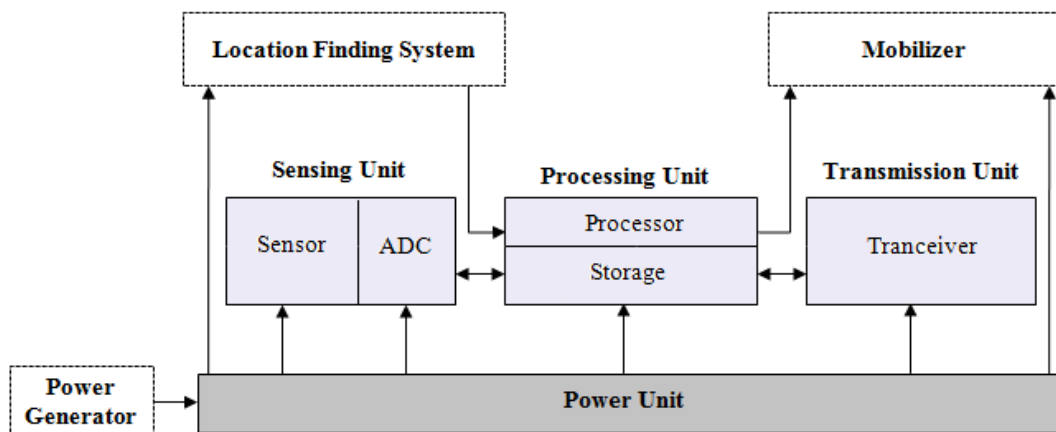


Figure 3.17 Architecture d'un nœud de capteur.

i. Unité de détection

L'unité de détection est l'élément principal d'un nœud de capteur. Elle comprend généralement deux sous-unités : un capteur qui obtient des mesures sur les paramètres environnementaux et un convertisseur analogique-numérique (ADC) qui convertit l'information relevée et la transmet à l'unité de traitement.

ii. Unité de traitement

L'unité de traitement offre une coopération avec d'autres nœuds pour effectuer les tâches appropriées. Elle se compose d'une unité de calcul (processeur) qui permet d'effectuer des calculs simples pour la collaboration avec d'autres capteurs et d'une unité de stockage (mémoire) intégrant un système d'exploitation spécifique. De plus, cette unité possède deux interfaces, une interface pour l'unité de détection et une interface pour l'unité de communication, elle acquiert les informations en provenance de l'unité d'acquisition et les envoie à l'unité de transmission. Cette unité est chargée aussi d'exécuter les protocoles de communications qui permettent de faire collaborer le capteur avec d'autres capteurs. Elle peut aussi analyser les données captées.

iii. Unité de transmission

L'unité de transmission établit une connexion entre le nœud de capteurs et le RCSF. Elle est responsable de toutes les transmissions et réceptions de données via un support de communication radio. Elle peut être de type optique (p. ex., Smart Dust [193]) ou de type radiofréquence (p. ex., MICA2 [194]). L'unité de transmission est l'unité qui consomme le plus d'énergie par rapport aux précédentes unités.

iv. Unité d'alimentation (batterie)

L'unité d'alimentation fournit l'énergie à tous les composants du nœud, qui est un élément vital du nœud de capteur. Cependant, à cause de sa taille réduite, la batterie dont il dispose est limitée et généralement irremplaçable. Pour cela, l'énergie est la ressource la plus précieuse puisqu'elle influe directement sur la durée de vie des capteurs.

3.4.5.2 Architecture logicielle

L'un des systèmes d'exploitation les plus connus dans le domaine des RCSF est TinyOS [195]. Il est libre et est utilisé par une large communauté de scientifiques dans des simulations pour le développement et le test des algorithmes et protocoles réseau.

3.4.6 Processus fonctionnel du nœud de capteur

Comme illustré à la Figure 3.18, les informations détectées sont transmises par les entrées des capteurs aux unités de traitement de l'unité centrale du nœud de capteur. Les signaux sont traités et évalués par un circuit câblé de multiplexage et d'amplification, puis convertis en formats applicables par conversion analogique/numérique. Ces informations traitées sont conservées en mémoire pour être envoyées via l'unité de transmission aux destinations requises dans les nœuds RCSF.

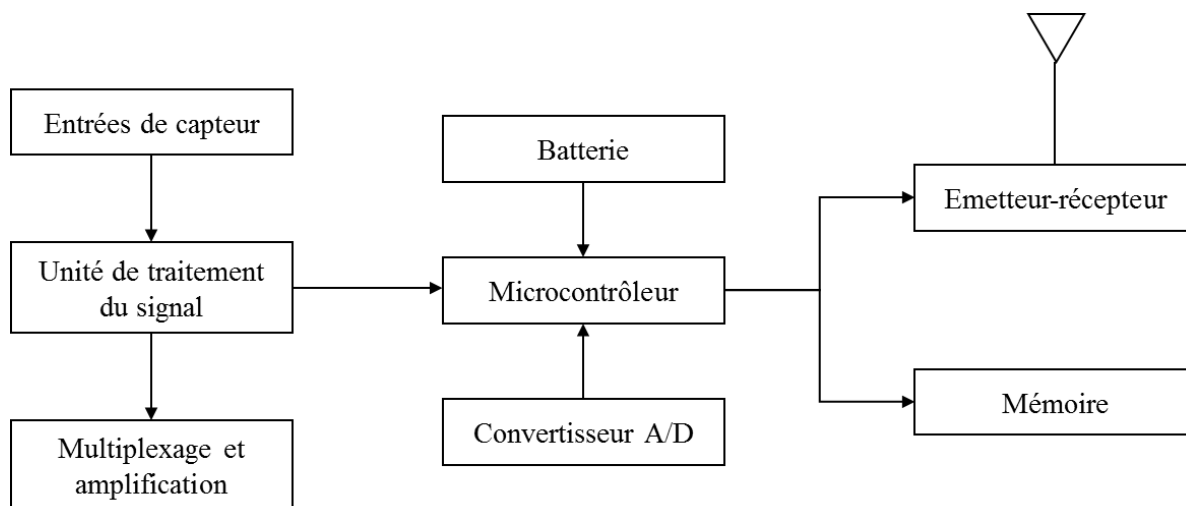


Figure 3.18 Processus fonctionnel du nœud de capteur.

3.4.7 Différents types de capteurs

Il existe actuellement de nombreux types de capteurs dans la plupart des domaines de notre vie, tels que les capteurs de pression, les capteurs de son, les capteurs de position, les capteurs de température et les capteurs d'humidité.

Un capteur permet de prélever une grandeur abstraite qui sélectionne un événement particulier parmi un ensemble d'événements possible, l'information de sortie par ce capteur pourra être de type logique, numérique ou analogique. D'une manière générale, les capteurs peuvent être classés selon trois critères, nous l'avons indiqué dans la Figure 3.19 :

- Apport énergétique : capteurs actifs, capteurs passifs.
- Type de sortie : capteurs logiques, capteurs analogiques, capteurs numériques.
- Type de détection : capteurs de température, capteurs d'humidité et autres.



Figure 3.19 Classification des capteurs.

3.4.7.1 Classification selon l'apport énergétique

i. Les capteurs passifs

Les capteurs passifs nécessitent dans la plupart des cas une source d'alimentation externe pour fonctionner.

ii. Les capteurs actifs

Les capteurs actifs utilisent une partie de l'énergie fournie par la grandeur physique à mesurer. On parle de capteur actif lorsque le phénomène physique qui est utilisé pour la détermination du mesurande effectue directement la transformation en grandeur électrique. C'est la loi physique elle-même qui relie mesurande et grandeur électrique de sortie.

3.4.7.2 Classification selon le type de sortie

Dans la plupart des cas, les signaux provenant du capteur sont électriques, ce qui signifie qu'ils peuvent être des tensions ou des courants. Les signaux issus d'un capteur peuvent être classés en trois types différents de signaux de sortie.

i. Capteur logique (capteurs TOR (Tout Ou Rien))

Un capteur logique génère un signal de type binaire (1 ou 0). L'avantage est qu'il est peu coûteux mais il est spécialisé dans un type précis de mesure, par exemple, ces capteurs peuvent déterminer si une pièce est présente ou non et si un tapis roulant fonctionne ou non. Le signal des capteurs logiques peut être du type courant, potentiel ou signal pneumatique.

Certains des capteurs logiques typiques sont les capteurs de fin de course et les capteurs de rupture d'un faisceau lumineux.

ii. Capteur analogique

La sortie d'un capteur analogique est une grandeur électrique dont la valeur est une fonction de la grandeur physique mesurée par le capteur. La sortie peut prendre une infinité de valeurs continues. Le signal des capteurs analogiques peut être du type tension ou courant.

iii. Capteur numérique

Ce type de capteur fournit en sortie une information électrique de nature numérique, et une image de la grandeur physique à mesurer, c.-à-d., ne pouvant prendre qu'un nombre limité de valeurs distinctes. Le signal de sortie peut être de code numérique binaire ou de type train d'impulsions, avec un nombre précis d'impulsions ou avec une fréquence précise.

3.4.7.3 Classification selon le type de détection

Il existe plusieurs types tels que les capteurs de température et les capteurs d'humidité.

i. Capteur de température

Initialement, la notion de température était associée à la sensation de chaud et de froid, les premiers thermoscopes étaient gradués en très chaud, chaud, tempéré, froid et très froid. Mais cette notion a eu des limites n'étant pas précise, ni fidèle. Les scientifiques ont donc développé un autre moyen pour déterminer et mesurer la température.

La physique statistique définit la température comme le degré d'agitation des atomes et / ou des molécules. La thermodynamique apporte une contribution énorme à la définition de la température, en fait la thermodynamique est introduite dans la notion de machine thermique où le rapport de la température est déterminé par le rapport des énergies, et donc la température est une grandeur physique intensive, afin de la mesurer et de la définir, les scientifiques développent des capteurs de température.

Pour effectuer une mesure de température, il est nécessaire de définir les échelles de température utilisées ayant un caractère universel telles que Kelvin, Celsius, Rankin et Fahrenheit. Ainsi, un capteur de température est un type qui peut mesurer et déterminer la température dans, par exemple, l'air ou le sol. On peut distinguer plusieurs catégories de mesure de température telles que les méthodes de mesure par contact, si le capteur est en contact direct avec la surface, et les méthodes de mesure à distance si le capteur est éloigné.

- Capteurs de mesure par contact

A partir des données ci-dessus, nous distinguons les capteurs passifs, les capteurs actifs et les capteurs intégrés. La mesure de température par contact utilise ces trois groupes de capteurs qui ont des propriétés différentes et permettent ainsi d'obtenir de nombreux capteurs pour différentes applications.

- Thermomètres à résistance

Le thermomètre à résistance est un type de capteur passif. Elle utilise la variance de la résistance du matériau en fonction de la température. Cette différence de résistance peut être réalisée avec un métal (résistance métallique) ou des oxydes (thermistances) :

- Résistance Métallique

La résistance électrique d'un conducteur métallique croît avec la température. Cette variation est parfaitement réversible. On peut donc établir une relation $R = f(T)$ entre la résistance R et la température T et ainsi relevé T en mesurant R .

Lorsque la température varie on a :

$$R = R_0(1 + aT + bT^2 + cT^3)$$

Avec:

- T la température en C ;
- R_0 la résistance à 0 C ;
- a, b et c des coefficients positifs, spécifiques au métal.

Un bon capteur de mesure de température à résistance métallique doit avoir une bonne sensibilité, être plus fidèle, avoir un temps de réponse adéquat et une plage de mesure suffisante. Quatre métaux sont utilisés : le platine, le tungstène, le nickel et le cuivre. Le platine est le meilleur et le plus utilisé. Les sondes résistives platine les plus répandues dans l'industrie sont les sondes Pt100, le nombre « 100 » indique qu'elles présentent une résistance de 100 ohms à une température de 0 °C (32 °F) [196].

Ce type de capteur est facile à utiliser, stable et a une bonne précision de disposition. Mais Il peut être sensible à l'auto-échauffement et à la résistance aux fils de conduction, et il a un temps de réponse assez long et ne convient pas aux environnements humides ou corrosifs.

- Thermistances

Une thermistance est un agglomérat d'oxydes métalliques frittés, c.-à-d., rendus compacts par haute pression exercée à température élevée, de l'ordre de 150 bars et 1000 °C. La résistance électrique d'une thermistance est très sensible à l'action de la température. Il existe deux

principaux types de thermistances : les CTP à coefficient de température positif et les CTN à coefficient de température négatif. La loi de variation est de la forme :

$$R = a \times e^{b/T}$$

Avec:

- a et b sont deux paramètres de la thermistance.

Ce type de capteur a un bon temps de réponse, un faible encombrement et un prix bas. Mais il est sensible à l'auto-échauffement et à la résistance des fils de connexion.

◦ Thermométrie par thermocouple

Thermomètre par thermocouple sont des capteurs actifs qui créent une force électro-motrice (FEM) lorsqu'un changement de température est effectué. Les thermocouples sont utilisés pour la mesure de température. Ils sont bon marché et permettent la mesure dans une grande gamme de températures.

Un thermocouple constitué de deux conducteurs A et B de nature différente, dont les jonctions sont à des températures T_1 et T_2 délivre une FEM V_0 qui dépend d'une part de la nature de A et B, et d'autre part des températures des deux jonctions (voir Figure 3.20). En général, la température de l'une des jonctions est fixe, connue et sert de référence ($T_1 = T_{ref}$), tandis que l'autre jonction est placée dans le milieu dont on cherche à mesurer la température. La jonction à la température T_1 est également appelée soudure froide et celle à la température T_2 soudure chaude.

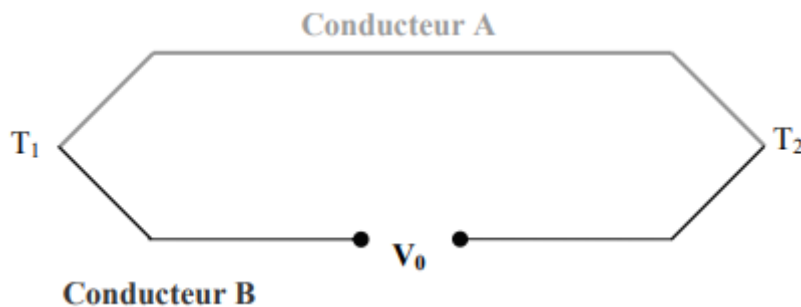


Figure 3.20 Principe d'un thermocouple.

Lorsqu'il y a une différence de température aux deux extrémités d'un conducteur électrique : le flux de chaleur créé un mouvement d'électrons, ce qui génère une FEM dans cette zone et à la jonction de deux conducteurs différents située à une température θ , on remarque également l'apparition de la différence de potentiel.

◦ Thermométrie par diodes et transistors

Ce sont des capteurs électroniques utilisés pour mesurer la température, où le courant absorbé par la diode varie directement en fonction de la température. Ce type de capteur est facile à fabriquer et à utiliser, peu coûteux et très linéaire. Mais la plage de mesure est limitée (-50°C à 150°C) et affectée par un champ magnétique.

La Figure 3.21 montre quelques exemples de capteurs pour mesurer la température par contact.

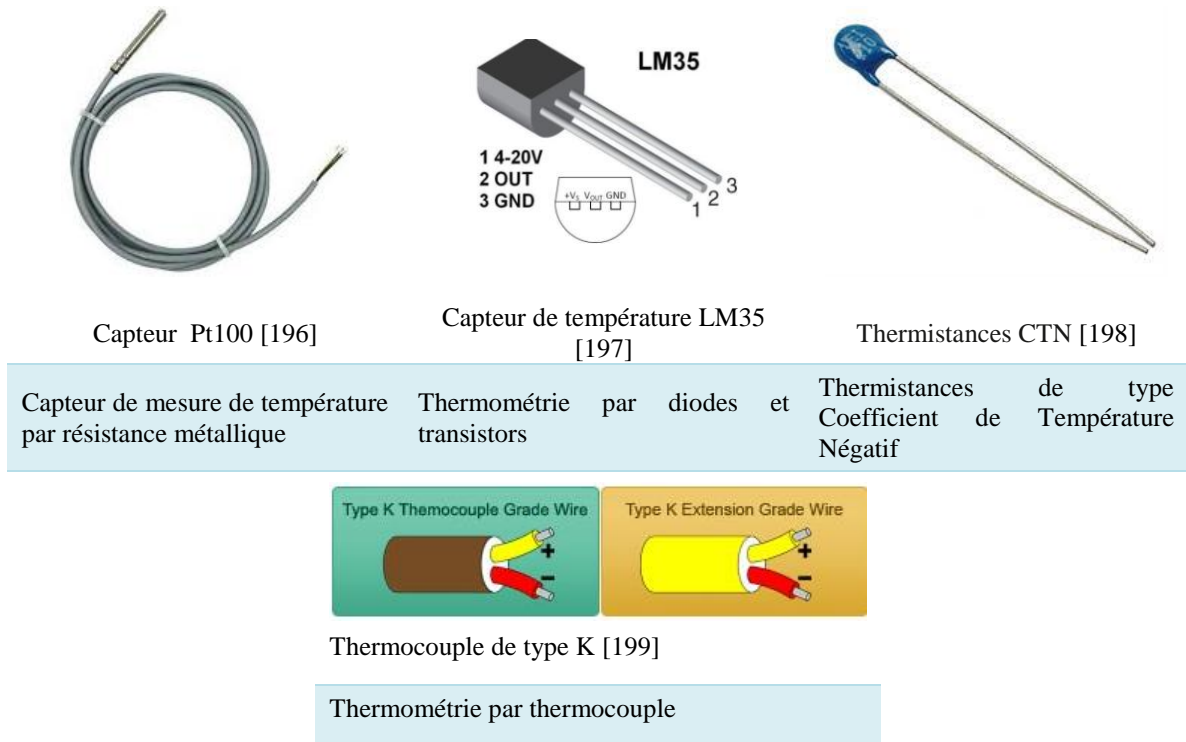


Figure 3.21 Exemple de capteurs pour la mesure de température par contact.

▪ Capteurs de mesure à distance

Les capteurs de mesure de température à distance sont utilisés dans les situations où les capteurs de mesure par contact ne peuvent pas mesurer la température, en particulier en cas de températures très élevées. Un ensemble de capteurs existe dans ce contexte, tel que : thermographie et pyrométrie optique. Ce type de capteur a une large plage de mesure, un temps de réponse court et une bonne précision.

En plus des types ci-dessus, il existe d'autres capteurs utilisés pour mesurer la température tels que thermométrie par bruit de fond, ce type mesure la température soit par puissance de bruit, soit par tension de bruit et capteurs de température à quartz.

ii. Capteur d'humidité

En général, il est nécessaire dans de nombreux domaines de connaître et de réguler le taux d'humidité en tant que premier élément de la chaîne de régulation. L'importance de mesure de l'humidité est apparue, par exemple dans :

- Le secteur agricole, il est évident que l'humidité de l'air est un facteur essentiel pour le développement du secteur agricole et pour assurer la viabilité de ce secteur.
- L'industrie pharmaceutique, p. ex., les médicaments présentés sous forme de gélules sont fabriqués à partir de poudres qui sont séchées puis pressées. Souvent, la tolérance à l'humidité de ces poudres est très étroite car cela affecte leur comportement lors de la compression.

L'humidité décrit donc la présence d'un mélange d'air sec et de vapeur d'eau dans un volume comme l'air ambiant. Lorsque nous parlons de mesurer l'humidité, cela indique le niveau d'humidité dans l'air, par exemple en%. Dans certains cas, le taux d'humidité est difficile à mesurer, car il est étroitement lié à d'autres grandeurs physiques, telles que la température et la pression. Le taux d'humidité dans un volume V d'air est généralement exprimé à partir d'un ensemble de paramètres tels que le rapport de mélange, l'humidité relative, l'humidité absolue et la température de rosée.

À partir des données ci-dessus, on peut imaginer l'intérêt de mesurer l'humidité pour une gamme d'applications. Pour ce faire, les chercheurs ont développé des capteurs d'humidité pour mesurer le taux d'humidité à un volume spécifique.

Actuellement, il existe un grand nombre de capteurs d'humidité de l'air [200], tels que :

- Capteurs capacitifs

Un capteur capacitif est un type de capteur d'humidité de l'air. Ce capteur ne nécessite pas d'entretien pendant de longues périodes même à des températures inférieures à zéro, et il fonctionne sous pression. Mais il est sensible à la condensation et à certains milieux agressifs, et sa stabilité à long terme est limitée.

- Psychromètres

Psychromètres est le plus ancien des hygromètres, mais encore largement utilisé. Ce capteur peut être utilisé avec une grande précision et une qualité de mesure élevée sans problème. D'autre part, ce type a des difficultés à utiliser dans des températures négatives et à une faible humidité et dépend de la pression atmosphérique.

- **Hygromètres**

C'est un capteur de mesure d'humidité, qui dispose d'une technologie simple et économique, en cas de saleté, il est facile à nettoyer. Cependant, il donne une précision de mesure limitée, une plage de mesure faible et une mesure lente avec inertie.

- **Miroir de rosée**

Ce type permet de mesurer le taux d'humidité avec une grande précision, une fiabilité et une large plage de mesure ; quelle que soit la pression barométrique, il accepte des températures négatives. Il est sensible à la saleté et ne convient pas aux mesures de contrôle rapides.

- **Sonde de rosée à détection capacitive de condensation (CCC) selon Heinz**

La sonde de rosée CCC a une grande précision, fiabilité et une large plage de mesure. En revanche, la technologie utilisée par ce capteur est fastidieuse, inadaptée aux mesures de contrôle rapides et sensible aux températures négatives.

La Figure 3.22 montre quelques exemples de capteurs d'humidité.



Capteur Psychromètre d'humidité

Sonde capacitive d'humidité

Capteur d'humidité ambiante

Figure 3.22 Exemple de capteurs d'humidité.

iii. Capteur teneur en eau

Un capteur teneur en eau permet de mesurer la quantité d'eau présente dans un échantillon de sol et donc de déterminer la disponibilité de l'eau du sol. Cette quantité mesurée doit être évaluée par un rapport pondéral ou volumétrique.

Le choix le plus approprié de capteurs de teneur en eau pour une application spécifique, dépend du type de sol, des besoins de cette application et du budget. Pour interpréter la mesure de la teneur en eau, il est toujours essentiel de disposer d'un système de référence minimum pour la mesure, sur une série temporelle assez étendue.

Avant de mesurer la teneur en eau, la présence d'eau peut être détectée. Pour cela, il existe des détecteurs de présence d'eau pour déterminer si de l'eau est présente ou non, tels que la sonde ALMEMO® de détection d'eau FHA936-WD [200] qui permet de détecter en une seconde la présence d'eau libre, non combinée. Si « mesure <10% » cela indique qu'il n'y a pas d'eau, si « mesure >10% » cela indique la présence d'eau.

Il existe plusieurs types de capteurs de teneur en eau tels que Diviner 2000® et Enviroscan®. La Figure 3.23 montre quelques exemples de capteurs de teneur en eau.

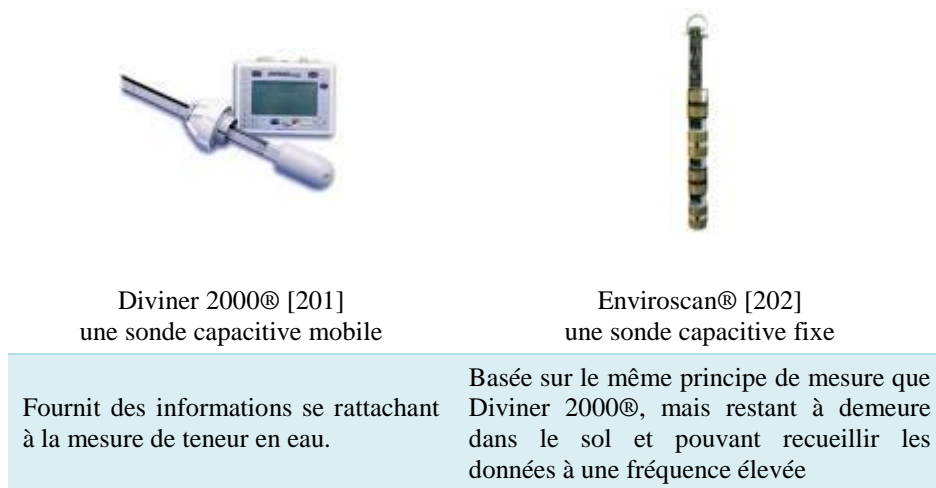


Figure 3.23 Quelques capteurs de teneur en eau.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons d'abord défini les réseaux sans fil. Ensuite, nous avons détaillé la technologie des réseaux de capteurs sans fil ; nous avons présenté dans un premier temps les RCSF en décrivant ses opérations, ses domaines d'application, ses caractéristiques, ses classifications, son structure et autres, puis nous avons présenté l'étude et l'analyse des nœuds de capteurs.

Dans le chapitre suivant, nous présenterons notre première contribution à cette thèse qui consiste à examiner, étudier et analyser l'application et l'utilisation des réseaux de capteurs sans fil dans le domaine de l'irrigation, considérant cette dernière comme une solution idéale pour surmonter les problèmes du secteur agricole et ainsi atténuer la crise mondiale de l'eau.

Chapitre 4

Application de la technologie des réseaux de capteurs sans fil dans le domaine de l'irrigation

Sommaire

4.1	Introduction.....	118
4.2	Méthodologie de la revue systématique « WSN-based irrigation SLR ».....	120
4.3	Application des réseaux de capteurs sans fil dans l'irrigation.....	135
4.4	Pourquoi des capteurs et des RCSF dans les systèmes d'irrigation ?.....	144
4.5	Capteurs utilisés dans le domaine de l'irrigation.....	145
4.6	Cultures, types de sol et stratégies d'irrigation.....	150
4.7	Technologies de communication sans fil.....	154
4.8	Synthèse.....	160
4.9	Conclusion.....	170

4.1 Introduction

En raison d'une série de problèmes soulevés ces dernières années, comme la crise mondiale de l'eau, la sécheresse et la rareté des ressources en eau douce, les chercheurs cherchent à trouver des solutions à ces problèmes en rationalisant la consommation d'eau dans le secteur agricole comme l'un des secteurs les plus consommateurs d'eau au monde. Les réseaux de capteurs sans fil constituent une technologie passionnante et importante qui a connu un développement significatif ces dernières années et peut être appliquée dans différents domaines de la vie. Les applications agricoles, en particulier l'irrigation, sont l'une des applications dans lesquelles le RCSF est largement utilisé et mis en œuvre avec succès.

Au cours des dernières décennies, un grand nombre d'études et de travaux ont été présentés dans le domaine de l'irrigation basée sur les réseaux de capteurs sans fil. Il est donc important de collecter, résumer, analyser et classer les recherches les plus récentes dans ce domaine. L'objectif de cette étude est de présenter une revue systématique exhaustive de la littérature dans le domaine de l'irrigation basé sur des réseaux de capteurs sans fil. Avant de nous lancer dans cette étude, nous avons effectué une recherche de littérature scientifique pour valider la nécessité d'une revue systématique dans ce contexte. Nous avons trouvé de rares revues de la littérature sur ce sujet, notamment des revues systématiques considérées comme très rares. En outre, nous n'avons pas trouvé de revues systématiques couvrant l'ensemble des éléments de la principale question de recherche de notre sujet d'étude.

Des auteurs ont mené une série d'études axées sur les systèmes d'irrigation et la gestion de l'eau à l'aide de réseaux de capteurs sans fil. Cependant, les enquêtes/revues de la littérature disponibles sur les systèmes d'irrigation intelligents basés sur les RCSF ont analysé un petit nombre d'articles [203]–[205] et ne fournissent donc pas une analyse approfondie et systématique de l'état de l'art dans le domaine de l'irrigation avec le RCSF. D'autres se concentrent sur des aspects spécifiques de l'irrigation tels que le besoin de capteurs d'humidité du sol dans les systèmes d'irrigation [206] ou les systèmes d'irrigation par aspersion [207]. En outre, il existe des enquêtes/revues de la littérature qui se concentrent sur l'agriculture de précision basée sur les RCSF en tant que cible principale [55]–[58], et elles commentent le service d'irrigation. Dans cette étude, nous allons fournir un aperçu de l'état de la recherche liée aux systèmes d'irrigation basés sur les réseaux de capteurs sans fil. De plus, nous fournirons un aperçu des nœuds les plus utilisés et des technologies de communication sans fil employées pour mettre en œuvre des systèmes d'irrigation intelligents basés sur des réseaux de capteurs sans fil. Nous fournirons également un aperçu des types de cultures, de sols et de

techniques d'irrigation les plus utilisés. Nous déterminerons les paramètres les plus fréquemment surveillés dans le domaine de l'irrigation en utilisant le RCSF. Ainsi, à travers ce travail, nous comblons les lacunes actuelles dans la littérature en présentant une revue systématique plus récente et plus approfondie qui vise à fournir une enquête qui donne un aperçu des systèmes d'irrigation intelligents basés sur RCSF.

Dans ce chapitre, nous présenterons d'abord la méthodologie de la revue systématique utilisée pour développer cette étude en définissant plusieurs étapes, notamment les objectifs de recherche, les questions de recherche, les critères d'inclusion et d'exclusion et la stratégie de recherche, pour collecter des études pertinentes liées au domaine de l'irrigation basée sur les réseaux de capteurs sans fil. Deuxièmement, nous donnerons un aperçu de la littérature à partir des articles sélectionnés. De plus, nous démontrons l'importance des capteurs et des réseaux de capteurs sans fil dans le domaine de l'irrigation. Ensuite, nous présenterons les résultats de cette étude. Nous fournirons une analyse complète des différents capteurs utilisés pour mettre en œuvre des systèmes d'irrigation intelligents basés sur des réseaux de capteurs sans fil, tout en identifiant les paramètres les plus surveillés dans ce contexte. Nous fournirons également une analyse complète des types de cultures, de sols et de techniques d'irrigation les plus couramment utilisées dans le domaine de l'irrigation en utilisant RCSF. Par ailleurs, nous donnerons une analyse complète des technologies de communication sans fil utilisées pour mettre en œuvre des systèmes d'irrigation intelligents basés sur RCSF. Finalement, nous présenterons un résumé de nos résultats en présentant une synthèse des différents travaux et recherches sélectionnés liés à l'utilisation et à l'application de la technologie RCSF dans le domaine de l'irrigation ainsi qu'un résumé des paramètres les plus surveillés dans le domaine de l'irrigation en utilisant RCSF.

Le présent chapitre présente une revue systématique de la littérature en examinant la technologie de réseaux de capteurs sans fil et son utilisation actuelle dans le domaine de l'irrigation. Le SLR sous-jacent a été compilé en examinant les articles de recherche publiés dans des sources réputées entre 2008 et 2019. Un total de 80 articles de recherche a été soigneusement sélectionné par un processus systématique et classé en conséquence.

4.2 Méthodologie de la revue systématique « WSN-based irrigation SLR »

Notre présente contribution vise à étudier et à fournir une revue des applications et des utilisations des réseaux de capteurs sans fil dans le domaine de l'irrigation. Pour atteindre les objectifs souhaités, une revue systématique de la littérature est choisie comme méthodologie pour cette étude. Une revue systématique de la littérature, ou revue systématique, est une méthode d'identification, d'évaluation et de résumé de l'état de l'art d'un thème spécifique dans la littérature. Un SLR permet de collecter des informations de la littérature de manière restrictive, ce qui permet une analyse méthodologique rigoureuse avec moins de biais que les revues traditionnelles (revue de la littérature) [208], [209]. Afin d'assurer la reproductibilité de notre revue systématique pour les chercheurs à l'avenir et d'améliorer la fiabilité des résultats pour tirer des analyses et des conclusions, les directives définies par Keele [210], Higgins [211] et Bearman [212] sont suivies.

Nous avons mené ce SLR en plusieurs étapes distinctes : (1) définition des objectifs de recherche (RO) ; (2) élaboration des questions de recherche (RQ) ; (3) élaboration de la stratégie de recherche ; (4) identification des critères d'inclusion (IC) et d'exclusion (EC) ; (5) élaboration du protocole de la revue systématique ; (6) examen des articles ; (7) réalisation d'une évaluation de la qualité (QA) des articles ; (8) recherche et sélection des études pertinentes et (9) extraction et collecte des données. Après avoir terminé ces étapes, nous préparerons des rapports et des conclusions et fournirons la synthèse et l'analyse qui présentent les résultats de ce SLR pour notre étude dans les autres sections de ce chapitre.

Dans un premier temps, nous proposons un guide pour la réalisation d'un SLR sur les applications des RCSF dans le domaine de l'irrigation, appelé WSN-based irrigation SLR. Nos procédures couvrent les guides les plus traditionnels pour produire des SLR et les adaptent au sujet de notre étude. A notre connaissance, il s'agit du premier guide mieux expliqué et détaillé pour réaliser un SLR sur les applications des RCSF dans le domaine de l'irrigation.

Le flux de travail de la « WSN-based irrigation SLR » est illustré à la Figure 4.1.

Dans cette section, nous définirons et présenterons la méthodologie de la revue systématique, WSN-based irrigation SLR, utilisée pour élaborer cette étude.

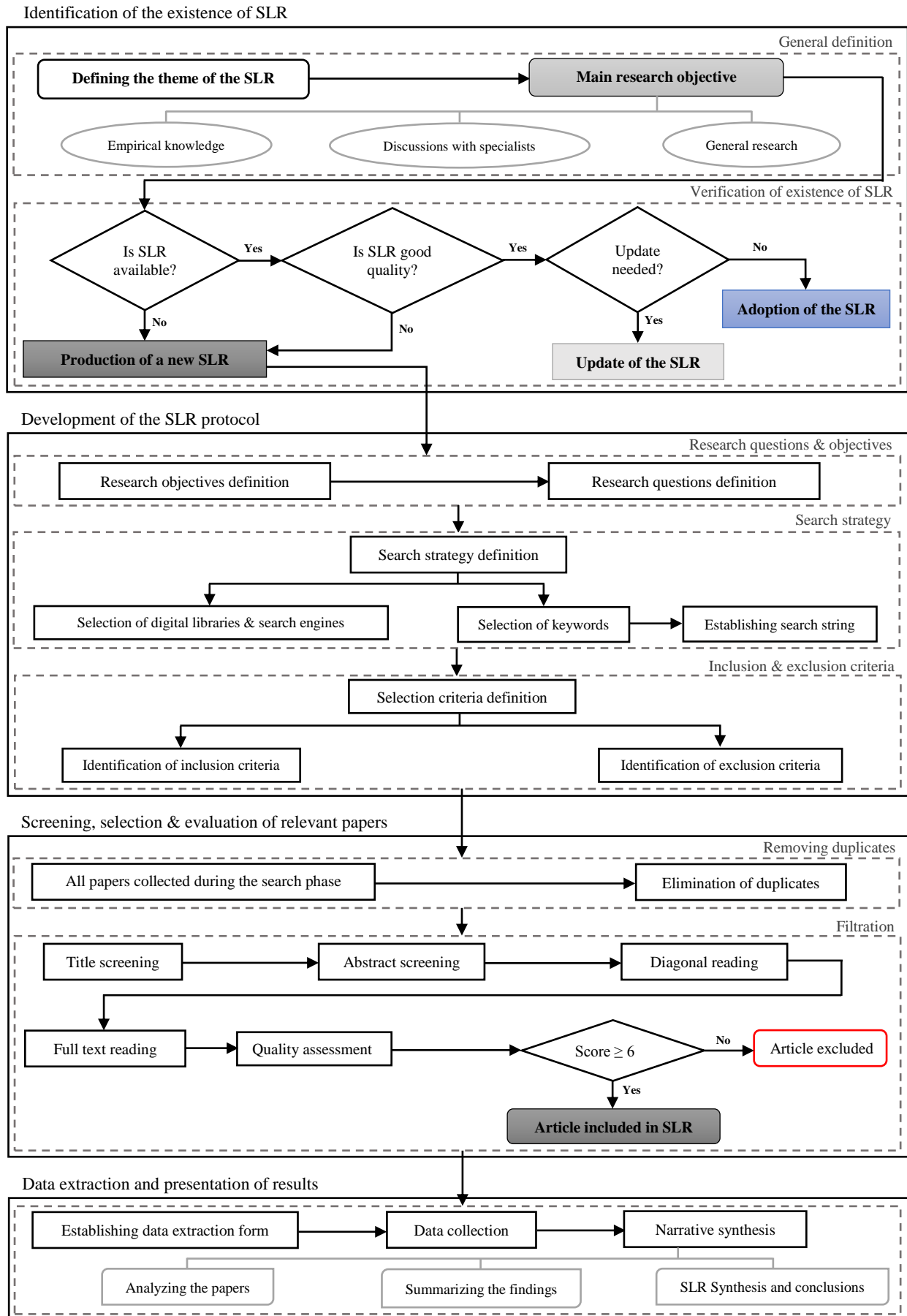


Figure 4.1 Flux de travail de WSN-based irrigation SLR.

4.2.1 Objectifs de recherche

L'objectif principal d'une étude est le point de départ d'un SLR. Cet objectif va guider le SLR. Il est obtenu par des connaissances empiriques et peut être réalisé à l'aide des discussions avec des spécialistes du domaine de recherche, de recherches générales sur Internet ou de la lecture de références bibliographiques pertinentes dans le domaine. L'objectif principal doit être simple et générique. Une fois que l'objectif principal est défini, il ne peut plus être modifié. Les objectifs de recherche doivent également être documentés.

L'objectif principal de ce SLR est d'étudier et d'analyser les utilisations et les applications du RCSF dans le domaine de l'irrigation. Cette étude comprenait les objectifs de recherche suivants :

- RO1. Des travaux de recherche de pointe plus ciblés ont été identifiés dans le domaine de l'irrigation à base de RCSF.
- RO2. Décrire des applications d'irrigation basées sur le RCSF.
- RO3. Mettre en évidence l'importance de RCSF dans les systèmes d'irrigation.
- RO4. Identifier et analyser les différents capteurs utilisés.
- RO5. Identifier et analyser les cultures, les sols et les techniques d'irrigation utilisés.
- RO6. Caractériser les technologies de communication sans fil utilisées.

4.2.2 Questions de recherche

La définition des questions de recherche est la première et la plus importante partie de tout SLR. Pour mener notre étude, nous abordons les questions de recherche suivantes :

- RQ1. Quelles sont les solutions actuelles pour les systèmes d'irrigation basés sur les réseaux de capteurs sans fil ?
- RQ2. Quelles sont les différentes techniques / outils disponibles pour utiliser la technologie RCSF dans le domaine de l'irrigation ?
- RQ3. Quels sont les différents capteurs adoptés dans un système d'irrigation basé sur RCSF ?
- RQ4. Quelles sont les paramètres les plus surveillés dans le domaine de l'irrigation en utilisant le RCSF ?
- RQ5. Quelles sont les différentes cultures considérées pour les systèmes d'irrigation à base de RCSF ?

- RQ6. Quels sont les différents sols considérés pour les systèmes d'irrigation basés sur RCSF ?
- RQ7. Quelles sont les différentes techniques d'irrigations prises en compte pour les systèmes d'irrigation basés sur RCSF ?
- RQ8. Quelles sont les technologies de communication utilisées dans les RCSF pour le domaine de l'irrigation ?

4.2.3 Stratégie de recherche

Les SLR sont basées sur une stratégie de recherche définie qui vise à découvrir autant de littérature pertinente que possible. La deuxième étape importante de ce SLR est donc de rechercher des études pertinentes sur les sujets de recherche. Une chaîne de recherche a été définie et utilisée pour rassembler les articles publiés liés aux sujets de recherche. Nous avons effectué une recherche pilote basée sur des mots clés spécifiques, et nous avons décidé de n'utiliser que les applications et les utilisations RCSF dans la chaîne de recherche sur l'irrigation. Toutefois, dans la recherche pilote, nous avons également utilisé d'autres mots clés tels que les capteurs et les protocoles de communication utilisés dans un système d'irrigation basé sur RCSF.

Une recherche a été effectuée en utilisant plusieurs moteurs de recherche et bibliothèques numériques pour collecter des articles adaptés à cette étude. Les résultats obtenus ont été compilés manuellement afin d'obtenir les meilleures sources d'information pour répondre aux questions de recherche définies. Nous avons sélectionné des moteurs de recherche et des bibliothèques numériques sur la base de leur contenu scientifique et de ceux étroitement liés à l'objectif de notre étude. Sept bases de données ont été consultées pour trouver les travaux connexes existants dans le domaine de l'irrigation de précision à l'aide de réseau de capteurs sans fil. Ces bases de données sont ScienceDirect – Elsevier [213], Scopus [214], Web of Science [215], Springer [216], IEEE Xplore [217], MDPI [218] et ACM [219], ainsi que le moteur de recherche académique Google Scholar [220].

La prochaine étape après la sélection des moteurs de recherche et des bibliothèques numériques consiste à définir des termes et des procédures de recherche cohérents pour rechercher de la littérature technique et scientifique dans ces moteurs et bibliothèques sélectionnés. La stratégie adoptée pour les travaux de recherche dans ces bases de données et moteurs de recherche recherchait les termes utilisés pour désigner l'application de la technologie RCSF dans le domaine de l'irrigation, tels que l'irrigation intelligente, l'irrigation

de précision et l'irrigation automatique en association avec le RCSF et des termes synonymes. Ainsi, l'ensemble des mots-clés utilisés pour définir la chaîne de recherche est le suivant :

("Wireless sensor network" OR "WSN") AND ("Irrigation" OR "Smart irrigation" OR "Precision irrigation" OR "Automatic irrigation" OR "Automated irrigation" OR "Irrigation system using WSN" OR "Irrigation system using wireless sensor network") OR ("Rational use of water" OR "Water crisis" OR "Sensors" OR "WSN Communication Protocols" OR "Soil moisture using WSN")

Pour trouver une large gamme des travaux connexes, nous avons appliqué la chaîne de recherche que nous avons définie ci-dessus à l'article entier plutôt qu'au résumé et à la conclusion. Nous avons vérifié tous les articles pour nous assurer qu'ils incluent les mots-clés sélectionnés dans leur contenu.

Le résumé de la stratégie de recherche du SLR est présenté au Tableau 4.1.

Tableau 4.1 Stratégie de recherche appliquée.

Sources	Chaîne de recherche	Contexte
ScienceDirect, Scopus, MDPI, Web of Science, Springer, IEEE Xplore, ACM et Google Scholar.	("Wireless sensor network" OR "WSN") AND ("Irrigation" OR "Smart irrigation" OR "Precision irrigation" OR "Automatic irrigation" OR "Automated irrigation" OR "Irrigation system using WSN" OR "Irrigation system using wireless sensor network") OR ("Rational use of water" OR "Water crisis" OR "Sensors" OR "WSN Communication Protocols" OR "Soil moisture using WSN")	Irrigation Réseau de capteurs sans fil

Une recherche initiale a été effectuée en utilisant la stratégie de recherche définie ci-dessus, dans cette étape de recherche le nombre total d'articles a atteint 800.

4.2.4 Critères d'inclusion et d'exclusion

Des critères d'inclusion et d'exclusion ont été utilisés pour sélectionner les articles pertinents pour notre étude. Afin de discerner les articles à utiliser dans la revue systématique, la portée de la recherche a été limitée aux articles de revues (journaux) et de conférences publiées, et seuls les articles rédigés en anglais ont été pris en considération. De plus, pour suivre l'évolution récente dans ce domaine, nous avons sélectionné des articles publiés entre 2008 et 2019 (y compris les deux premiers mois de 2020). Par conséquent, nous définissons les critères d'inclusion suivants :

- IC1. Articles présentent l'application / l'utilisation du RCSF dans le domaine de l'irrigation.

- IC2. Articles présentent une technologie ou une solution basée sur les RCSF pour résoudre les problèmes liés à l'irrigation.
- IC3. Articles de journaux et de conférences liés au thème de notre étude.
- IC4. Articles publiés en anglais.
- IC5. Articles publiés entre 2008 et 2019.
- IC6. Etudes contenant des mots-clés que nous avons présentés précédemment dans la stratégie de recherche.

Nous avons décidé d'exclure une gamme de types de documents publiés autres que les articles de revues (journaux) et de conférences. Des documents tels que des posters, des résumés d'articles, des tables rondes, des éditoriaux, des préfaces, des interviews, des résumés des tutoriels, des discussions et des ateliers ont été exclus de la recherche. Les articles ont également été exclus si leur objectif principal n'était pas l'application / l'utilisation de RCSF dans l'irrigation. De plus, étant donné que certaines de nos questions de recherche portent sur l'analyse et l'identification d'un ensemble de données telles que les capteurs utilisés et les technologies de communication utilisées pour les systèmes d'irrigation basés sur le RCSF, nous avons donc exclus les articles qui ne contiennent pas de données claires et suffisantes pour répondre aux questions de recherche définies ci-dessus. Les articles qui ne sont pas publiés en anglais ont également été exclus. Par conséquent, nous définissons les critères d'exclusion suivants :

- EC1. Articles si leur objectif principal n'est pas l'application / l'utilisation de RCSF dans le domaine de l'irrigation.
- EC2. Données publiées non disponibles.
- EC3. Articles qui ne contiennent pas de données claires et suffisantes pour répondre aux questions de recherche définies ci-dessus.
- EC4. Articles publiés autres que des articles de journaux et de conférences.
- EC5. Articles non soumis à un examen par les pairs.
- EC6. Articles déclarés comme une revue ou une recherche bibliographique.
- EC7. Articles publiés dans toute langue autre que l'anglais.
- EC8. Articles qui ne sont pas pertinents pour la chaîne de recherche spécifiée ci-dessus.

4.2.5 Protocole de la revue systématique

Un protocole de la revue systématique est un ensemble de définitions restreintes qui guident la mise en œuvre d'un SLR [208]. Il enregistre les principales informations du SLR. On peut dire que c'est un plan qui aide à protéger l'objectivité en fournissant des descriptions explicites des étapes à suivre [221]. Nous avons élaboré un protocole pour la revue systématique de notre étude en suivant les directives définies par Higgins [211] et Mariano [208]. Ce protocole définit l'objectif principal du SLR, les objectifs de recherche, les questions de recherche, la stratégie de recherche et les critères d'inclusion et d'exclusion, comme le montre le tableau ci-dessous.

Tableau 4.2 Protocole du SLR proposé.

Objectif principal	Etudier et analyser les utilisations et les applications du RCSF dans le domaine de l'irrigation	
Objectifs de recherche	<ul style="list-style-type: none"> • RO1 : Des travaux de recherche de pointe plus ciblés ont été identifiés dans le domaine de l'irrigation à base de RCSF. • RO2 : Décrire des applications d'irrigation basées sur le RCSF. • RO3 : Mettre en évidence l'importance de RCSF dans les systèmes d'irrigation. • RO4 : Identifier et analyser les différents capteurs utilisés. • RO5 : Identifier et analyser les cultures, les sols et les techniques d'irrigation utilisés. • RO6 : Caractériser les technologies de communication sans fil utilisées. 	
Questions de recherche	<ul style="list-style-type: none"> • RQ1 : Quelles sont les solutions actuelles pour les systèmes d'irrigation basés sur les réseaux de capteurs sans fil ? • RQ2 : Quelles sont les différentes techniques / outils disponibles pour utiliser la technologie RCSF dans le domaine de l'irrigation ? • RQ3 : Quels sont les différents capteurs adoptés dans un système d'irrigation basé sur RCSF ? • RQ4 : Quelles sont les paramètres les plus surveillés dans le domaine de l'irrigation en utilisant le RCSF ? • RQ5 : Quelles sont les différentes cultures considérées pour les systèmes d'irrigation à base de RCSF ? • RQ6 : Quels sont les différents sols considérés pour les systèmes d'irrigation basés sur RCSF ? • RQ7 : Quelles sont les différentes techniques d'irrigations prises en compte pour les systèmes d'irrigation basés sur RCSF ? • RQ8 : Quelles technologies de communication sont utilisées dans les RCSF pour le domaine de l'irrigation ? 	
Stratégie de recherche	Chaîne de recherche (Mots-clés)	("Wireless sensor network" OR "WSN") AND ("Irrigation" OR "Smart irrigation" OR "Precision irrigation" OR "Automatic irrigation" OR "Automated irrigation" OR "Irrigation system using WSN" OR "Irrigation system using wireless sensor network") OR ("Rational use of water" OR "Water crisis" OR "Sensors" OR "WSN Communication Protocols" OR "Soil moisture using WSN")

	Sources	ScienceDirect, Scopus, MDPI, Web of Science, Springer, IEEE Xplore, ACM et Google Scholar
Critères de sélection	Critères d'inclusion	<ul style="list-style-type: none"> • Articles présentent l'application / l'utilisation du RCSF dans le domaine de l'irrigation. • Articles présentent une technologie ou une solution basée sur les RCSF pour résoudre les problèmes liés à l'irrigation. • Articles qui fournissent des données sur les questions de recherche (de la question de recherche 3 à la question de recherche 8) que nous avons précédemment définies. • Articles de journaux et de conférences liés au thème de notre étude. • Articles publiés en anglais. • Articles publiés entre 2008 et 2019. • Etudes contenant des mots-clés que nous avons présentés dans la stratégie de recherche.
	Critères d'exclusion	<ul style="list-style-type: none"> • Articles si leur objectif principal n'est pas l'application / l'utilisation de RCSF dans le domaine de l'irrigation. • Données publiées non disponibles. • Articles qui ne contiennent pas de données claires et suffisantes pour répondre aux questions de recherche définies ci-dessus. • Articles publiés autres que des articles de journaux et de conférences. • Articles non soumis à un examen par les pairs. • Articles déclarés comme une revue ou une recherche bibliographique. • Articles publiés dans toute langue autre que l'anglais. • Articles qui ne sont pas pertinents pour la chaîne de recherche spécifiée ci-dessus.

4.2.6 Examen des articles pertinents

Après avoir effectué la phase de recherche, tous les articles issus de la recherche n'étaient pas spécifiquement pertinents pour notre étude. Par conséquent, ces articles ont dû être évalués sur la base de leur pertinence pour la revue systématique. Pour identifier les articles pertinents, nous les avons examinés manuellement en analysant les éléments de chaque article tels que le titre, les mots-clés et le résumé, où nous avons divisé ce processus en quatre étapes.

Phase 1 : Dans la première phase de sélection, nous avons sélectionné les articles en fonction de leurs titres et exclu les études qui n'étaient pas pertinentes pour le domaine de recherche, c'est-à-dire celles dont les titres indiquent clairement qu'ils ne répondent pas aux critères d'inclusion. À titre d'exemple, comme notre stratégie de recherche incluait le terme "Wireless sensor network", nous avons obtenu plusieurs résultats sur des articles concernant le réseau de

capteurs sans fil dans d'autres domaines. De plus, en raison de notre utilisation du terme "Rational use of water", nous avons reçu de nombreux articles liés à l'utilisation rationnelle de l'eau mais dans des secteurs autres que l'irrigation. Les articles dont les titres indiquent clairement que les articles sortaient du cadre de cette revue systématique ont été exclus. Cependant, les titres ne sont pas toujours des indications claires sur le sujet de l'article. L'utilisation par certains auteurs de titres intelligents ou spirituels peut parfois obscurcir le contenu réel d'un article. Dans de tels cas, les articles ont été inclus pour examen dans la deuxième phase.

Phase 2 : Dans la deuxième phase de sélection, nous avons sélectionné les articles en fonction de leurs résumés. Dans cette étape, les résumés des articles sélectionnés dans la première étape ont été lus, puis à nouveau nous avons exclu tous les articles qui n'étaient clairement pas adaptés au domaine de recherche. De plus, les articles ont été sélectionnés sur la base des critères d'inclusion et d'exclusion définis ci-dessus (critères de sélection) et après avoir examiné le résumé de chaque article sélectionné, nous avons décidé de l'inclure ou non dans la prochaine phase de sélection. Cependant, nous avons constaté que les résumés étaient de qualité variable, certains résumés étant médiocres ou trompeurs, et certains donnant peu d'indications sur le contenu de l'article complet. Dans de tels cas, ces articles ont été inclus pour examen à l'étape suivante.

Phase 3 : Dans la troisième phase de sélection, nous avons sélectionné les articles en nous basant sur la lecture en diagonale. A cette étape, l'introduction, les sous-titres, les titres des figures et des tableaux et les conclusions des articles sélectionnés à l'étape précédente ont été lus pour évaluer la pertinence de l'article et identifier les articles connexes. Ensuite, nous avons exclu à nouveau tous les articles que nous avons jugés incompatibles avec l'objectif du SLR. Cependant, lors de la lecture en diagonale, nous avons eu des doutes quant à l'approbation de certains articles, ils ont également été inclus pour examen à l'étape finale.

Phase 4 : Dans la phase de sélection finale, nous avons sélectionné les articles en nous basant sur la lecture du texte intégral. À ce stade, nous avons lu le texte intégral des articles sélectionnés à l'étape précédente, et nous avons également effectué une évaluation de la qualité en plus des critères d'inclusion et d'exclusion définis pour évaluer la qualité de chaque article sélectionné afin de prendre la décision finale le concernant, soit de l'inclure, soit de l'exclure.

4.2.7 Evaluation de la qualité

En général, la réalisation d'une évaluation de la qualité dans un SLR est nécessaire pour évaluer la qualité des articles sélectionnés. L'évaluation de la qualité des articles fait généralement référence à l'évaluation de la validité des études. Dans ce SLR, en plus des critères d'inclusion et d'exclusion définis ci-dessus, nous avons évalué la qualité de chacun des 110 articles sélectionnés qui sont restés après la troisième phase de la Section 4.2.6 « Examen des articles » selon un ensemble de critères. Pour évaluer la qualité de chaque article sélectionné, nous avons conçu un questionnaire, qui est présenté à Annexe C. Ce questionnaire comprend huit questions d'évaluation de la qualité. Chaque article a été évalué selon ce qui suit. Les questions étaient les suivantes :

- QA1. L'article est-il un article de recherche ou un article de revue / recherche bibliographique ?
- QA2. L'objectif principal de l'article est-il lié à notre domaine d'études ?
- QA3. L'article répond-il aux questions de recherche ?
- QA4. L'article contribue-t-il à l'utilisation du RCSF dans le domaine de l'irrigation ?
- QA5. L'article présente-t-il une solution claire dans le domaine de l'irrigation en utilisant les RCSF ?
- QA6. L'article fournit-il des données claires et suffisantes pour répondre aux questions de recherche, en particulier pour RQ3 à RQ8 ?
- QA7. L'article a-t-il été publié dans une revue (journal) ou des actes de conférence pertinents ?
- QA8. L'article a-t-il été cité par d'autres articles ?

Les questions d'évaluation de la qualité ont été notées comme suit :

- ❖ QA1 : Les réponses possibles à cette question étaient « Oui » si l'article est un article de recherche ; ou « Non » s'il s'agit d'un article de revue / recherche bibliographique. Etant donné que nous avons défini le critère d'exclusion " Articles déclarés comme une revue ou une recherche bibliographique ", nous n'avons inclus que les articles de recherche dans cette étude. Par conséquent, tous les articles évalués ont été jugés « Oui » dans le premier critère.

- ❖ QA2 : Les réponses possibles à cette question étaient « Oui » si l'objectif principal de l'article se rapporte d'une manière ou d'une autre à l'objectif principal de notre étude ; ou « Non » dans le cas du contraire.
- ❖ QA3 : Les réponses possibles à cette question étaient « Oui » si l'article répond aux exigences des questions de recherche définies ; ou « Partiellement » si l'article répond partiellement aux exigences de ces questions (répond à au moins une des questions de recherche) ; ou « Non » s'il ne répond à aucune des exigences de ces questions.
- ❖ QA4 : Les réponses possibles à cette question étaient « Oui » si l'article contribue au RCSF dans le domaine de l'irrigation ; ou « Non » dans le cas du contraire.
- ❖ QA5 : Les réponses possibles à cette question étaient « Oui » si l'article présente une solution claire dans le domaine de l'irrigation en utilisant les RCSF ; ou « Partiellement » si l'article contribue au RCSF dans le domaine de l'irrigation mais ne présente pas de solution claire ; ou « Non » dans le cas du contraire.
- ❖ QA6 : Etant donné que certaines de nos questions de recherche (notamment du RQ3 à RQ8) portent sur l'analyse et l'identification d'un ensemble de données telles que les capteurs utilisés et les technologies de communication utilisées. Pour cette raison, les réponses possibles à cette question étaient « Oui » si l'article fournit des données claires et suffisantes pour répondre à ces questions de recherche ; ou « Partiellement » si l'article ne fournit qu'une partie des données requises ; ou « Non » si aucune donnée n'a été spécifiée.
- ❖ QA7 : Les réponses possibles à cette question étaient « Très pertinent » ou « Pertinent » ou « Moyen pertinent » ou « Non pertinent ». La réponse à cette question a été notée en considérant l'ordre de pertinence fourni par les listes de Journal Citation Reports (JCR) et de Journal and Country Rank (SJR) et les listes de conférences indexées [222] (voir Annexe E).
- ❖ QA8 : Les réponses possibles à cette question étaient « Oui » si l'article est cité par plus de quatre articles ; ou « Partiellement » si l'article est cité dans 1 à 4 articles ; ou « Non » si l'article n'est pas cité. Cette question a été évaluée en considérant le nombre de citations de Google Scholar [220]. Afin de ne pas être injuste envers les articles publiés en 2019 (y compris les deux premiers mois de 2020), nous avons considéré la réponse « Partiellement » comme étant le minimum score pour ces articles même s'ils n'étaient pas cités pendant la période de réalisation de cette étude.

Chacun des 110 articles sélectionnés a un score pour chacune des questions du questionnaire d'évaluation de la qualité. La somme de huit scores obtenus aux questions d'évaluation de la qualité pour chaque article donne un score final, qui est un nombre entier entre 14 ou 13 (14 pour un article journal et 13 pour un article de conférence) et 1. Notre procédure de notation pour chacune des questions du questionnaire d'évaluation de la qualité est présentée à Annexe D.

Pris ensemble, ces huit critères ont permis de mesurer dans quelle mesure nous pouvons être sûrs que les conclusions de l'article peuvent apporter une contribution précieuse à notre étude. Après le processus d'évaluation de la qualité de tous les articles sélectionnés, nous avons accepté les articles qui ont reçu la moitié du score final ou plus. De plus, certains articles ont également été inclus dans ce SLR s'ils ont été approuvés par nous malgré l'obtention d'un score final de 6.

L'évaluation de la qualité de certains articles sélectionnés à l'aide du questionnaire proposé est présentée à Annexe F.

4.2.8 Processus de sélection des articles

Après avoir défini les deux étapes importantes pour identifier et sélectionner les articles pertinents : le processus de l'examen des articles et la méthode d'évaluation de la qualité de chaque article sélectionné, nous présentons le processus de sélection des articles pertinents pour notre étude que nous avons suivi.

Le processus de recherche et de sélection des articles pertinents pour ce SLR a suivi un diagramme de flux PRISMA (Preferred Reporting Items of Systematic reviews and Meta-Analyses) [223], un diagramme précisant le nombre d'articles retenus et exclus à chaque étape ainsi que les raisons d'exclusion. Pour réaliser ce diagramme, nous avons suivi le modèle proposé par Moher et al. [223] (voir Annexe B). Le diagramme de flux PRISMA est résumé dans la Figure 4.2, où l'on peut observer que la recherche initiale a abouti à un total de 800 articles, qui ont été analysés, filtrés et classés dans un processus de réduction qui a abouti à la sélection de 80 articles pertinents.

Au cours de la phase d'identification, 800 articles ont été sélectionnés lors de l'application de la stratégie de recherche, comme mentionné précédemment.

Après avoir effectué la phase de recherche, nous avons importé les résultats de différentes sources de recherche sélectionnées dans le programme bibliographique Zotero, qui nous permet de trier les articles et d'éliminer les doublons. Au cours de ce processus, tous les

doublons ont été supprimés lorsqu'un article a été trouvé par plusieurs sources de recherche. Cela a donné 423 articles.

Lors de la phase de sélection, nous avons examiné manuellement 423 articles sur la base de critères d'inclusion et d'exclusion, de mots clés, de titres, de résumés et de la lecture en diagonale de l'article. A ce stade, nous avons suivi les trois premières étapes décrites dans la Section 4.2.6 « Examen des articles ». Environ la majorité des articles ont été exclus sur la base de la première phase de la Section 4.2.6 : l'évaluation des titres, dans laquelle 150 articles ont été exclus. En outre, 101 articles ont été exclus sur la base de la deuxième phase de la Section 4.2.6 : l'évaluation des résumés. Au cours de la troisième phase de la Section 4.2.6: la lecture en diagonale, nous avons exclu 62 articles. En conséquence, seulement 110 articles ont été sélectionnés pour examen à l'étape finale et 313 articles ont été exclus.

Au cours de la phase d'éligibilité, nous avons examiné le contenu de 110 articles résultants. À ce stade, nous avons suivi la quatrième étape décrite dans la Section 4.2.6 « Examen des articles » : la lecture du texte intégral en plus des étapes décrites dans la Section 4.2.7 « Évaluation de la qualité ». Sur les 110 articles évalués pour la qualité, 30 ont été exclus. Cette évaluation et analyse a abouti à 80 articles (parmi ces articles, nous en avons inclus deux qui ne répondaient pas au critère d'inclusion 5 ; Damas et al. [224] et Morais et al. [225]) considérés comme éligibles et qui sont inclus dans cette étude.

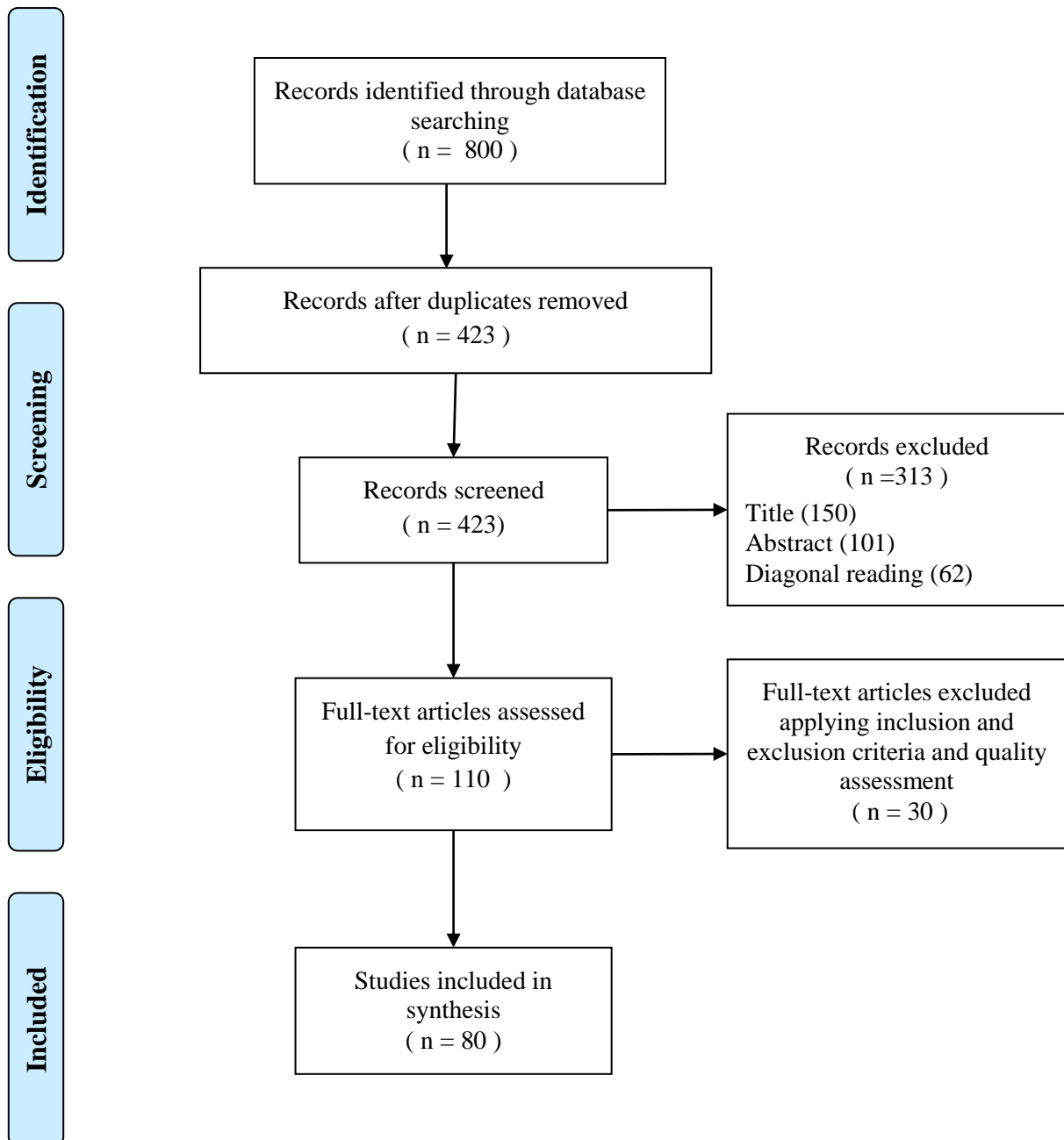


Figure 4.2 Processus de sélection des articles pertinents selon le diagramme de flux PRISMA.

4.2.9 Méthode d'extraction de données

Le but de cette étape est d'extraire des données pour enregistrer avec précision les informations que les chercheurs ont obtenues à partir des études primaires [226]. Une stratégie d'extraction de données a été appliquée aux 80 articles pertinents sélectionnés dans cette revue systématique pour fournir un ensemble de réponses potentielles aux questions de recherche spécifiques. Les réponses possibles pour chaque question de recherche sont expliquées plus en détail comme suit.

RQ1 et RQ2 : La réponse à ces deux questions de recherche est présentée en identifiant les travaux de recherche de pointe plus ciblés dans le domaine de l'irrigation à base de RCSF, en décrivant les applications d'irrigation basées sur RCSF et en soulignant l'importance du RCSF dans les systèmes d'irrigation.

RQ3 et RQ4 : La réponse à ces deux questions de recherche est apportée en identifiant les différents capteurs utilisés dans ce contexte et en analysant les différents paramètres qui sont surveillés avec ces capteurs.

RQ5 : La réponse à cette question de recherche est apportée en identifiant et en analysant les différentes cultures considérées dans le domaine de l'irrigation en utilisant le RCSF.

RQ6 : La réponse à cette question de recherche est apportée en identifiant et en analysant les différents types de sols considérés dans le domaine de l'irrigation en utilisant le RCSF.

RQ7 : La réponse à cette question de recherche est apportée en identifiant et en analysant les différentes techniques d'irrigations prises en compte dans le domaine de l'irrigation à l'aide de RCSF.

RQ8 : La réponse à cette question de recherche est apportée en identifiant les différentes technologies de communication utilisées dans ce contexte et en analysant et discutant ces technologies de communication.

Nous avons également conçu un formulaire d'extraction de données afin de recueillir toutes les informations nécessaires au traitement de notre étude, ce qui nous a permis d'enregistrer tous les détails des articles examinés et de déterminer comment chacun d'entre eux répondait à nos questions de recherche (voir Annexe G).

Après avoir défini la méthodologie de la revue systématique, « WSN-based irrigation SLR », nous procédons à la présentation des rapports, conclusions, synthèses et analyses présentant les résultats du SLR de notre étude dans les sections suivantes de ce chapitre.

4.3 Application des réseaux de capteurs sans fil dans l'irrigation

La technique d'irrigation est l'un des besoins les plus vitaux de l'agriculture. C'est l'acte d'approvisionnement artificiel en eau dans les terres agricoles pour augmenter la production et permettre son développement naturel. La pénurie d'eau préoccupante dans le monde encourage la gestion de l'irrigation pour optimiser l'utilisation de l'eau. Divers systèmes d'irrigation, tels que l'irrigation par aspersion et l'irrigation goutte à goutte, sont déployés pour éviter et réduire le problème du gaspillage d'eau. Cependant, ces systèmes sont encore inefficaces, mais nous pouvons améliorer leur efficacité en utilisant des informations sur le sol, le climat et l'environnement. À cet égard, les réseaux de capteurs sans fil sont utilisés comme technique de coordination dans la méthode d'irrigation pour développer et améliorer l'efficacité de ce système.

Les réseaux de capteurs sans fil ont été largement utilisés dans les systèmes d'irrigation, et cette utilisation a été très appréciée ces dernières années. Cette revue de la littérature met en évidence une variété de travaux et de recherches impliquant l'utilisation et l'application de la technologie RCSF pour contrôler et gérer les systèmes d'irrigation.

Avatade et Dhanure [227] ont présenté et développé un système d'irrigation automatisé utilisant un réseau de capteurs sans fil et la technologie GPRS. Le système développé est basé sur une plateforme embarquée utilisant un microcontrôleur ARM pour le système d'irrigation d'eau. Ce système permet de mesurer et surveiller la température et le niveau d'humidité du sol à l'aide de nombreux nœuds de capteurs sans fil basés sur un microcontrôleur ARM. Il contrôle le débit d'eau dans le champ en utilisant les valeurs mesurées pour réduire la consommation d'eau d'irrigation. Ce projet intégré permet également de surveiller et de contrôler l'état des capteurs utilisés sur un PC distant via une page Web en entrant une adresse IP spécifiée pour le système.

Kim et Evans [228] ont développé un système logiciel pour le contrôle de l'irrigation à l'aide de RCSF. Ils ont présenté la conception d'un logiciel d'aide à la décision et l'intégration de ce logiciel avec un RCSF sur le terrain pour le contrôle et la surveillance de la technique d'irrigation par aspersion. Les auteurs ont développé le logiciel Wireless in-field sensing and

control (WISC) pour l'accès à distance à l'information, la prise de décision et la surveillance et le contrôle en temps réel de l'irrigation par aspersion sur un site spécifique via le RCSF et Bluetooth.

Les auteurs de [229] ont proposé et développé une architecture de capteurs sans fil pour une gestion efficace de l'eau d'irrigation, cet architecture d'irrigation proposée est basée sur l'utilisation de RCSF et la technologie GPRS. Navarro-Hellín et al. [229] ont décrit la conception, l'optimisation et le développement d'une application pratique qui vise à optimiser les ressources en eau dans l'agriculture irriguée en surveillant l'état de l'eau du sol et de l'eau d'irrigation. Le système proposé est composé des nœuds de capteurs sans fil autonomes équipés d'une connectivité GPRS. Ces nœuds mesurent et surveillent les paramètres du sol qui doivent être transmis à un serveur distant par GPRS/GSM pour un traitement ultérieur afin de parvenir à une gestion efficace des ressources en eau dans l'irrigation. Divers scénarios réalistes de gestion de l'irrigation ont été réalisés dans le cadre de ce travail en utilisant l'architecture de capteurs sans fil proposée pour évaluer le comportement de ce dispositif.

Nikolidakis et al. [230] ont développé un système d'irrigation automatisée en utilisant des réseaux de capteurs sans fil pour contrôler et gérer efficacement l'irrigation en identifiant des schémas appropriés pour une utilisation rationnelle de l'eau d'irrigation. Dans ce travail, les auteurs ont intégré une technique d'irrigation automatisée à un nouveau protocole de routage avancé, Equalized Cluster Head Election Routing Protocol (ECHERP), qui permet de réaliser une efficacité énergétique élevée.

Un système de télédétection et de contrôle du système d'irrigation utilisant un réseau distribué de capteurs sans fil, le système de positionnement global (GPS) et la technologie Bluetooth a été présenté dans [231]. Le système proposé consiste en un réseau distribué de capteurs sans fil qui comprend un ensemble de nœuds de capteurs déployés dans les terres agricoles pour surveiller et contrôler les conditions météorologiques et les conditions du sol. Il permet également de détecter la position des arroseurs. Les auteurs ont également développé un logiciel pour la détection et la surveillance en temps réel sur le terrain d'un système d'irrigation à mouvement linéaire de précision spécifique au site. Dans ce travail, Yunseop Kim et al. [231] ont cherché à améliorer la gestion de l'eau pour contrôler efficacement l'irrigation afin de conserver l'eau et d'améliorer la productivité agricole.

Une modélisation spatio-temporelle basée sur des données d'enquêtes électromagnétiques à haute résolution temporelle et spatiale a été développée et approuvée pour prédire et modéliser la profondeur de la nappe phréatique et l'état de l'eau du sol en [232], dans le but d'avoir une planification et une gestion précises du système d'irrigation. Les auteurs ont utilisé

dans cette modélisation les couches de données DEM (c.-à-d., Digital Elevation Map) et EM (c.-à-d., ElectroMagnetic) à haute résolution spatiale. En outre, pour modéliser la nature dynamique de l'humidité dans le sol, ils ont utilisé divers ensembles de données RCSF à haute résolution temporelle provenant d'un RCSF déployé dans les terres irriguées. Dans ce travail, le modèle proposé vise à obtenir une meilleure mise en œuvre d'un système d'irrigation à débit variable.

Gutiérrez et al. [233] ont proposé un système d'irrigation automatisé basée sur l'utilisation du réseau de capteurs sans fil et d'autres technologies pour gérer et optimiser l'utilisation de l'eau pour les cultures agricoles (voir Figure 4.3). Le système proposé consiste en un réseau sans fil distribué avec de nombreux capteurs d'humidité et de température pour surveiller et contrôler les paramètres du sol. Il se compose également d'une unité de contrôle qui permet d'identifier, d'évaluer et de stocker les données collectées, ainsi que de gérer l'activation automatique de l'irrigation à l'aide d'un programme développé contenant des valeurs de seuil d'informations mesurées. Les auteurs ont testé ce système automatisé dans une serre pour la culture biologique de sauge pendant 136 jours. Les résultats des tests ont montré des économies d'eau significatives, c.-à-d., jusqu'à 90%, par rapport aux techniques d'irrigation traditionnelles.

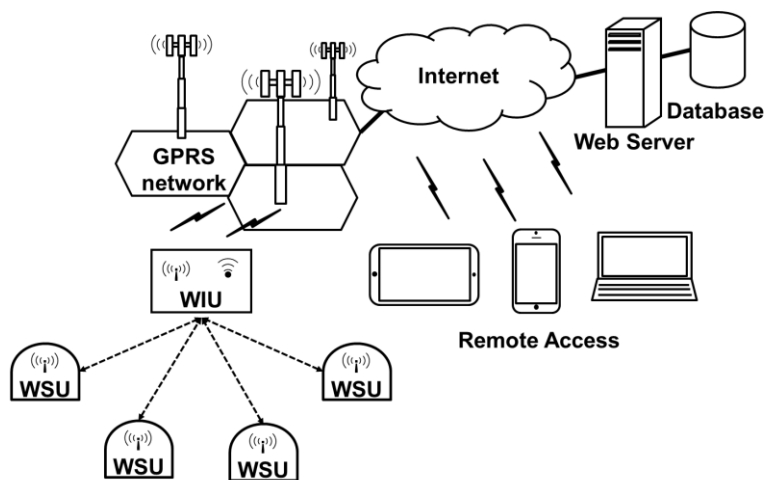


Figure 4.3 Système d'irrigation automatisé utilisant RCSF, ZigBee et GPRS [233].

Une autre solution pour automatiser le système d'irrigation à l'aide du RCSF a été présentée dans [234]. Cette solution permet de développer et d'évaluer la performance d'un système d'irrigation automatisé. Le système développé est composé d'un réseau de capteurs sans fil avec de nombreux capteurs d'humidité pour surveiller et contrôler les conditions du sol. De plus, il permet aux utilisateurs d'interroger le système à distance pour obtenir des informations sur les conditions du sol. Dans ce travail, les auteurs visent à utiliser ce système dans

différents type de terres agricoles, dans lequel l'évaluation des performances de ce système a été faite dans trois types de sols : sols sableux, limoneux, et argileux.

Damas et al. [224] ont présenté et décrit un système d'irrigation automatique avec contrôle à distance et centralisé pour superviser de grandes surfaces de terrain irrigué en Espagne. Dans ce système, la terre agricole était divisée en sept sous-zones. Chaque sous-zone était contrôlée par secteur de contrôle. Les sept secteurs étaient connectés entre eux et également au contrôleur central par le biais d'un réseau WLAN. Les résultats des tests ont été positifs en ce qui concerne la conservation de l'eau, cette conservation atteint jusqu'à 30-60%.

Sawant et al. [235] ont développé un système de surveillance et de gestion agrométéorologique pour l'agriculture de précision. Le système proposé est basé sur une plateforme de capteurs avec une architecture d'activation du web de capteurs intégrée aux normes d'activation du web de capteurs de l'OGC. Ce système est considéré comme un système de capteurs hétérogènes standardisés qui comprend des outils de surveillance des besoins en eau des cultures, un contrôle à distance et des capteurs plug-n-play. Dans ce travail, les auteurs visent à réaliser le partage et l'accès aux données sur divers réseaux de capteurs distribués et la standardisation de la découverte des données.

La Figure 4.4 montre le déploiement réel du système de détection SenseTube sur le terrain.

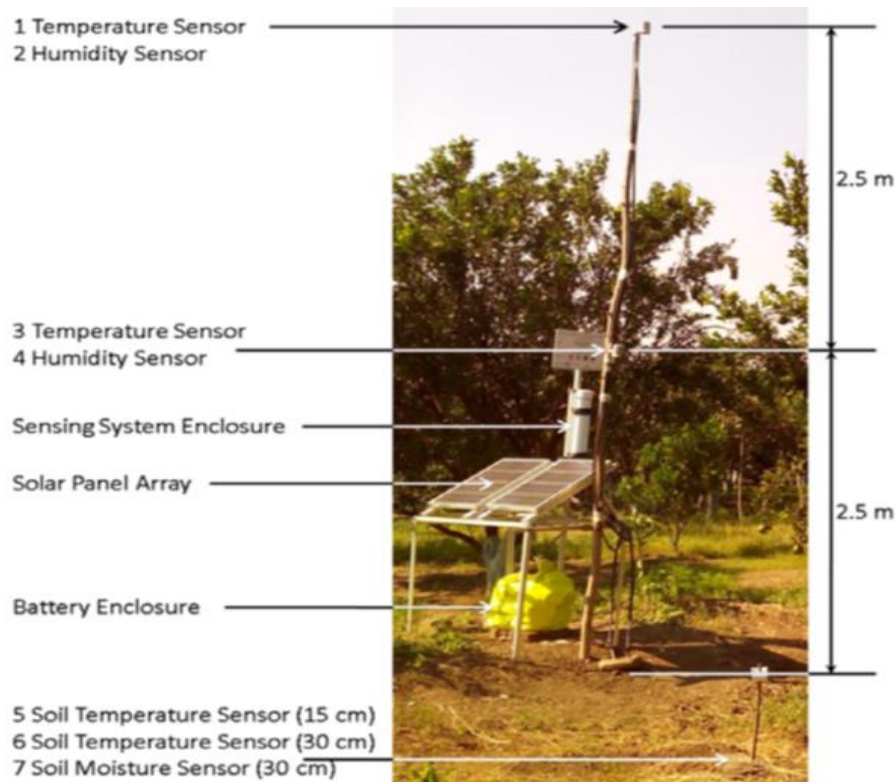


Figure 4.4 Déploiement du système de détection SenseTube sur le terrain [235].

Viani et al. [236] ont développé un système d'aide à la décision à faible coût pour gérer l'efficacité du système d'irrigation et ainsi économiser l'eau dans l'agriculture. Le système proposé est basé sur l'intégration d'une méthodologie innovante d'aide à la décision et d'un réseau de capteurs et d'actionneurs sans fil (WSAN) à faible coût. La méthodologie innovante utilisée aide à la décision en utilisant la logique floue (FL) ; cette méthodologie a été calibrée et conçue sur la base des indications données par les agriculteurs pour comprendre l'état de la culture et reproduire l'expérience humaine. Le WSAN se compose d'un ensemble de nœuds de capteurs et est utilisé pour mesurer et surveiller les conditions environnementales et pour gérer le système d'irrigation. Le système d'irrigation intelligent proposé vise à obtenir de nombreux avantages, notamment un système sans fil entièrement autonome, un faible niveau de stress hydrique, une meilleure conservation de l'eau et une augmentation de la productivité des cultures.

Un autre système d'aide à la décision basé sur le RCSF a été présenté par Khan et al. [237] pour une utilisation efficace de l'eau. Khan et al. [237] ont développé un système de gestion de l'irrigation et de détection des valeurs aberrantes à l'aide d'un réseau de capteurs sans fil, qui aide les agriculteurs à gérer les procédures d'irrigation des cultures.

Cambra et al. [238] ont développé un système intelligent basé sur l'utilisation d'un réseau de capteurs sans fil pour surveiller le bicarbonate dans le système d'irrigation afin d'améliorer la culture hydroponique de précision en serre. Les auteurs proposent d'utiliser un capteur de pH auto-calibré qui est connecté à un nœud sans fil, pour détecter et ajuster les déséquilibres de pH détectés dans les solutions nutritives utilisées pour l'agriculture hydroponique. Le système développé est basé sur un RCSF constitué d'un ensemble de nœuds de capteurs de pH auto-calibrés pour une meilleure gestion et un meilleur contrôle de l'agriculture hydroponique de précision en serre.

Un système d'identification des critères de placement des capteurs d'humidité basé sur l'analyse de la stabilité temporelle de la teneur en eau du sol a été présenté et développé par Zhao et al. [239]; le système vise à améliorer la gestion d'une technique d'irrigation à taux variable. En identifiant les critères de placement des capteurs d'humidité du sol, les auteurs ont évalué régulièrement la stabilité temporelle de la teneur en eau du sol et ont comparé ce modèle de stabilité temporelle entre l'irrigation à taux uniforme (URI) et l'irrigation à taux variable (VRI). Dans ce travail, les tests de la technique d'irrigation à taux variable proposée démontrent qu'il y a un changement dans la similarité globale du modèle spatial de l'humidité du sol et qu'il y a une économie d'eau significative.

Imteaj al. [240] ont proposé un système d'approvisionnement automatique en eau pour gérer correctement le système d'irrigation qui utilisait principalement Arduino, un module Wi-Fi, Raspberry Pi et GSM. Un ensemble de capteurs est utilisé pour établir un RCSF afin de détecter et de surveiller l'intensité de la lumière du jour, le niveau d'eau dans le sol et l'humidité du sol. Les données mesurées sont envoyées sous forme de signal numérique via Wi-Fi au Raspberry Pi. Le système alerte l'administrateur via GSM par SMS en cas de problème d'approvisionnement en eau (p. ex., un manque d'eau). Il est à noter que le système proposé vise à identifier le moment approprié pour l'approvisionnement en eau d'irrigation en analysant les données mesurées.

Par ailleurs, les auteurs de [241] ont proposé un modèle de programmation linéaire pour optimiser l'utilisation de l'eau en fonction des paramètres pédologiques et météorologiques pour l'irrigation. Dans ce travail, Difallah et al. [241] ont intégré une forme décisionnelle du problème du " knapsack " avec un modèle de programmation linéaire pour identifier la quantité d'eau nécessaire à l'irrigation. Les tests de ce système proposé indiquent qu'il peut réduire la consommation d'eau de 28,51 %.

Nagarajan et Minu [242] ont proposé et conçu un système d'automatisation de l'irrigation par aspersion à l'aide d'un RCSF. Le système proposé utilise également la technologie GPRS pour le stockage et l'analyse des données et la technologie ZigBee pour la transmission des données. Ce système surveille les conditions du sol (p. ex., l'humidité, le pH et la température du sol) en utilisant un ensemble de différents capteurs, et envoie les données détectées à un contrôleur à des fins de surveillance (p. ex., le contrôle de la teneur en eau du sol et le contrôle de la température du sol). Le système proposé permet également de contrôler et d'optimiser l'approvisionnement en eau.

Une autre solution pour le système d'irrigation en utilisant le RCSF et le protocole ZigBee a été présentée par [243], Cette étude permet de proposer une méthodologie pour la mise en place d'un système d'irrigation intelligent à grande échelle.

Katyara et al. [244] ont mis en place un réseau de capteurs sans fil sous forme d'unité terminale à distance (RTU) pour la surveillance à distance et le contrôle intelligent des systèmes d'irrigation au Pakistan. Diverses données, telles que l'humidité et la température du sol, ont été mesurées par ces RTU et ces données sont envoyées pour estimer et contrôler la quantité d'eau nécessaire pendant l'activité d'irrigation. Les résultats des tests ont montré des résultats positifs en termes de réduction de l'eau utilisée pour l'irrigation et d'augmentation de la productivité des terres agricoles, qui a augmenté de près de 20 à 25%.

Un système d'irrigation de précision utilisant un réseau de capteurs intégré à l'application IOS/Android pour surveiller et gérer les différentes phases de la croissance des plantes a été proposé dans [245]. Le système développé consiste principalement en un panneau solaire, des vannes, un filtre, un surpresseur d'eau et un réservoir d'eau. Il est également composé d'un ensemble de capteurs d'humidité DS200 qui permettent de mesurer la quantité d'eau dans le sol. Dans ce système, les données mesurées ont été envoyées en temps réel par Wi-Fi à un téléphone mobile basé sur IOS/Android.

Morais et al. [225] ont proposé et implémenté un système d'irrigation intelligent basé sur un réseau d'acquisition de données sans fil (WDAN) pour collecter des données sur le climat et l'humidité du sol dans les régions irriguées du Portugal. Dans ce système, plusieurs SPWAS ont été utilisées pour mesurer l'humidité du sol et les conditions climatiques afin d'améliorer l'efficacité de l'irrigation et d'augmenter le rendement de production des terres agricoles.

Dursun et Ozden [246] ont présenté un autre travail dans l'application RCSF dans le domaine de l'irrigation visant à contrôler et à surveiller un système d'irrigation goutte à goutte au profit d'un site agricole cerisiers nains (voir Figure 4.5). Le système développé est composé de trois éléments essentiels comprenant une unité de capteurs, une unité de vannes et une unité de station de base. Ce système permet de contrôler sans fil la technique d'irrigation et de surveiller la teneur en eau du sol en temps réel à l'aide de capteurs d'humidité du sol. Dans ce travail, de nombreux avantages ont été obtenus tels que la salification, la prévention du stress hydrique des arbres et l'utilisation efficace des ressources en eau douce.

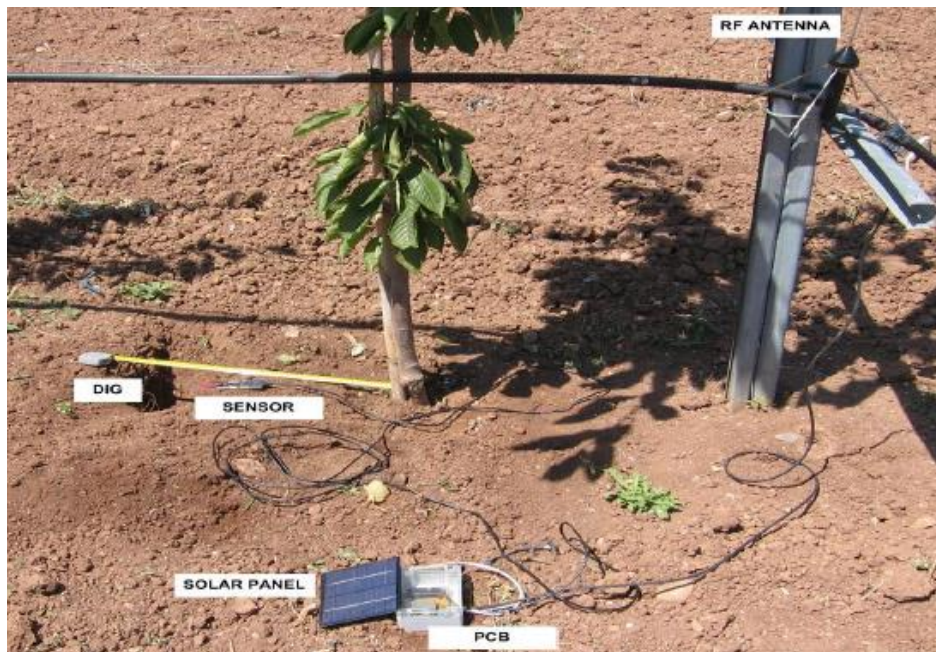


Figure 4.5 Application de l'irrigation goutte à goutte automatisée sur un cerisier nain [246].

Une autre validation de l'utilisation du RCSF dans les serres a été faite en [247]. Shaker et Imran ont développé un système qui permet de surveiller les paramètres climatiques et de contrôler l'eau d'irrigation afin d'optimiser le processus de production dans la serre en se basant sur l'utilisation du réseau de capteurs sans fil. Le système développé comprend le microcontrôleur Atmeag328P, contrôlé par la plateforme Arduino, qui permet le traitement des données mesurées, la présentation des valeurs mesurées sur l'écran LCD et la surveillance de la vanne. Il comprend également le module XBee, qui fonctionne comme un module émetteur-récepteur. Pour la mesure des paramètres climatiques, les auteurs ont utilisé des capteurs EC-5 pour mesurer l'humidité du sol et des capteurs DHT22 pour mesurer l'humidité et la température.

Il existe également différents types d'applications combinant des réseaux de capteurs sans fil et des systèmes multi-agents dans le domaine de l'irrigation. L'une d'entre elles, un système multi-agents innovant, a été développée par González-Briones et al. [248] pour traiter les informations du RCSF pour la découverte de connaissances et la prise de décision dans les zones rurales. Le système proposé a été testé dans une étude de cas d'un système d'irrigation localisé avec un pivot pour une culture de maïs. Le système développé comprend un RCSF, qui est composé d'un ensemble de capteurs pour la mesure de la hauteur, du vent, de l'humidité et de la température. Les données mesurées permettent de prendre des décisions efficaces sur l'irrigation du maïs afin d'optimiser la consommation d'eau d'irrigation. Un autre système a été proposé par González-Briones et al. [249], qui ont mis au point un système multi-agents intelligent pour réduire la consommation d'eau dans l'irrigation automobile. Les auteurs ont développé un nouveau système multi-agents selon le modèle de l'informatique en nuage. Le système développé vise à automatiser la collecte et la gestion des informations sur les cultures de pommes de terre. Les données sont collectées à l'aide de RCSF pour soutenir la prise de décision et la découverte de connaissances pour l'irrigation de précision. Villarrubia et al. [250] ont également développé un système qui intègre de systèmes multi-agents avec le RCSF et l'ont utilisé pour surveiller les cultures et contrôler l'irrigation de ces cultures.

Rahim Khan et al. [251] ont développé un système de contrôle de l'irrigation pour les cultures en conteneurs en utilisant le RCSF. Le système développé comprend un réseau de capteurs sans fil qui permet de surveiller en continu les conditions de l'environnement et du sol à l'aide d'un ensemble de capteurs déployés. Les données mesurées sont traitées et évaluées afin de déterminer les zones déficientes en eau, puis d'en informer l'agriculteur par l'envoi d'un message texte ou via une unité d'alarme.

Chikankar et al. [252] ont développé un système d'irrigation automatisé basé sur le contrôle d'un ensemble des paramètres (p. ex., l'humidité de l'air, l'humidité du sol et la température) en utilisant le RCSF et ZigBee. Le système développé utilisait la technologie ZigBee pour les communications des données. Il comprenait un RCSF, qui est composé de capteurs d'humidité du sol, SY-HS-220 et LM-35 pour les mesures de l'humidité de l'air, de l'humidité du sol et de la température.

Une autre application du réseau de capteurs sans fil dans le domaine de l'irrigation a été suggérée par Angelopoulos et al. [253]. Dans ce travail, l'irrigation domestique (c.-à-d., l'arrosage d'un jardin domestique) a été mise en évidence cette fois. Le système développé est composé de deux types de capteurs motes. Les motes TelosB sont équipées de capteurs SHT11 et EC-5, qui permettent de surveiller un ensemble de conditions environnementales. Les motes IRIS utilisées pour le contrôle des électrovannes. Ce système utilise également une application pour la collecte et l'enregistrement des données.

Un service de surveillance des champs de cultures ambiants utilisant un puits mobile dans le RCSF a été présenté et développé par Khan et Kumar [254] pour améliorer l'agriculture dépendant du contexte. Dans ce travail, Kumar et Khan ont conçu un algorithme pour trouver un meilleur chemin utilisant un nœud de capteur vers un puits mobile dans le RCSF et un autre algorithme pour un chemin de déplacement de puits mobile. Des réseaux de capteurs sans fil sont déployés pour surveiller les champs de cultures ambiants. Les auteurs cherchent à améliorer les performances du réseau de capteurs ambiants et à augmenter le rendement des cultures tout en réduisant les délais et la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs agricoles sans fil dépendant du contexte ambiant.

L'utilisation de smartphone avec RCSF dans le domaine de l'irrigation a été proposée par Bartlett et al. [255] et Jagüey et al. [256]. Bartlett et al. [255] ont développé une application pour smartphone dans le but d'étendre l'utilisation d'une programmation d'irrigation basée sur le Cloud. L'application développée permet une visualisation rapide des mesures météorologiques et du déficit hydrique du sol. Cette application permet également de saisir les quantités d'irrigation appliquées dans un outil de planification de l'irrigation en ligne basé sur l'évapotranspiration. Jagüey et al. [256] ont développé un capteur d'irrigation automatisé. Ce capteur permet la capture et le traitement d'images numériques du sol basées sur l'utilisation de smartphones. En outre, il permet l'estimation visuelle de la teneur en eau à l'aide des images capturées.

4.4 Pourquoi des capteurs et des RCSF dans les systèmes d'irrigation ?

Pour développer et améliorer les systèmes d'irrigation, il faut prendre en considération toute une série de besoins et d'exigences, notamment :

- Il est nécessaire de collecter des informations sur les sols et les cultures,
- Des informations météorologiques doivent également être collectées,
- Il doit recueillir des informations sur la croissance des cultures,
- Il existe différents types de cultures dans un même champ,
- Les besoins en eau pour l'irrigation varient en fonction des besoins des cultures,
- Les besoins de chaque culture varient selon les conditions du sol et des conditions météorologiques,
- Proposition et développement de solutions proactives pour le système d'irrigation,
- L'état des équipements et des composants du système d'irrigation doit être surveillé,
- L'emplacement des composants du système d'irrigation doit également être surveillé.

Pour atteindre cet objectif (l'amélioration et le développement des systèmes d'irrigation), il est nécessaire de trouver une solution qui puisse automatiser ces systèmes et permettre une prise de décision intelligente afin d'obtenir une application et un traitement avec une caractéristique parallèle et distribuée.

Les capteurs sont les dispositifs les plus couramment utilisés dans les scénarios de collecte de données physiques et environnementales. En particulier dans le domaine de l'irrigation, des capteurs sont utilisés pour mesurer et détecter différentes données en fonction des besoins, p. ex., des capteurs sont utilisés pour mesurer le niveau d'eau, des capteurs de température, des capteurs d'humidité et des capteurs de densité [257], [258]. Les données détectées et collectées par les capteurs permettent de caractériser et d'identifier l'environnement contrôlé et son état. Ces données sont très utiles pour développer et améliorer les systèmes d'irrigation. Par conséquent, le réseau de capteurs sans fil est considéré comme l'une des technologies les plus utiles dans diverses applications lorsqu'il est nécessaire de collecter et de traiter des données provenant de l'environnement, et ainsi le RCSF peut jouer un rôle vital dans la gestion de l'irrigation et obtenir plusieurs avantages en fonction de toutes les caractéristiques spécifiques de ce réseau [55]–[58], [259]. Tout cela nous amène à considérer le RCSF comme un moyen hautement prioritaire pour collecter, traiter et surveiller des informations critiques et réagir à diverses situations dans les systèmes d'irrigation.

4.5 Capteurs utilisés dans le domaine de l'irrigation

Dans le domaine de l'irrigation, l'amélioration des performances et de l'efficacité du système d'irrigation dépend de plusieurs conditions, qui sont liées à différents paramètres météorologiques et pédologiques. Pour atteindre cet objectif, divers capteurs peuvent être utilisés pour mesurer et surveiller les conditions du sol (p. ex., la salinité, l'humidité, le pH et la température) et les conditions météorologiques (p. ex., l'humidité, la température, la vitesse du vent et la pression).

De nombreux capteurs peuvent être utilisés dans le domaine de l'irrigation ; nous pouvons les classer en deux grandes catégories : les capteurs liés au sol et les capteurs liés au climat. Le Tableau 4.3 présente plusieurs capteurs utilisés dans le domaine de l'irrigation pour mesurer les paramètres météorologiques. Le Tableau 4.4 fournit également un ensemble de capteurs utilisés pour mesurer les paramètres du sol dans le domaine de l'irrigation.

En outre, de nombreux capteurs mentionnés dans la littérature pour obtenir une irrigation de précision sont présentés dans le Tableau 4.5.

Tableau 4.3 Capteurs utilisés dans l'irrigation pour les paramètres météorologiques.

Capteur	Humidité	Température	Vitesse vent	Direction vent	Radiation solaire	Pression de l'air
SHT85 [260]	√	√	—	—	—	—
DS18B20 [261]	—	√	—	—	—	—
EE181 [262]	√	√	—	—	—	—
Wind Monitor Model 05103 [263]	—	—	√	√	—	—
CM-100 Compact Weather Sensor [264]	√	√	√	√	—	√
Pyranometer LI-200X [265]	—	—	—	—	√	—
HMP35C [266]	√	√	—	—	—	—
Temperature Sensor STS3x [267]	—	√	—	—	—	—
WS500-UMB Smart Weather Sensor [268]	√	√	√	√	—	√

Pyranometer CS320 [269]	—	—	—	—	√	—
LM35 [197]	—	√	—	—	—	—
SHT75 [270]	√	√	—	—	—	—

Tableau 4.4 Capteurs utilisés dans l'irrigation pour les paramètres du sol.

Capteur	Humidité	Température	Niveau d'eau	pH	Salinité	Conductivité
EC-5 [271]	√	—	—	—	—	—
VH 400 [272]	√	—	√	—	—	—
EC 250 [273]	√	√	—	—	√	√
TDR-3A [274]	√	√	—	—	—	—
HydraProbe II Soil Sensor [275]	√	√	√	—	√	√
DS1822 [276]	—	√	—	—	—	—
Sensor S8000 pH [277]	—	—	—	√	—	—
MP406 Moisture Sensor [278]	√	√	—	—	—	—
WATERMARK Soil Moisture Sensor [279]	√	—	—	—	—	—
107-L temperature [280]	—	√	—	—	—	—
AquaTrak 5000 [281]	—	—	√	—	—	—
Pogo portable soil sensor [282]	√	√	—	—	—	√
pH 3000 [283]	—	—	—	√	—	—
CS625 [284]	√	—	—	—	—	—
109-L temperature [285]	—	√	—	—	—	—
SEN10972 pH Sensor kit [286]	—	—	—	√	—	—

Nous constatons que les capteurs contribuent de manière significative à l'amélioration des systèmes d'irrigation afin qu'ils jouent un rôle vital dans la mesure de différents paramètres agricoles. Un ensemble de paramètres pédologiques et météorologiques sont mesurés et collectés à l'aide de nœuds de capteurs dispersés dans la zone à irriguer. Ces données sont ensuite traitées et utilisées à des fins de contrôle et de supervision. D'après les Tableau 4.3 et Tableau 4.4, divers capteurs tels que le capteur DS1822 [276] utilisé pour détecter la température, le capteur VH400 [272] utilisé pour déterminer la quantité d'humidité dans le sol, le capteur EC-5 [271] pour fournir une mesure de l'humidité du sol, le capteur LMK [287] qui mesure la pression et autres, contribuent à faire progresser le domaine de l'irrigation.

Tableau 4.5 Capteurs mentionnés dans la littérature pour obtenir une irrigation de précisions.

Article	Capteur	Paramètre mesuré
Kim et Evans [228]	CS625	Humidité du sol
Kim et Evans [228]	109-L	Température du sol
Navarro-Hellín et al. [229]	ES-2	Conductivité électrique et température de l'eau
Navarro-Hellín et al. [229]	HP II	Humidité, conductivité et température
Navarro-Hellín et al. [229]	LMK	Pression
Navarro-Hellín et al. [229]	10HS	Humidité du sol
Navarro-Hellín et al. [229]	MPS-2	Potentiel métrique et température du sol
Navarro-Hellín et al. [229]	GS3	Humidité, conductivité et température
Kim et al. [231]	CS616	Teneur volumétrique en eau du sol
Kim et al. [231]	107-L temperature	Mesure de la température de l'air et du sol
Kim et al. [231]	HMP35C	Humidité relative
Kim et al. [231]	Pyranometer LI200X	Rayonnement solaire
Hedley et al. [232]	DELTA-T SM300	Humidité du sol
Hedley et al. [232]	Geonics EM38Mk2 / EM31	Valeur moyenne pondérée de l'EC apparente
Gutiérrez et al. [233]	DS1822	Température
Gutiérrez et al. [233]	VH400	Humidité du sol
Afolabi et al. [234]	YL-69	Humidité du sol
Viani et al. [236]	SHT11	Humidité et température de l'air
Viani et al. [236]	Watermark 200SS probe	Humidité du sol
Viani et al. [236]	DS18B20 probe	Température du sol

Nagarajan et Minu [242]	SEN-13322	Humidité du sol
Nagarajan et Minu [242]	SEN10972 pH Sensor kit	Valeur du pH du sol
Nagarajan et Minu [242]	LM35 IC	Température
Zhao et al. [239]	EM50	Humidité du sol
Katyara et al. [244]	TDR-3A	Humidité et température du sol
Dursun et Ozden [246]	10SH	Humidité du sol
Işik et al. [245]	DS200	Humidité du sol
Shaker et Imran [247]	DHT22	Humidité et température
Shaker et Imran [247]	EC-5	Humidité du sol
Rahim Khan et al. [251]	SHT75	Température et humidité de l'air
Chikankar et al. [252]	LM-35	Température
Chikankar et al. [252]	SY-HS-220	Humidité de l'air
Angelopoulos et al. [253]	SHT11	Température de l'air
Angelopoulos et al. [253]	EC-5	Humidité du sol
Goumopoulos et al. [288]	MF51E103E3950	Température
Goumopoulos et al. [288]	Echo EC-10	Teneur en eau volumétrique
Goumopoulos et al. [288]	SHT11	Humidité relative et temperature
Masseroni et al. [289]	DS18B20	Température
Masseroni et al. [289]	Watermark 200SS	Résistance électrique
Shaikh et al. [290]	LM35	Température
Shaikh et al. [290]	SHT71	Humidité
Kabilan et Selvi [291]	DHT11	Température
Kabilan et Selvi [291]	VH400	Humidité du sol
Savić et Radonjić [292]	DHT11	Humidité et température de l'air
Kumar et Sunehra [293]	LM35	Température
Moghaddam et al. [294]	ECH2O EC-5	Humidité du sol
Ndaro et Liqiang [295]	LM35	Température
Ndaro et Liqiang [295]	HS220	Humidité du sol
Kumari [296]	VH400	Humidité du sol

Nous constatons également que des travaux tels que Shaker et Imran [247], Rahim Khan et al. [251], Navarro-Hellín et al. [229], Viani et al. [236] et Katyara et al. [244] ont utilisé des capteurs multi-paramètres. Ces capteurs, tels que GS3 [229], SHT11 [236], TDR-3A [244] et SHT75 [251], ont l'avantage de mesurer plusieurs paramètres simultanément ce qui réduit le

nombre de nœuds utilisés dans le réseau de capteurs sans fil pour contrôler le système d'irrigation. Par exemple, SHT75 [270] pour les mesures d'humidité et de température de l'air, GS3 [297] pour les mesures d'humidité, de conductivité et de température, CM-100 Compact Weather Sensor [264] pour les mesures d'humidité, de température, de vitesse et de direction du vent et de pression atmosphérique, et TDR-3A [274] pour les mesures d'humidité et de température du sol. Toutefois, l'utilisation de ce type de capteur peut avoir un impact négatif sur le système de contrôle du système d'irrigation en cas de dysfonctionnement ou de défaillance de l'un des nœuds utilisés, étant donné que chaque nœud est responsable d'un ensemble de mesures simultanément.

La Figure 4.6 fournit une représentation visuelle de quelques exemples de capteurs utilisés dans le domaine de l'irrigation.



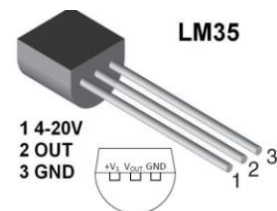
(i) WATERMARK soil moisture sensor [279]



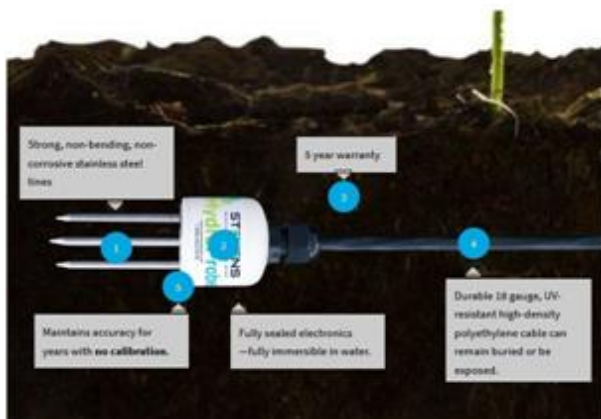
(ii) pH 3000 sensor [283]



(iv) EC-5 soil moisture sensor [271]



(v) LM35 temperature sensor [197]



(iii) HydraProbe II Soil Sensor [275]



(vi) WS500-UMB Smart Weather Sensor [268]

Figure 4.6 Quelques exemples de capteurs utilisés dans l'irrigation.

4.6 Cultures, types de sol et stratégies d'irrigation

4.6.1 Type de cultures

Nous constatons que les chercheurs ont également pris en compte différentes cultures pour étudier et tester le rôle du réseau de capteurs sans fil dans le domaine de l'irrigation. Plusieurs cultures telles que le maïs, les tomates, le riz, les légumes, les agrumes et de nombreuses autres cultures ont été mentionnées dans la littérature pour démontrer l'efficacité de l'utilisation du RCSF dans les systèmes d'irrigation. D'autres chercheurs ont également démontré l'efficacité de cette utilisation dans le domaine de l'irrigation des cultures en serre. Le Tableau 4.6 présente de nombreuses cultures mentionnées dans la littérature pour étudier et tester le rôle du réseau de capteurs sans fil dans le domaine de l'irrigation.

Tableau 4.6 Différentes cultures mentionnées dans la littérature pour obtenir une irrigation de précision.

Article	Type de culture
Kim et Evans [228]	Champ planté d'orge brassicole
Navarro-Hellín et al. [229]	Citronniers, fino et culture maraîchère
Hedley et al. [232]	Maïs
Gutiérrez et al. [233]	Serre pour sauge organique
Viani et al. [236]	Vignoble
Sawant et al. [235]	Culture d'agrumes
Zhao et al. [239]	Maïs d'été et blé d'hiver
Cambra et al. [238]	Cultures de tomates et de laitues
Katyara et al. [244]	Riz
Dursun et Ozden [246]	Cerisiers nains
Işik et al. [245]	Noix
González-Briones et al. [248]	Culture du maïs
Rahim Khan et al. [251]	Cultures en conteneur
Angelopoulos et al. [253]	Géranium, lavande et menthe
Masseroni et al. [289]	Vergers de pêchers
Saha et al. [298]	Culture de Luzerne
Erdem et al. [299]	Broccoli
Meyer et Hancke [300]	Tomate
Ndaro et Liqiang [295]	Riz, banane et tournesol
Obota et Inyama [301]	Riz
Kumari [296]	Riz

4.6.2 Type de sol utilisé

Dans le même contexte, on note que les chercheurs ont également évalué la performance et le rôle du réseau de capteurs sans fil dans le domaine de l'irrigation pour différents types de sols tels que les sables rouges, l'argile et les sables motutiles.

Le Tableau 4.7 présente les différents types de sol mentionnés dans la littérature pour étudier et évaluer le rôle du réseau de capteurs sans fil dans le domaine de l'irrigation.

Tableau 4.7 Types de sols mentionnés dans la littérature pour obtenir une irrigation de précision.

Article	Type de sol utilisé
Navarro-Hellín et al. [229]	Texture de limon argileux et sableux
Hedley et al. [232]	Sables motutiles
Afolabi et al. [234]	Sol argileux, limoneux et sableux
Viani et al. [236]	Tout
Cambra et al. [238]	Agriculture de précision hydroponique
Dursun et Ozden [246]	Tout
Işik et al. [245]	Sable rouge
Shaker et Imran [247]	Tout
Obota et Inyama [301]	Argile sableuse

4.6.3 Systèmes d'irrigation

En outre, on remarque que les chercheurs ont utilisé de nombreux systèmes d'irrigation existants tels que l'irrigation de surface, l'irrigation par aspersion et l'irrigation goutte à goutte pour les adapter à un système d'irrigation de précision. Le Tableau 4.8 présente les stratégies d'irrigation les plus évoquées dans la littérature pour étudier et évaluer le rôle des réseaux de capteurs sans fil dans le domaine de l'irrigation.

D'après le Tableau 4.8, nous trouvons que les techniques d'irrigation les plus utilisées par les chercheurs sont l'irrigation par aspersion et l'irrigation goutte à goutte. L'irrigation par aspersion est plus gourmande en eau que l'irrigation goutte à goutte, alors que l'irrigation goutte à goutte peut être automatisée, ce qui permet d'économiser de grandes quantités d'eau et de réduire l'érosion des sols. De ces deux systèmes d'irrigation, l'irrigation goutte à goutte est sans doute la technique la plus efficace et la plus adaptable pour rendre le système d'irrigation précis s'il est géré correctement et avec soin.

Tableau 4.8 Stratégies d'irrigation mentionnées dans la littérature pour obtenir une irrigation de précision.

Article	Système d'irrigation
Kim et Evans [228]	Irrigation par aspersion
Kim et al. [231]	Irrigation par aspersion
Hedley et al. [232]	Irrigation par aspersion (irrigateur à pivot central)
Gutiérrez et al. [233]	Drip hole spacing
Sawant et al. [235]	Irrigation goutte à goutte
Cambra et al. [238]	Agriculture de précision hydroponique
Nagarajan et Minu [242]	Irrigation par aspersion
Dursun et Ozden [246]	Irrigation goutte à goutte
Işik et al. [245]	Irrigation goutte à goutte
Shaker et Imran [247]	Irrigation par tuyaux
González-Briones et al. [248]	Irrigation par pivot
Rahim Khan et al. [251]	Tout
Chikankar et al. [252]	Irrigation goutte à goutte
Angelopoulos et al. [253]	Irrigation domestique
Meyer et Hancke [300]	Irrigation par aspersion
Obota et Inyama [301]	Irrigation par tuyaux
Kumari [296]	Irrigation par aspersion

4.6.4 Synthèse

Chaque type de sol nécessite une technique d'irrigation différente. Par exemple, l'irrigation goutte à goutte est plus adaptée aux sols ayant une bonne conductivité de l'eau, tandis que l'irrigation par aspersion est meilleure pour les sols sableux ayant un taux d'infiltration assez élevé. En outre, la technique d'irrigation utilisée varie d'une culture à l'autre. Par exemple, l'irrigation par aspersion est très adaptée aux cultures arboricoles et aux cultures plein champs, tandis que l'irrigation goutte à goutte convient très bien aux vignes et aux cultures en ligne, c.-à-d., fruits et légumes. D'autre part, le type de culture dépend du type de sol utilisé, car il existe des cultures adaptées à un type de sol particulier et d'autres qui ne le sont pas. Par exemple, un sol sableux convient particulièrement aux plantes dites de terre de bruyère, tandis qu'un sol limoneux convient à de nombreuses plantes, à l'exception des plantes de terre de bruyère.

Par conséquent, pour concevoir un système idéal pour l'irrigation de précision, il faut tenir compte d'un ensemble d'exigences et de besoins différents. Ces exigences et besoins sont déterminés par trois facteurs principaux, comme discuté ci-dessus, qui sont : le système d'irrigation approprié, le type de sol utilisé et le type de culture (voir Figure 4.7).

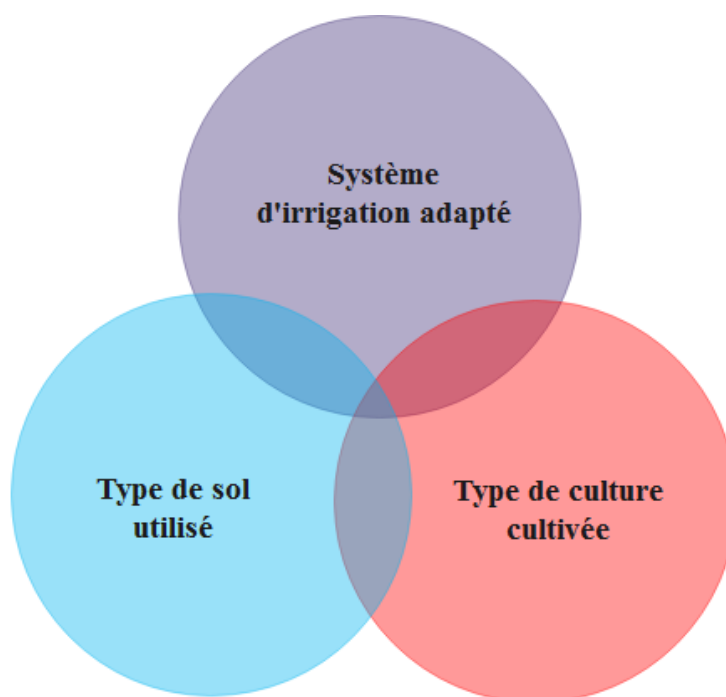


Figure 4.7 Trois facteurs principaux pour un système d'irrigation de précision idéal.

Sur la base des nombreux articles examinés dans ce contexte, nous constatons que plusieurs chercheurs comme à [230], [241], [255] ont proposé un système complet d'irrigation de précision sans définir les trois principaux facteurs mentionnés ci-dessus afin que le système proposé puisse fonctionner dans des conditions différentes. Toutefois, lors de la mise en œuvre de l'un de ces systèmes, ces trois facteurs principaux doivent être pris en compte. D'autres chercheurs ont proposé un système complet pour l'irrigation de précision sans imposer ces trois principaux facteurs, bien que le système proposé ne fonctionne pas dans diverses conditions. En revanche, d'autres chercheurs comme Hedley et al. [232] et Dursun et Ozden [246] ont proposé un système complet d'irrigation de précision avec la définition de ces trois facteurs principaux.

Au contraire, d'autres travaux ont, par exemple, pris en compte le système d'irrigation utilisé sans tenir compte du type de sol utilisé ou du type de culture cultivée comme à [242], ou vice versa comme à [229]. Alors que d'autres travaux ont pris en compte un seul des trois facteurs sans prendre en compte les autres. Cela est pratiquement inacceptable, c.-à-d., lors de l'application du système proposé, car le système d'irrigation approprié dépend du type de sol

utilisé et du type de culture cultivée, et le type de culture cultivée dépend également du type de sol utilisé.

4.7 Technologies de communication sans fil

4.7.1 Technologie de communication sans fil

Récemment, l'émergence des technologies de communication sans fil suggère la possibilité de réduire ou d'éliminer le câblage, offrant ainsi une communication différente. Plusieurs technologies de communication sans fil sont incluses dans les réseaux de capteurs sans fil pour développer et améliorer les mécanismes de détection, de collecte et de surveillance des données pour l'agriculture de précision, y compris l'irrigation. Plusieurs technologies de communication sans fil sont utilisées dans le réseau de capteurs sans fil pour communiquer efficacement des données afin d'améliorer les systèmes d'irrigation. Il existe de nombreuses technologies ; Wi-Fi, ZigBee et Bluetooth sont les plus couramment utilisés.

4.7.1.1 ZigBee

ZigBee [302], [303] est une technologie de communication sans fil introduite par l'Alliance ZigBee [304], [305]. Elle est basée sur la norme IEEE 802.15.4 [306], qui spécifie le nombre de protocoles de communication utilisés dans la conception et l'établissement d'un réseau local sans fil personnel avec des signaux radio de faible puissance et un faible débit de données [307]. ZigBee a été spécifié comme étant peu coûteux, plus simple, plus facile à utiliser et à installer, consomme moins d'énergie que les autres et utilise des bandes radio sans licence et à faible débit.

ZigBee utilise une faible consommation d'énergie qui limite les distances de transmission de 10 à 100 mètres en fonction de la puissance de sortie et des conditions environnementales. Il prend en charge des dispositifs simples ; ces dispositifs peuvent transférer des données sur de longs espaces pour atteindre les plus éloignés en passant par un réseau maillé de dispositifs intermédiaires. Zigbee est généralement utilisé dans les applications à faible débit de données, c.-à-d., Zigbee décrit les spécifications pour le réseau WPAN à faible débit (LR-WPAN) [307], [308], qui nécessitent une mise en réseau sécurisée et une longue durée de vie des piles. Le réseau Zigbee est sécurisé par des clés de cryptage symétriques de 128 bits. Il fonctionne à des fréquences de 915 MHz, 868 MHz et 2,4 GHz et son débit de données est de 250 kbps, ce qui convient le mieux aux transmissions de données périodiques et intermédiaires à partir d'un

dispositif d'entrée ou d'un capteur. ZigBee offre un ensemble de caractéristiques, notamment une organisation autonome, une haute sécurité, un réseau maillé à sauts multiples et un faible coût avec une longue durée de vie de la batterie [309], [310].

4.7.1.2 Wi-Fi (Wireless Fidelity)

Wi-Fi [311], [312] est une technologie du réseau local sans fil introduite par l'Alliance Wi-Fi [313], qui est basée sur les normes 802.11 (c.-à-d., IEEE 802.11, 802.11 a/b/g/n) [314]. Il permet un échange d'informations sans fil ou une connexion sans fil à l'internet sur la base de ces normes IEEE 802.11.

Le Wi-Fi utilise les ondes radio pour offrir une connectivité de réseau, et la connexion est établie par un adaptateur sans fil pour générer des zones de points d'accès (hotspots) où l'accès Wi-Fi est disponible. À l'heure actuelle, cette technologie est la plus utilisée dans les appareils de communication sans fil. La portée de communication du Wi-Fi est d'environ 20 mètres à l'intérieur et jusqu'à 100 mètres à l'extérieur. Il peut fonctionner dans les bandes de fréquences 2,4 GHz UHF et 5 GHz SHF ISM (Industrial, Scientific, and Medical) pour s'adapter à la quantité de données envoyées par l'utilisateur sur le réseau. Les principaux avantages de la technologie Wi-Fi comprennent la mobilité, la facilité d'intégration, la rapidité des taux de transfert de données, l'efficacité et l'évolutivité [315].

4.7.1.3 Bluetooth

Bluetooth [316], [317] est une technologie de communication sans fil fondée sur une spécification de fréquence radio pour les appareils de communication à courte portée et peu coûteux afin de remplacer les câbles et de permettre aux appareils de communiquer sans fil entre eux. Cette technologie sans fil est basée sur la norme IEEE 802.15.1 [318], [319] et permet des connexions de proximité entre plusieurs appareils électroniques à courte portée tels que les tablettes et les téléphones portables. La technologie sans fil Bluetooth fonctionne à 2,4 GHz ISM, ce qui permet la transmission et l'échange de données sur de courtes distances avec très peu d'appareils.

Bluetooth sépare les données envoyées en paquets et transfère chaque paquet sur l'un des 79 canaux Bluetooth choisis, 1 MHz étant la largeur de bande de chaque canal. Bluetooth est un protocole basé sur des paquets avec une architecture maître-esclave. Un appareil maître peut communiquer avec jusqu'à 7 esclaves dans un piconet, tous les appareils partagent l'horloge du maître. L'échange de paquets est basé sur l'horloge de base, que le maître a définie par ticks à intervalles de 312,5 μ s. À un moment donné, des données peuvent être transmises entre le

maître et un autre appareil. Grâce à des algorithmes de round-robin, le maître passe rapidement d'un appareil à l'autre pour sélectionner l'appareil esclave à adresser. Les objectifs de la technologie Bluetooth comprennent un faible coût, une courte portée, une solution robuste, une faible consommation d'énergie, une faible complexité et un fonctionnement à l'échelle mondiale [320], [321].

4.7.1.4 GPRS (General Packet Radio Service)

GPRS [322], [323] est un service de communication sans fil qui fonctionne sur le réseau mobile (c.-à-d., le réseau de communication cellulaire 2G, 3G et 4G) à l'aide de transmissions IP. Il est utilisé pour transmettre des paquets de données sur les réseaux cellulaires (les téléphones cellulaires basés sur le GSM) et pour offrir des services Internet sur le mobile. La technologie sans fil GPRS fait partie intégrante du sous-système de commutation du réseau GSM. Elle fonctionne dans la bande de fréquences 2,4 GHz et sa portée est étendue jusqu'à quelques kilomètres.

4.7.2 Comparaison des technologies de communication sans fil

Dans le Tableau 4.9, nous comparons les technologies de communication sans fil les plus couramment utilisées dans le réseau de capteurs sans fil (énumérés ci-dessus), par rapport à différents paramètres, notamment la consommation d'énergie, la portée de communication, le débit de données, le coût et d'autres paramètres.

D'après la discussion ci-dessus et les résultats de la comparaison présentés dans le Tableau 4.9 et la Figure 4.8, le ZigBee a été conçu pour fonctionner avec une portée de communication appropriée et une faible consommation d'énergie. Il est conçu pour les appareils fonctionnant sur batterie. Cette technologie permet d'économiser de l'énergie grâce à des cycles de fonctionnement à faible charge et passe en mode veille pour prolonger la durée de vie de la batterie. Les technologies Wi-Fi, Bluetooth et GPRS ont une consommation d'énergie plus élevée que ZigBee. Bien que ZigBee ait une portée de communication plus courte que GPRS, cette portée peut être étendue avec un nœud de routeur pour surmonter les limites de déploiement des nœuds dans les applications agricoles. ZigBee a également une plus grande élasticité de réseau que Bluetooth, permettant ainsi différentes topologies. Étant donné le grand nombre de nœuds, c.-à-d., plus de 65 000, dans le réseau ZigBee, la technologie ZigBee peut être utilisée pour couvrir une large zone agricole. En conséquence, le protocole sans fil ZigBee a été adopté dans de nombreuses études agricoles [56], [324].

Tableau 4.9 Comparaison des technologies de communication sans fil.

Paramètres	Wi-Fi	Zigbee	GPRS	Bluetooth
Norme IEEE	802.11a/b/g/n	802.15.4	----	802.15.1
Application focus	Réseau de données, Internet, surveillance	Suivi, contrôle	Contrôle, Internet, surveillance	Remplacement câble
Consommation d'énergie [56], [325]–[328]	Haut	Faible	Moyen	Moyen
	835 mW	36.9 Mw	560 mW	10 mW
Portée de communication [329], [330]	100 m	100 m	1–10 km	10 m
Débit de données	11–54 et 150 Mbps	20 - 250 kbps	50–100 kbps/200 kbps/0.1–1 Gbps	1 Mbps
Bande de fréquences	2.4 GHz ; 5 GHz	868/915 MHz ; 2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz
Coût	Haut	Faible	Moyen	Faible
Nombre max de nœuds de cellule	2007	> 65000	----	8
Latence [331], [332]	50 ms	20–30 ms	<1 s	6 ms
Durée de vie des piles (jours)	0.5 – 5	100 - 1000+	----	1 – 7
Mesure de la réussite	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Vitesse, ◦ Flexibilité 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Faible puissance, ◦ Faible coût, ◦ Évolutivité, Fiabilité 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Convenience, ◦ Coût, portée 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Faible coût, ◦ Convenience

Sur la base des données présentées dans le Tableau 4.9, une comparaison de la distance de communication et de la consommation d'énergie des technologies de communication sans fil mentionnées ci-dessus est présentée à la Figure 4.8.

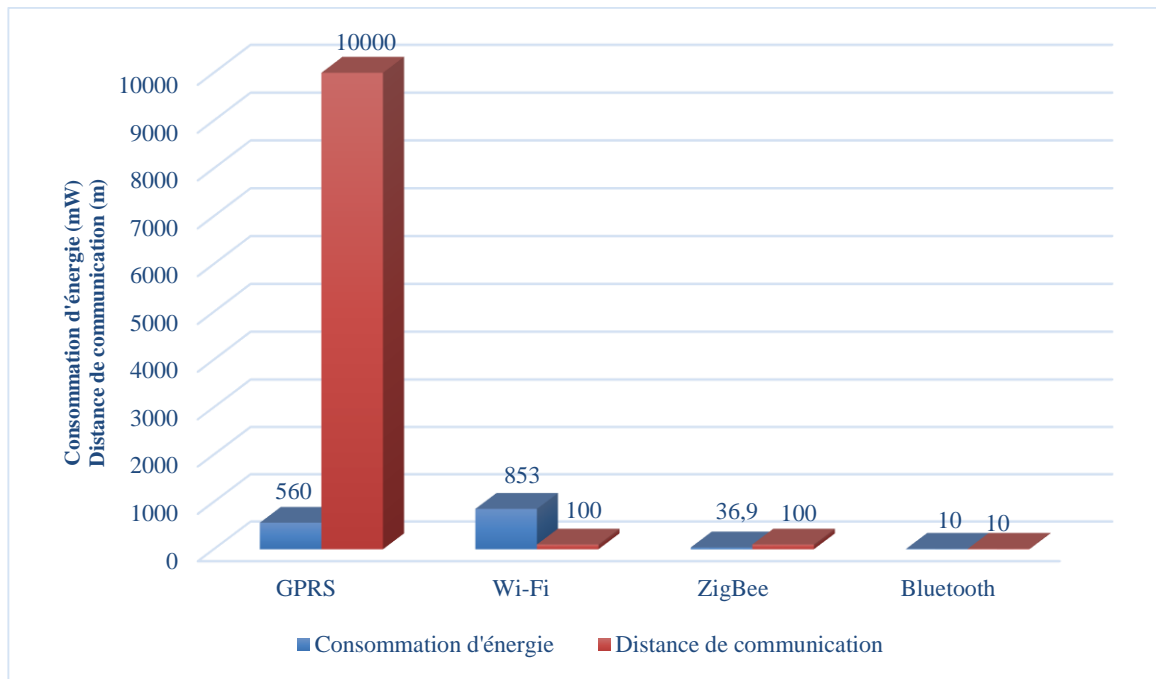


Figure 4.8 Comparaison des technologies sans fil en termes de distance de communication et de consommation d'énergie.

4.7.3 Technologies de communication utilisées dans le domaine de l'irrigation

Pour une communication et une transmission de données réussies dans le domaine de l'irrigation, de nombreuses technologies de communication sans fil font partie du réseau de capteurs sans fil. Le Tableau 4.10 présente les différents types de ces technologies mentionnées dans la littérature pour réaliser une irrigation de précision. Nous remarquons que les technologies de communication adoptées dans les réseaux de capteurs sans fil pour améliorer les systèmes d'irrigation sont Wi-Fi, GPRS, ZigBee et Bluetooth. Alors que la technologie ZigBee est plus largement utilisée par les chercheurs.

En examinant les Tableau 4.9 et Tableau 4.10 ainsi que dans [333]–[335], on peut constater que la technologie ZigBee est largement utilisée par les chercheurs. La technologie Zigbee est plus efficace dans les applications nécessitant une faible consommation d'énergie et un faible débit de données, et donc plus appropriée pour une utilisation dans les RCSF. Par conséquent, étant donné les exigences des systèmes d'irrigation, on peut conclure que ZigBee est le meilleur choix dans le domaine de l'irrigation. ZigBee a été identifié comme le protocole sans fil le plus approprié pour les systèmes d'irrigation en raison de sa faible consommation

d'énergie, de sa portée de communication, de sa petite taille, de sa facilité de mise en œuvre du réseau, de sa simplicité, de sa faible latence, de son évolutivité et de la taille du réseau.

Tableau 4.10 Technologies de communication mentionnées dans la littérature pour obtenir une irrigation de précision.

Article	Technologie de communication utilisée
Kim et Evans [228]	Bluetooth
Avatade et Dhanure [246]	Zigbee et GPRS/GSM
Navarro-Hellín et al. [229]	Zigbee
Nikolidakis et al. [230]	Zigbee
Kim et al. [231]	Bluetooth
Gutiérrez et al. [233]	Zigbee et GPRS/GSM
Sawant et al. [235]	Wi-Fi
Nagarajan et Minu [242]	ZigBee
Işik et al. [245]	Wi-Fi
Shaker et Imran [247]	Zigbee
Chikankar et al. [252]	Zigbee
Angelopoulos et al. [253]	ZigBee
Coates et al. [336]	ZigBee
Goumopoulos et al. [288]	ZigBee
Zhou et al. [243]	ZigBee
Kabilan et Selvi [291]	Wi-Fi
Savić et Radonjić [292]	ZigBee
Moghaddam et al. [294]	ZigBee
Meyer et Hancke [300]	ZigBee
Ndaro et Liqiang [295]	ZigBee / GSM

4.8 Synthèse

Le réseau de capteurs sans fil est l'une des meilleures options pour la surveillance et le contrôle précis de l'environnement. L'évolution rapide des technologies de communication et des capteurs au cours des dernières décennies a entraîné un changement majeur dans le RCSF, permettant à la technologie des réseaux de capteurs sans fil d'être appliquée avec succès dans le domaine de l'irrigation.

De nombreux avantages permettent aux RCSF de contribuer et de fournir des solutions efficaces et économiques pour soutenir, améliorer et renforcer les systèmes d'irrigation. Parmi ces avantages (comme mentionné au chapitre 3) figurent la topologie dynamique du réseau, le grand nombre de nœuds de capteurs déployés, l'auto-organisation et l'hétérogénéité des nœuds déployés, la collaboration entre les nœuds pour atteindre un objectif précis et l'adaptabilité à différents environnements [72], [73].

Après un examen exhaustif de tous les articles évalués dans cette étude, nous pouvons conclure que la majorité des travaux et des recherches conduits dans ce contexte sont axés sur l'amélioration de l'efficacité et de la performance de l'irrigation pour assurer une utilisation efficace et rationnelle de l'eau pour les systèmes d'irrigation. Ainsi, les réseaux de capteurs sans fil peuvent être utilisés dans différents scénarios pour contrôler et gérer intelligemment les systèmes d'irrigation. Dans ce contexte, certains chercheurs ont utilisé les RCSF pour optimiser l'utilisation de l'eau dans l'irrigation. D'autres chercheurs ont tenté de surveiller et contrôler les conditions du sol et de l'air en utilisant le RCSF pour gérer correctement les systèmes d'irrigation. Et d'autres ont cherché à automatiser le processus d'irrigation à l'aide du RCSF et d'autres technologies. Certains travaux ont mis au point des systèmes basés sur des seuils dynamiques, tandis que d'autres s'appuient sur l'utilisation de modèles de programmation linéaire afin d'optimiser les ressources en eau pour l'irrigation. D'autre part, de nombreux auteurs ont également utilisé le RCSF soit pour développer un système d'aide à la décision, soit un logiciel de détection et de contrôle en temps réel, soit un système d'approvisionnement automatique en eau, soit un système permettant de déterminer les critères de placement des capteurs, et autres ; tout cela pour une gestion efficace des systèmes d'irrigation.

Le Tableau 4.11 résume les divers travaux et recherches liés à l'utilisation et à l'application de la technologie RCSF dans le domaine de l'irrigation pour parvenir à une agriculture de précision.

Tableau 4.11 Synthèse d'une enquête sur les différentes applications du RCSF dans le domaine de l'irrigation.

Auteur	Description	Outils / technologies	Spécificités	Types de capteurs	Attributs	Culture / Labo
Avatade et Dhanure [227]	Développer un système d'irrigation automatisé basé sur une plate-forme intégrée utilisant un réseau de capteurs sans fil, un microcontrôleur ARM et la technologie GPRS	Communication sans fil ZigBee. GPRS/GSM. Microcontrôleur ARM. Page web.	<ul style="list-style-type: none"> ◦ La technologie de communication sans fil ZigBee est utilisée pour la transmission de données. ◦ Le GPRS/GSM est utilisé pour assurer la transmission des données vers une page web où l'état de tous les capteurs est affiché graphiquement. ◦ Le microcontrôleur ARM est utilisé pour programmer certaines valeurs de seuil d'humidité et de température du sol. 	Capteur d'humidité du sol. Capteur de température. Capteur de niveau d'eau.	Ensemble de capteurs qui surveillent la température, le niveau d'eau et l'humidité du sol.	Laboratoire
Kim et Evans [228]	Développer et intégrer un logiciel d'aide à la décision avec un RCSF pour le contrôle et la surveillance de la technique d'irrigation par aspersion.	Communication sans fil Bluetooth. Transmetteur Bluetooth SD202. Récepteur Bluetooth MSP-101a. Enregistreur de données CR200. Le logiciel WISC. Pile YUASA NP7-12. Panneau solaire SX5.	<ul style="list-style-type: none"> ◦ La technologie de communication sans fil Bluetooth est utilisée pour envoyer et recevoir des données. ◦ Les données sont transmises sans fil via un émetteur radio Bluetooth SD202 et sont reçues par le récepteur Bluetooth MSP-102a. ◦ L'enregistreur de données CR200 est utilisé pour enregistrer les données. ◦ Le logiciel WISC est composé de quatre modèles principaux, dont un panneau de commande pour l'interface matérielle, le séquençage des buses, la surveillance et le contrôle de l'irrigation, et la surveillance graphique pour le RCSF sur le terrain. 	Capteur d'humidité du sol CS625. Capteur de température du sol 109-L.	<ul style="list-style-type: none"> ◦ CS625 permet de mesurer l'humidité du sol. ◦ 109-L est utilisé pour la température du sol. 	Un champ planté d'orge brassicole (Cinq zones de sol différentes)
Nikolidakis et al. [230]	Développer un système de contrôle automatisé de l'irrigation à faible consommation d'énergie basé sur RCSF pour contrôler et gérer efficacement l'irrigation	Communication sans fil ZigBee. ECHERP. Système automatisé.	<ul style="list-style-type: none"> ◦ La technologie de communication sans fil ZigBee est utilisée pour transmettre des données. ◦ ECHERP est un nouveau protocole de routage avancé, qui atteint une efficacité énergétique élevée. 	Nombreux capteurs	Un ensemble de capteurs qui surveillent l'humidité et la température du sol, l'humidité, la température et la vitesse de l'air, et la durée d'ensoleillement	Laboratoire (Simulation)

Goumopoulos et al. [288]	Concevoir un système d'irrigation automatique par zone avec un réseau de capteurs sans fil	Tyndall25. Microcontrôleur Tmega128 18 bits. Chipcon CC2420. ZigBee. Puce RF. TinyOS. Protocole de communication IEEE 802.15.4.	<ul style="list-style-type: none"> ◦ La technologie de communication sans fil ZigBee est utilisée pour transmettre des données. ◦ Le système d'exploitation TinyOS. 	Capteur d'humidité du sol Echo EC-10. Capteur SHT11. Capteur MF51E103E3 950.	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Echo EC-10 aide à mesurer la teneur en eau volumétrique. ◦ SHT11 pour la mesure de l'humidité relative et de la température. ◦ MF51E103E39 50 capteur pour la mesure de la température de l'air des feuilles. 	Maison verte
Navarro-Hellín et al. [229]	Concevoir une architecture de capteurs sans fil pour une gestion efficace de l'eau d'irrigation, cette architecture est basée sur l'utilisation des technologies RCSF et GPRS	Communication sans fil ZigBee. SIM900 GSM/GPRS. Interface SDI-12. Serveur à distance. Application web. GPRS. Base de données relationnelle.	<ul style="list-style-type: none"> ◦ La technologie de communication sans fil ZigBee est utilisée pour la transmission de données. ◦ Le module de communication est basé sur la puce SIM900 GSM/GPRS. ◦ L'interface SDI-12 est l'une des interfaces les plus importantes et standardisées dans le domaine de l'agriculture de précision. ◦ Le serveur distant permet à l'utilisateur d'accéder aux fichiers ◦ L'application Web a été développée en utilisant PHP, JavaScript et HTML5, elle assure la vérification des informations provenant des capteurs. ◦ La base de données relationnelle assure le stockage des données. 	Capteur ES-2. Capteur HP II. Capteur LMK. Capteur 10HS. Capteur MPS-2. Capteur GS3.	<ul style="list-style-type: none"> ◦ ES-2 est utilisé pour surveiller la conductivité électrique et la température de l'eau. ◦ HP II permet de mesurer l'humidité, la conductivité et la température. ◦ LMK est utilisé pour mesurer la pression. ◦ 10HS fournit des mesures de l'humidité du sol. ◦ MPS-2 permet de mesurer le potentiel métrique et la température du sol. ◦ GS3 permet de mesurer l'humidité, la conductivité et la température. 	Quatre sites expérimentaux : culture ligneuse (citronniers Fino), culture maraîchère, culture en serre sans sol et réservoir d'eau
Masseroni et al. [289]	Concevoir un dispositif matériel pour le potentiel hydrique du sol : Surveillance et gestion de l'irrigation	Arduino. PHP MySQL. Panneau solaire.	<ul style="list-style-type: none"> ◦ MySQL est utilisé pour créer une base de données où les données sont stockées et facilement accessibles. ◦ Arduino est une carte matérielle utilisée pour fournir une plate-forme au capteur. 	Capteur DS18B20. Capteur Watermark 200SS.	<ul style="list-style-type: none"> ◦ DS18B20 est utilisé pour mesurer la température. ◦ Watermark 200SS est un capteur à matrice granulaire avec des électrodes mesurant la résistance électrique. 	Vergers de pêcheurs

Coates et al. [336]	Concevoir un réseau de capteurs sans fil avec contrôle des vannes d'irrigation	Actionneur de vanne. Communication sans fil ZigBee.	<ul style="list-style-type: none"> ◦ ZigBee est utilisé pour la transmission de données. ◦ L'actionneur de vanne est un mécanisme d'ouverture et de fermeture des vannes qui irriguent l'eau 	Capteurs d'humidité du sol	◦ Capteur d'humidité du sol aide à mesurer l'humidité du sol et la teneur en eau.	Champ agricole
Kim et al. [231]	Développer un système de surveillance à distance et de contrôle du système d'irrigation basé sur un réseau distribué de capteurs sans fil, les technologies Bluetooth et GPS	Communication sans fil Bluetooth. Technologie GPS. Le logiciel WISC. La station de contrôle de l'irrigation. La station météorologique. Station de détection sur le terrain.	<ul style="list-style-type: none"> ◦ La technologie de communication sans fil Bluetooth est utilisée pour envoyer et recevoir des données. ◦ Le système de positionnement global est utilisé pour déterminer l'emplacement géographique des arroseurs. ◦ Le logiciel WISC assure le contrôle et la surveillance à distance en temps réel du système d'irrigation à débit variable. ◦ La station de contrôle de l'irrigation met à jour et transmet les emplacements géo-référencés des machines à partir d'un GPS différentiel à la station de base. ◦ La station météorologique est utilisée pour surveiller les conditions météorologiques (rayonnement solaire, vitesse du vent). ◦ La station de détection sur le terrain surveille les conditions sur le terrain (température et humidité du sol). 	Réflectomètres de la teneur en eau CS616. Sonde de température 107. Une sonde d'humidité HMP35C. Pyranomètre LI200X.	<ul style="list-style-type: none"> ◦ CS616 permet de mesurer la teneur volumétrique en eau du sol. ◦ 107 est utilisée pour la mesure de la température de l'air et du sol. ◦ HMP35C est utilisée pour mesurer l'humidité relative. ◦ LI200X permet de mesurer le rayonnement solaire. 	Un petit champ au Centre de recherche agricole de l'Est, Montana
Shaker et Imran [247]	Développer un système de surveillance des paramètres climatiques et de contrôle de l'eau d'irrigation basé sur le réseau de capteurs sans fil afin d'optimiser le processus de production dans la serre	Microcontrôleur Amega382P. Module XBee. Communication sans fil ZigBee. Écran LCD.	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Amega382P traite les données du sous-système de communication ou du sous-système de capteurs. ◦ XBee pour le module émetteur-récepteur. ◦ Écran LCD qui affiche les valeurs moyennes mesurées. 	DHT22. EC-5.	<ul style="list-style-type: none"> ◦ DS200 est utilisé pour mesurer l'humidité et la température. ◦ EC-5 pour la mesure de l'humidité du sol. 	Serre

Hedley et al. [232]	Développer une modélisation spatio-temporelle basée sur des levés électromagnétiques à haute résolution temporelle et spatiale pour prédire et modéliser la profondeur de la nappe phréatique et l'état de l'eau du sol pour une planification d'irrigation de précision	Méthode de programmation de l'irrigation à débit variable en temps réel. Relevés électromagnétiques. Modélisation de la profondeur de la nappe phréatique et de l'humidité du sol. Modèle Random Forest (RF).	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Les levés électromagnétiques sont utilisés pour quantifier la variabilité du sol. ◦ Le modèle RF est utilisé pour mieux prévoir la profondeur de la nappe phréatique et l'humidité du sol, en interrogeant les données par le biais d'arbres de classification avec régression ultérieure. 	DELTA-T SM300. EM31. Geonics EM38Mk2.	<ul style="list-style-type: none"> ◦ DELTA-T SM300 est un capteur utilisé pour mesurer l'humidité du sol. ◦ Capteurs Geonics EM38Mk2 et EM31 sont utilisés pour mesurer une valeur moyenne pondérée de la conductivité électrique apparente (EC) à 5,0 m de profondeur (EM31) et à 1,5 m de profondeur (EM38). 	Champ de maïs
Gutiérrez et al. [233]	Développer un système d'irrigation automatisé basé sur l'utilisation d'un réseau de capteurs sans fil et d'un module GPRS pour optimiser l'utilisation de l'eau pour les cultures agricoles	Communication sans fil ZigBee. GPRS/GSM. Application web. Déclencheurs d'actionneurs.	<ul style="list-style-type: none"> ◦ La technologie de communication sans fil ZigBee est utilisée pour la communication entre les nœuds de capteurs et le récepteur de données. ◦ Le GPRS/GSM est utilisé pour assurer la transmission de données à un serveur web. ◦ L'application web assure la programmation et la surveillance en temps réel de l'irrigation en fonction des données de température et d'humidité du sol. 	Capteur de température DS1822. Capteur d'humidité du sol VH400.	<ul style="list-style-type: none"> ◦ DS1822 permet de mesurer la température. ◦ VH400 est utilisé pour mesurer la quantité d'humidité dans le sol. 	Serre pour sauge organique
Viani et al. [236]	Développer une aide à la décision à faible coût et une surveillance sans fil pour gérer efficacement le système d'irrigation et économiser l'eau dans l'agriculture	Logique floue (Fuzzy logic (FL)) et règles floues. Système d'aide à la décision (DSS). Réseau de capteurs et d'actionneurs sans fil (WSAN). Nœud d'actionnement sans fil. Nœud d'ancrage sans fil. Nœud de capteur sans fil.	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Une méthodologie innovante d'aide à la décision utilisant la FL facilite l'aide à la décision. ◦ Le WSAN se compose d'un ensemble de nœuds de capteurs et est utilisé pour mesurer les conditions environnementales ainsi que pour surveiller et gérer le système d'irrigation. 	Sensirion SHT11. Sonde Watermark 200SS. Sonde DS18B20.	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Sensirion SHT11 est utilisé pour mesurer l'humidité et la température de l'air. ◦ Sonde Watermark 200SS fournit des mesures de l'humidité du sol. ◦ Sonde DS18B20 pour la mesure de l'acquisition de la température du sol. 	Vignoble irrigué

Sawant et al. [235]	Développer une plateforme d'observation et d'analyse météorologique interopérable pour l'agriculture de précision	SenseTube. Interface périphérique série (SPI). Système sur puce à faible consommation d'énergie (SoC). Communication sans fil Wi-Fi. Normes d'Open Geospatial Consortium (OGC).	<ul style="list-style-type: none"> ◦ SenseTube est un système de détection sans fil interopérable. ◦ SPI est utilisé pour collecter des données. ◦ SoC est utilisé comme plateforme de collecte et de diffusion de données. ◦ Le protocole de communication Wi-Fi (IEEE 108.11) est utilisé pour la communication sans fil. ◦ Normes OGC pour la mise en place de capteurs sur le web. 	Capteur d'humidité. Capteur de température.	Capteurs sont utilisés pour mesurer l'humidité et la température.	Culture d'agrumes
Nagarajan et Minu [242]	Développer un système automatisé de surveillance des propriétés du sol en utilisant le RCSF pour automatiser le système d'irrigation par aspersion	Contrôleur d'actionneur de réseau de capteurs sans fil (WSN-AC). ZigBee. Système GPRS. Panneaux solaires. Microcontrôleur PIC 16F877.	<ul style="list-style-type: none"> ◦ L'ensemble du système est alimenté par des panneaux solaires. ◦ La technologie de communication sans fil ZigBee est utilisée pour la transmission des données. ◦ Le système GPRS est utilisé pour le stockage et l'analyse des données. 	Sonde d'humidité du sol SEN-13322. Capteur de pH (SEN10972 pH Sensor kit). Capteur de température LM35 IC.	<ul style="list-style-type: none"> ◦ SEN-13322 utilisé pour mesurer la teneur volumétrique de l'eau dans le sol. ◦ Capteur de pH fournit des mesures de la valeur du pH du sol. ◦ LM35 IC est utilisé pour la détection de la température. 	Champ agricole
Zhao et al. [239]	Développer une application d'un réseau de capteurs sans fil pour automatiser le système d'irrigation goutte à goutte à l'aide de capteurs d'humidité du sol	Irrigation à taux uniforme (URI). Irrigation à débit variable (VRI). Système TDR trime-tube.	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Le modèle de stabilité temporelle de la teneur en eau du sol comparé entre les traitements URI et VRI pour déterminer les critères de placement des capteurs d'humidité du sol. ◦ Le TDR trime-tube est un humidimètre utilisé pour mesurer l'humidité du sol. 	Capteurs Decagon d'humidité du sol EM50	◦ EM50 est utilisé pour mesurer l'humidité du sol.	Maïs d'été et blé d'hiver
Katyara et al. [244]	Mettre en place un réseau de capteurs sans fil sous la forme d'une RTU pour la surveillance à distance et le contrôle intelligent du système d'irrigation au Pakistan à l'aide d'applications SCADA	CC2530 IC system-on-chip. Centre de surveillance SCADA. CN3063 IC.	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Les nœuds du RCSF sont constitués de CC2530 IC. ◦ Le module CN3063 IC collecte et gère l'énergie solaire. ◦ Le panneau de contrôle SCADA est étendu pour couvrir tous les nœuds de capteurs et de coordination. 	Capteur d'humidité du sol TDR-3A	◦ TDR-3A est utilisé pour mesurer l'humidité et la température du sol.	Canal du riz

Dursun et Ozden [246]	Développer une application d'un réseau de capteurs sans fil pour automatiser le système d'irrigation goutte à goutte à l'aide de capteurs d'humidité du sol	Modèle UFM-M11. Panneau d'alimentation. MCU.	<ul style="list-style-type: none"> ◦ UFM-M11 est un module sans fil. ◦ MCU est une puce de microcontrôleur à faible puissance. 	10SH	◦ 10SH est utilisé pour mesurer l'humidité du sol.	Cerisiers nains
Işik et al. [245]	Développer un système d'irrigation de précision utilisant un réseau de capteurs intégré à l'application IOS / Android	Communication sans fil Wi-Fi. IOS/Android. Filtre. Panneau solaire. Logiciel.	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Protocole de communication Wi-Fi (IEEE 108.11) est utilisé pour la communication sans fil. ◦ Filtre est utilisé pour éliminer les goulots d'étranglement qui peuvent se produire dans la conduite. ◦ Panneau solaire pour répondre aux besoins du système énergétique. 	DS200	◦ DS200 est utilisé pour mesurer l'humidité du sol.	Walnut land
Chikankar et al. [252]	Développer un système d'irrigation automatique basé sur le contrôle d'un ensemble de paramètres (p. ex., l'humidité de l'air, l'humidité du sol et la température) en utilisant RCSF et ZigBee	Communication sans fil ZigBee. Microcontrôleur PIC 18F458. Affichage LCD.	<ul style="list-style-type: none"> ◦ La technologie de communication sans fil ZigBee est utilisée pour la transmission de données. ◦ L'écran LCD affiche les valeurs moyennes mesurées. 	LM-35. SY-HS-220. Capteur d'humidité du sol.	<ul style="list-style-type: none"> ◦ LM-35 est utilisé pour mesurer la température. ◦ SY-HS-220 est utilisé pour mesurer l'humidité de l'air. 	Champ agricole
Chavez et al. [337]	Développer un système de surveillance et de contrôle de l'irrigation à distance	Un transducteur de pression. Electrovanne. Pont Ethernet sans fil. SBC. Tableau des relais.	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Une électrovanne est une soupape à commande électromécanique qui est commandée par un courant électrique. ◦ Pont Ethernet sans fil permet de connecter un réseau câblé. ◦ SBC est intégré à un programme permettant d'envoyer une chaîne de contrôle au tableau de relais. 	Réseau radio SS100 de surveillance des eaux du sol à distance.	◦ SS100 est utilisé pour détecter et envoyer les données d'humidité du sol.	Deux champs agricoles un à Prosser, Washington et un autre dans la vallée de Nesson Valley of North Dakota, USA

Comme indiqué précédemment, les conditions du sol et les conditions météorologiques sont des facteurs majeurs à la fois pour les besoins d'irrigation et pour les performances des cultures. Le Tableau 4.12 présente les paramètres les plus surveillés, à partir d'un groupe d'articles examinés, dans le domaine de l'irrigation pour réaliser une agriculture de précision.

Tableau 4.12 Résumé des paramètres les plus surveillés dans le domaine de l'irrigation en utilisant le RCSF.

Données collectées	Type de capteur	Références
Humidité du sol	Capteurs au sol	[228], [229], [232], [233], [234], [236], [242], [239], [246], [245], [247], [253], [233], [338], [244], [339], [235], [227], [240], [251], [252], [230], [237], [336], [250], [288], [337], [290], [340], [225], [224], [292], [341], [342], [293], [294], [299], [343], [300], [295], [301], [296], [344]
Température du sol	Capteurs au sol	[231], [228], [233], [229], [236], [244], [338], [235], [227], [242], [230], [249], [237], [289], [250], [288], [340], [295], [301]
Température de l'air	Capteurs de véhicules aériens sans pilote [345] ou capteurs météorologiques	[231], [251], [242], [252], [338], [253], [236], [247], [235], [248], [230], [254], [237], [289], [250], [288], [290], [340], [225], [291], [292], [341], [342], [293], [295], [344]
Humidité de l'air	Capteurs de véhicules aériens sans pilote [345] ou capteurs météorologiques	[231], [247], [338], [251], [252], [236], [235], [249], [248], [230], [254], [237], [250], [288], [290], [340], [225], [291], [292], [341], [342], [344]
Conductivité électrique	Capteurs électrochimiques	[339], [232], [229]
Vitesse et direction du vent	Stations météorologiques	[231], [249], [248], [230], [250], [340]
pH	Capteurs électrochimiques	[338], [242], [238], [250], [344]

Sur la base de l'étude d'un total de 80 articles et des données présentées dans le Tableau 4.12, nous pouvons conclure que :

- Les paramètres du sol sont les paramètres les plus fréquemment surveillés dans les systèmes d'irrigation basés sur RCSF, comme la Figure 4.9 montre.

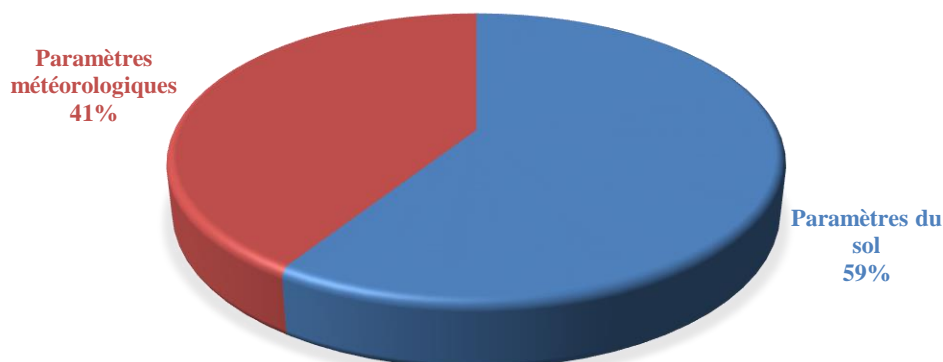


Figure 4.9 Paramètres les plus surveillés dans le domaine de l'irrigation en utilisant le RCSF.

➤ Surveillance de sol

Le paramètre le plus pertinent pour les systèmes d'irrigation est l'humidité du sol. Sur un total de 80 articles évalués, l'humidité du sol a été mesurée dans 50 articles. Le deuxième paramètre, en termes d'importance, est la température du sol. La température du sol est surveillée dans 20 propositions. Le pH est surveillé dans cinq articles et la conductivité électrique dans trois cas seulement.

La Figure 4.10 montre les paramètres du sol les plus surveillés dans l'ensemble d'articles évalués pour les systèmes d'irrigation basés sur RCSF.

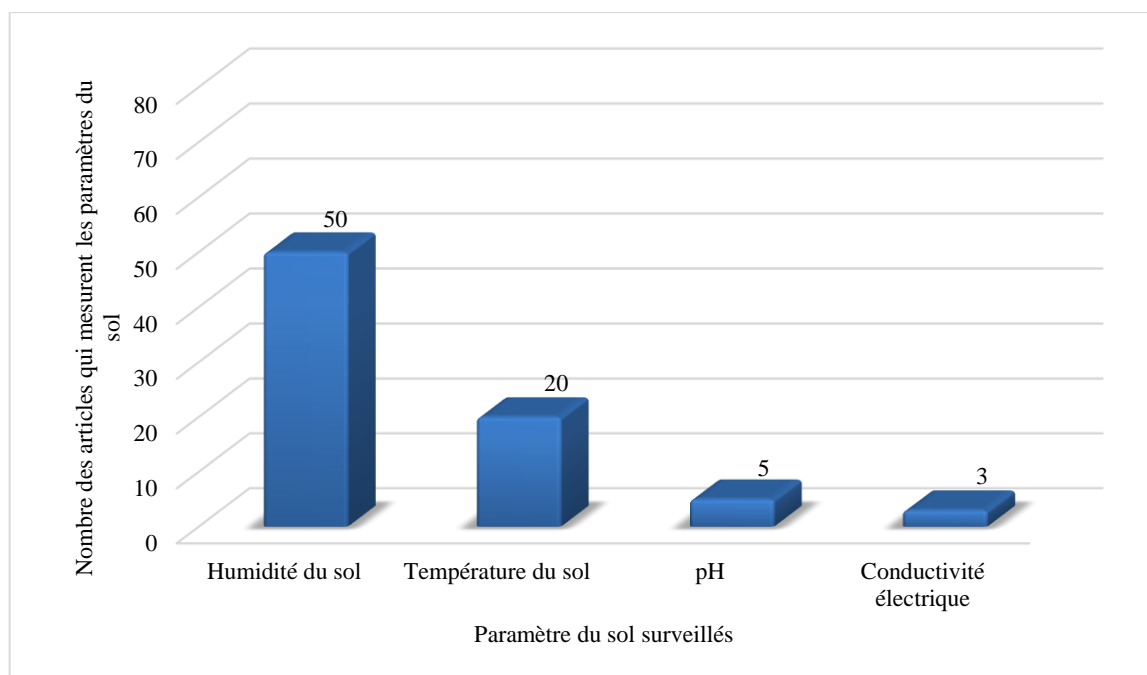


Figure 4.10 Paramètres du sol les plus surveillés dans les articles évalués pour les systèmes d'irrigation basés sur RCSF.

➤ **Surveillance météorologique**

La température et l'humidité sont les facteurs météorologiques les plus importants pour les systèmes d'irrigation basés sur RCSF. Sur un total de 80 articles évalués, la température de l'air est mesurée dans 30 articles. Le deuxième paramètre est l'humidité de l'air. L'humidité de l'air est mesurée dans 22 articles. La vitesse et direction du vent est surveillé dans six articles. La Figure 4.11 montre les paramètres météorologiques les plus surveillés dans l'ensemble d'articles évalués pour les systèmes d'irrigation basés sur RCSF.

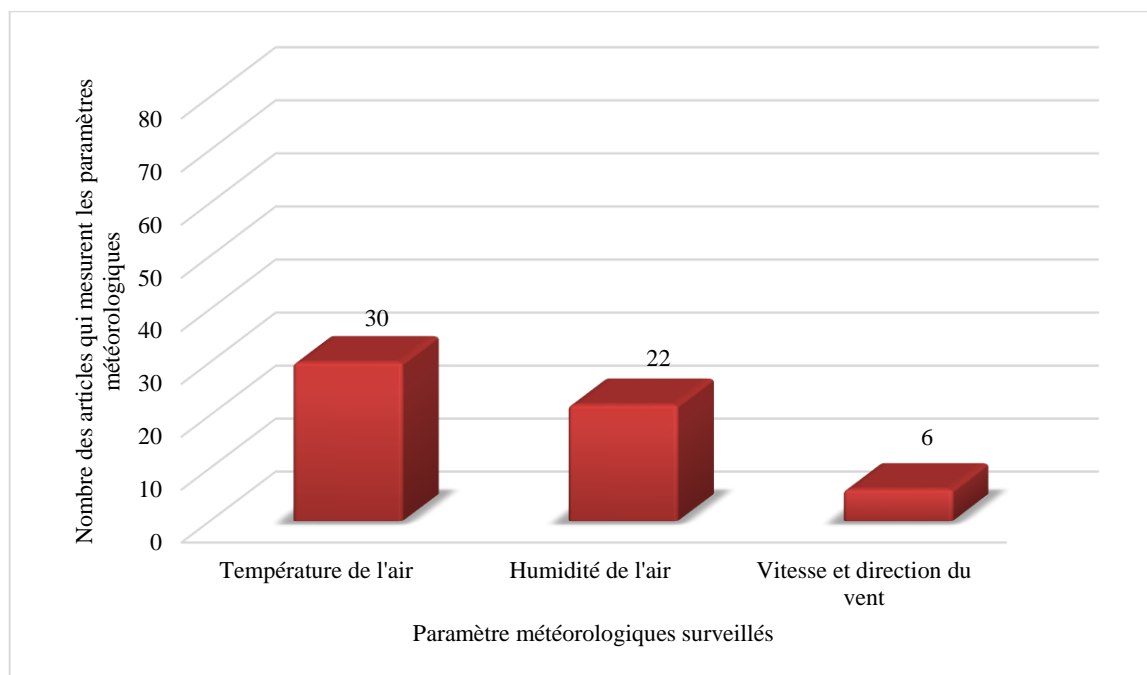


Figure 4.11 Paramètres météorologiques les plus surveillés dans les articles évalués pour les systèmes d'irrigation basés sur RCSF.

4.9 Conclusion

Ce chapitre a présenté une revue systématique de la littérature qui fournit une discussion sur des articles de recherche sélectifs de haute qualité publiés dans le domaine de l'irrigation basé sur les réseaux de capteurs sans fil. Cette étude a été réalisée menée en employant une méthodologie systématique pour sélectionner 80 études pertinentes. Ensuite, un aperçu de la littérature est présenté, et l'importance des capteurs et des réseaux de capteurs sans fil dans les systèmes d'irrigation est expliquée. Par la suite, nous avons fourni une analyse complète des différents capteurs, des technologies de communication sans fil, des types de cultures et de sols et des techniques d'irrigation utilisés pour mettre en œuvre des systèmes d'irrigation intelligents basés sur des réseaux de capteurs sans fil. Nous avons également identifié les paramètres les plus surveillés dans ce contexte. Finalement, nous avons fourni un résumé et une synthèse des résultats de notre étude avec une discussion de ces résultats. A travers cette étude, nous avons cherché de mettre en contexte tous les principaux composants de l'irrigation basée sur les réseaux de capteurs sans fil afin de fournir des orientations futures prometteuses pour les chercheurs travaillant dans ce domaine.

Cette revue systématique de la littérature nous a permis de réaliser que l'application des réseaux de capteurs sans fil dans le domaine de l'irrigation peut être influencée par une série de facteurs qui doivent être pris en compte. Le chapitre suivant présentera la deuxième contribution à cette thèse, qui abordera trois aspects importants liés aux réseaux de capteurs sans fil dans le domaine de l'irrigation. Le premier axe fournira une analyse des principaux facteurs qui affectent les réseaux de capteurs sans fil en général. Le deuxième axe, le plus important, aura pour but de fournir une étude et une analyse des principaux facteurs qui affectent les réseaux de capteurs sans fil dans le domaine de l'irrigation. Et le troisième axe visera à effectuer une analyse SWOT pour évaluer l'utilisation du RCSF dans l'irrigation au Maroc.

Chapitre 5

Facteurs et limites affectant les réseaux de capteurs sans fil dans le domaine de l'irrigation

Sommaire

5.1	Introduction.....	172
5.2	Facteurs affectant les réseaux de capteurs sans fil.....	173
5.3	Facteurs affectant les RCSF dans le domaine de l'irrigation.....	180
5.4	Synthèse.....	186
5.5	Facteurs d'amélioration associés aux solutions d'irrigation basées sur RCSF.....	188
5.6	Avantages des RCSF dans le domaine de l'irrigation.....	190
5.7	Analyse SWOT de l'utilisation des RCSF dans le domaine d'irrigation.....	194
5.8	Conclusion.....	198

5.1 Introduction

L'utilisation de réseaux de capteurs sans fil prend en charge différents domaines de la vie humaine. Lors de la mise en œuvre d'un RCSF, de nombreux facteurs doivent être pris en compte, tels que les ressources limitées du nœud de capteur, les coûts et le type d'environnement de déploiement, afin d'optimiser les performances du RCSF et d'atteindre les résultats souhaités. L'irrigation est un domaine riche en contexte dans lequel le potentiel d'utilisation de la technologie des réseaux de capteurs sans fil est très important. L'adaptation des systèmes d'irrigation qui utilisent les RCSF à grande échelle nécessite de prêter attention à de nombreux facteurs qui affectent l'utilisation des RCSF en irrigation, afin d'utiliser efficacement les ressources disponibles (p. ex., l'eau) tout en améliorant les performances et en obtenant les résultats souhaités. Cependant, les études disponibles n'ont pas abordé de manière exhaustive et méticuleuse les facteurs affectant l'utilisation des réseaux de capteurs sans fil dans le domaine de l'irrigation. Ce travail a tenté de combler les lacunes dans ce domaine en présentant une étude sur les principaux facteurs qui affectent les réseaux de capteurs sans fil dans le domaine de l'irrigation, car nous n'avons pas trouvé d'études qui traitent de manière adéquate les facteurs influençant ce type d'application.

Le présent chapitre se compose de trois axes principaux. Le premier axe consiste à fournir une analyse des principaux facteurs qui affectent les réseaux de capteurs sans fil en général. Le deuxième est l'axe principal et vise à présenter une étude et une analyse des principaux facteurs qui affectent les réseaux de capteurs sans fil dans le domaine de l'irrigation. Par ailleurs, le troisième axe vise à réaliser une analyse SWOT pour évaluer l'utilisation du RCSF dans l'irrigation au Maroc en termes de forces, faiblesses, opportunités et menaces afin de mieux comprendre ce type d'application.

Dans ce chapitre, nous examinerons dans un premier temps les principaux facteurs affectant les réseaux de capteurs sans fil en général. Deuxièmement, nous identifierons, étudierons et analyserons les principaux facteurs qui doivent être pris en compte lors de la conception d'un réseau de capteurs sans fil en irrigation, tout en proposant un ensemble de mesures et de solutions à suivre pour surmonter les défis de la conception et du déploiement d'un RCSF en irrigation. Ensuite, nous présenterons une synthèse dans ce contexte. En plus, un certain nombre de facteurs d'amélioration ont été mis en évidence pour parvenir à un système d'irrigation efficace et cohérent utilisant le RCSF. Finalement, nous soulignerons l'importance de la technologie RCSF dans le domaine de l'irrigation en mettant en évidence les avantages de cette application. Nous effectuerons également une analyse des forces, faiblesses,

opportunités et menaces (SWOT) pour l'utilisation du RCSF dans le domaine de l'irrigation au Maroc.

5.2 Facteurs affectant les réseaux de capteurs sans fil

La conception et la mise en œuvre d'un réseau de capteurs sans fil est influencée par plusieurs facteurs. La limitation d'énergie, de mémoire, et de stockage dans les nœuds d'un réseau de capteurs sans fil, ainsi que les capacités de communication, de traitement, et de calcul limités pour ces derniers et le déploiement de RCSF dans des environnements hostiles sont parmi les facteurs qui influencent ce type de réseaux et le choix des algorithmes et des protocoles qui y sont appliqués. Les principaux facteurs affectant les réseaux de capteurs sans fil sont les suivants.

5.2.1 Déploiement des nœuds capteurs dans le RCSF

Le déploiement des nœuds de capteurs est une étape critique qui a un impact majeur sur le fonctionnement et les performances du réseau. Le déploiement des nœuds de capteurs peut être aléatoire ou déterministe, selon un ensemble de critères tels que le type de capteur, le type d'application et le type d'environnement de surveillance [346], [347]. Le premier déploiement permet aux nœuds d'être déployés de manière aléatoire, généralement dans des zones dont les détails sont inconnus ou inaccessibles. Lors du dernier déploiement, les nœuds de capteurs sont déployés dans des emplacements prédéterminés.

En général, le déploiement d'un grand nombre de nœuds dans le RCSF, où beaucoup de ces nœuds sont souvent inaccessibles et peuvent être non surveillés, les rend vulnérables aux défaillances. La maintenance de la topologie du réseau de capteurs est donc une tâche très complexe qui nécessite une bonne gestion. Cette maintenance comprend trois phases [4], [81] : la phase de pré-déploiement et de déploiement, la phase de post-déploiement et la phase de redéploiement du nouveau nœud.

5.2.1.1 Phase de pré-déploiement et de déploiement

Les nœuds de capteurs dans le RCSF sont dispersés en masse ou individuellement dans le champ de détection, par plusieurs moyens tels que le lancement des capteurs à l'aide d'artillerie, d'avions ou de missiles, ou le placement manuel des nœuds un par un par un humain ou un robot. Le nombre important de nœud déployés dans le RCSF empêche généralement leur déploiement suivant un plan soigneusement défini. Pour y remédier, des

schémas de déploiement initial doivent être conçus pour réduire les coûts d'installation, améliorer l'auto-organisation et la tolérance aux pannes des nœuds, et augmenter la flexibilité de la disposition des nœuds.

5.2.1.2 Phase de post-déploiement

Après la première phase, plusieurs changements dans la topologie du réseau peuvent survenir en raison de modifications des conditions des nœuds de capteurs [81], [348]. Ces changements sont dus à une modification de la position du nœud de capteur en raison du mouvement des nœuds dans le RCSF, à une modification de la connectivité et de l'accessibilité du nœud en raison d'obstacles mobiles, d'interférences ou de brouillage, à un dysfonctionnement des nœuds en raison de défaillances ou d'un épuisement de l'énergie des nœuds, ou aux besoins et tâches en fonction de l'application surveillée (par exemple, dans de nombreuses applications, certains nœuds doivent être éteints pendant une période donnée). En conséquence, la maintenance de la topologie du réseau après la phase de déploiement initiale est également très importante, où il doit y avoir des protocoles et des opérations qui peuvent être adaptés à ces changements.

5.2.1.3 Phase de redéploiement de nouveaux nœuds

En raison des changements de topologie du réseau provoqués par la deuxième phase, la connectivité et la tolérance aux pannes dans le RCSF peuvent être affectées. Il est donc nécessaire de déployer de nouveaux nœuds [81]. De nouveaux nœuds peuvent être ajoutés pour répondre aux changements des tâches spécifiques au réseau ou pour compenser la défaillance de certains nœuds de capteurs dans le réseau, ce qui provoque une réorganisation du réseau et un changement de sa topologie. Par conséquent, la gestion des changements fréquents de topologie du réseau à cette phase exige nécessairement la conception de protocoles de routage spéciaux pour prolonger la durée de vie du réseau.

5.2.2 Tolérance aux pannes

La tolérance aux pannes signifie la capacité de maintenir les fonctionnalités du réseau de capteurs sans interruptions en cas de défaillance dues à une erreur intervenue sur un ou plusieurs nœuds [81], [349], [350]. En règle générale, elle garantit la disponibilité d'un système à utiliser lors de toute panne ou dysfonctionnement. La tolérance aux pannes vise à améliorer la fiabilité, la disponibilité, et la sûreté des RCSF [351]. En effet, la défaillance d'un nœud de capteur peut survenir pour différentes raisons, notamment (i) la défaillance d'un

composant matériel, (ii) des problèmes logiciels, (iii) l'instabilité de la liaison de transmission, (iv) des interférences environnementales, (v) l'épuisement de la batterie et (vi) la dislocation du nœud de capteur [150]. La base de station peut également générer des dysfonctionnements ou des erreurs à cause des raisons telles que (i) des dommages matériels, (ii) des attaques intentionnelles, (iii) des problèmes de transmission et (iv) des problèmes logiciels. Cependant, de telles pannes ne devraient pas avoir d'effet sur le fonctionnement du reste du réseau en raison du principe de tolérance aux pannes.

De nombreuses stratégies visant à atteindre la tolérance aux pannes dans les RCSF ont été examinées dans [151]. Ces stratégies peuvent être divisées en trois catégories principales : les stratégies basées sur la redondance, les stratégies basées sur le regroupement et les stratégies basées sur le déploiement. La Figure 5.1 présente la classification des stratégies de tolérance aux pannes avec une indication des mécanismes de chaque catégorie.

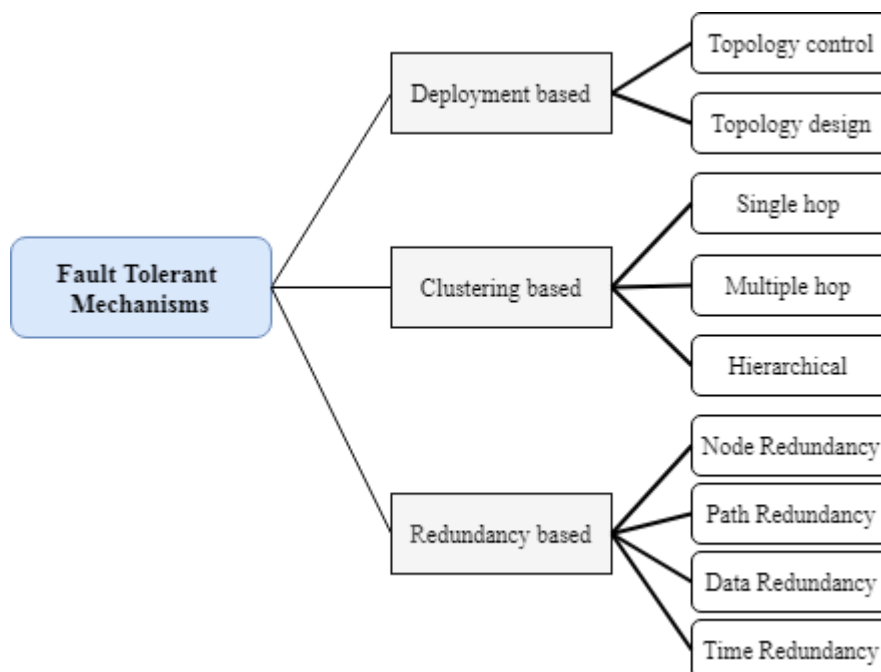


Figure 5.1 Classification des stratégies de tolérance aux pannes dans RCSF.

5.2.3 Durée de vie du réseau

La durée de vie du réseau est la durée pendant laquelle le réseau de capteurs sans fil reste opérationnel. Il s'agit d'une caractéristique importante pour évaluer les RCSF de manière spécifique à une application. Selon l'application, la durée de vie requise du réseau peut varier de quelques heures à plusieurs années. La définition de la durée de vie d'un RCSF est très complexe car ce dernier est composé de divers éléments (p. ex., des systèmes, des capteurs et des logiciels), et le remplacement ou la recharge de la batterie n'est pas possible dans de

nombreux scénarios. Par conséquent, la durée de vie dépend de plusieurs facteurs tels que la qualité de service, la connectivité du réseau, la couverture des capteurs et la manière de déterminer les nœuds actifs [352].

Plusieurs définitions de durée de vie ont été données dans [352]. (1) La durée de vie du réseau en fonction du nombre de nœuds actifs ; c'est l'intervalle entre le moment du déploiement du réseau et le moment où le premier nœud tombe en panne. (2) La durée de vie du réseau en fonction de la couverture des capteurs ; c'est le temps pendant lequel la région d'intérêt est couverte par les nœuds de capteurs. (3) La durée de vie du réseau en fonction de la connectivité. Et (4) la durée de vie du réseau telle que définie dans [353] qui combine trois aspects dans cette définition : le nombre de nœuds actifs, la connectivité et la couverture.

De nombreux algorithmes et méthodes ont été présentés et analysés dans [352], [354], [355] afin de proposer des solutions pour augmenter la durée de vie d'un réseau de capteurs. Bien que ces algorithmes et méthodes proposées, l'utilisation d'algorithmes métaheuristiques reste nécessaire pour résoudre les problèmes d'optimisation de la durée de vie des réseaux de capteurs sans fil [356].

5.2.4 Coûts de production

En tant que le réseau de capteurs sans fil est composé d'un très grand nombre de nœuds, l'évaluation et la justification de son coût global sont liées au coût de production d'un seul nœud. Le prix du nœud de capteur est critique afin de pouvoir concurrencer un réseau de surveillance traditionnel. Ainsi, le coût d'un nœud de capteur doit être inférieur à 1 \$ pour que les réseaux de capteurs soient pratiquement réalisables [81]. Comme mentionné au-dessus (voir Chapitre 3), les nœuds de capteurs peuvent inclure des modules optionnels (p. ex., mémoire externe, mobilisateur et système de localisation), grâce à ces modules, le coût des nœuds de capteurs peut également être augmenté. En conséquence, le coût du nœud de capteur est considéré comme une question très complexe, compte tenu du nombre de fonctionnalités et devrait être maintenu bas [81].

Selon une étude de Roland Berger [357], les ventes de capteurs intelligents augmenteront en moyenne de 17% par an pour atteindre 30 milliards d'unités en 2020, soit un doublement par rapport à 2015. Cependant, le coût d'un nœud de capteur reste toujours un défi pour les fabricants.

5.2.5 Environnement

Un réseau de capteurs sans fil est souvent déployé dans des environnements hostiles où une intervention humaine ne peut être effectuée pour la maintenance après le déploiement du RCSF [152]. Les nœuds de capteurs sont déployés de manière dense soit dans le phénomène à étudier, soit à proximité de celui-ci. Le déploiement peut être effectué soit de manière aléatoire, par exemple, un déploiement aléatoire depuis le ciel [358], soit de manière manuelle.

Un réseau de capteurs est principalement soumis à différentes conditions environnementales en fonction de l'application concernée (p. ex., haute pression, froid extrême et chaleur très élevée). Par conséquent, le réseau de capteurs sans fil doit pouvoir fonctionner sans surveillance dans des régions géographiquement éloignées ou inaccessibles, comme les environnements extrêmement froids, les champs de bataille, les champs contaminés biologiquement ou chimiquement, les profondeurs de l'océan, l'intérieur de grandes machines et les volcans, afin d'assurer un fonctionnement fiable avec une utilisation optimale des ressources.

5.2.6 Facteur d'échelle

Un réseau de capteurs sans fil peut inclure des dizaines de nœuds de capteurs dispersés sur une petite surface dans de nombreuses applications telles que les soins de santé [359], nommé un réseau de capteurs sans fil à petite échelle. Il peut également être composé d'un très grand nombre de nœuds de capteurs, allant de quelques centaines à plusieurs milliers, répartis sur une vaste zone comme les forêts et les champs agricoles [359], nommé un réseau de capteurs sans fil à grande échelle. La densité des nœuds dépend de l'application pour laquelle le RCSF est déployé. Un RCSF peut donc être un réseau à grande échelle fonctionnant avec une très forte densité de nœuds [360], [361]. Un tel nombre de nœuds déployés génère de nombreuses transmissions inter-nodales, ce qui nécessite une station de base bien équipée avec des ressources suffisantes (p. ex., mémoire) pour stocker et traiter les informations provenant d'autres capteurs [1], [4].

Même s'il y a de nombreux avantages à déployer un RCSF à grande échelle, cela pose également de nombreux problèmes d'évolutivité. De nombreux chercheurs ont essayé de mettre au point des mécanismes appropriés pour exploiter et gérer efficacement le grand nombre de nœuds déployés dans le réseau de capteurs. Dans ce contexte, plusieurs mécanismes et protocoles ont été proposés pour atteindre de nombreux objectifs tout en

augmentant les performances du RCSF. Ces objectifs comprennent l'amélioration des performances d'un grand nombre de nœuds dans le RCSF, la réduction du risque de collision et d'interférence entre les paquets échangés en raison de la haute densité, le routage approprié des données sur de longues distances et l'utilisation efficace des ressources disponibles [361]–[363].

5.2.7 Support de transmission

De nombreux nœuds de capteurs qui composent le réseau de capteurs sans fil communiquent par un support sans fil en formant des liens entre eux pour le partage d'informations et le traitement collaboratif. Ces liens peuvent être réalisés par des signaux infrarouges, médias optiques ou radiofréquence [1]. Le bon fonctionnement d'un réseau de capteurs sans fil dépend d'une communication fiable entre les nœuds du réseau. Ainsi, le support de transmission choisi doit être normalisé et doit être disponible dans l'environnement de capture pour assurer le fonctionnement total du réseau.

Pour une communication entre les nœuds dans un RCSF, plusieurs modes de transmission peuvent être utilisés. (1) Communication par infrarouge ; cette communication est peu coûteuse et sans licence, et présente une grande robustesse contre les interférences des composants électriques des capteurs. (2) Communication via un support optique, le nœud Smart Dust [193] est un exemple de mote qui fonctionne en utilisant le support de transmission optique. (3) Communication par radiofréquence offre une transmission sans licence, une disponibilité globale et une attribution de spectre. En outre, une grande partie des dispositifs actuels pour les nœuds de capteurs (p. ex., Mica2 [194], TelosB [364] et MicaZ [365]) utilisent le support de transmission RF. Les deux premiers modes sont vulnérables aux obstacles et nécessitent également une ligne de mire entre l'émetteur et le récepteur, faisant de l'utilisation de ces deux supports une option réticente dans les scénarios RCSF. Par conséquent, la communication par radiofréquence est la plus pertinente, la plus préférée et la plus adaptée pour la plupart des applications basées sur RCSF [366].

L'utilisation des bandes ISM pour les liaisons radiofréquence est une option populaire qui offre une communication libre de toute licence et disponible dans la majorité des pays du monde. Ces bandes offrent également une plus grande liberté pour la mise en œuvre de protocoles de communication et de routage spécifiques au RCSF [81]. En raison des restrictions matérielles associées aux nœuds de capteur dans le RCSF, les unités de transmission intégrées à ces nœuds doivent être petites, économiques et efficaces sur le plan énergétique.

5.2.8 Topologie du réseau

La topologie du réseau de capteurs sans fil est une topologie dynamique qui peut être fréquemment modifiée, ce qui conduit à l'émergence de plusieurs problèmes dans la topologie du RCSF [146], [367]. Ce changement peut être attribué à l'ajout de nouveaux nœuds, à la mobilité des nœuds ou à la défaillance des nœuds. (1) Ajout de nouveaux nœuds ; il peut s'agir d'ajouter des nouveaux nœuds au RCSF déjà déployé pour étendre le réseau de capteurs ou pour compenser la défaillance de certains nœuds du réseau. Pour modifier la topologie du RCSF en raison de l'ajout d'un nouveau nœud, il suffit que le nœud ajouté se trouve dans la zone de couverture. (2) Défaillance du nœud ; dans le RCSF, il est possible que le nœud de capteurs devienne non opérationnel, hors service, soit en raison de l'épuisement des ressources énergétiques limitées, soit à cause d'une panne. (3) Mobilité du nœud ; dans certains cas, les nœuds de capteurs peuvent être mobiles ou liés à des objets en mouvement.

Les problèmes de contrôle de la topologie du RCSF ont été largement examinés dans la littérature existante [146], [148]. Ces problèmes peuvent être divisés en deux catégories : les problèmes de couverture du réseau et les problèmes de connectivité du réseau. La classification des problèmes de contrôle de la topologie est illustrée à la Figure 5.2.

La couverture du réseau décrit l'étendue de la surveillance du champ cible par le RCSF, en indiquant l'emplacement des capteurs et les interactions entre eux. Elle se préoccupe de trouver et de maximiser une région de détection fiable avec une faible consommation d'énergie tout en répondant aux besoins de l'application surveillé. En fonction de la granularité de la couverture, c.-à-d., la qualité de la couverture est déterminée à l'aide d'un ensemble de critères en termes de granularité de la couverture (p. ex., la granularité la plus élevée, la granularité moyenne et la granularité la plus faible), la couverture du réseau est divisée en trois catégories : couverture globale, couverture de balayage et couverture de barrière [148].

La connectivité du réseau, d'autre part, met l'accent sur la récupération et la livraison des messages dans le réseau, en se concentrant sur la qualité de la connexion mutuelle des capteurs dans la topologie du réseau. Les mécanismes de contrôle de l'énergie et les mécanismes de gestion de l'énergie sont les deux types de mécanismes utilisés pour préserver une topologie efficace de la connectivité des capteurs [146], [148]. Les mécanismes de gestion de l'énergie, c.-à-d., le contrôle temporel, maintiennent un programme optimal de veille/sommeil pour une bonne communication entre les capteurs du réseau tandis que les mécanismes de contrôle de l'énergie, c.-à-d., le contrôle spatial, permettent de contrôler le niveau d'énergie de chaque capteur afin d'atteindre une topologie de connectivité optimisée.

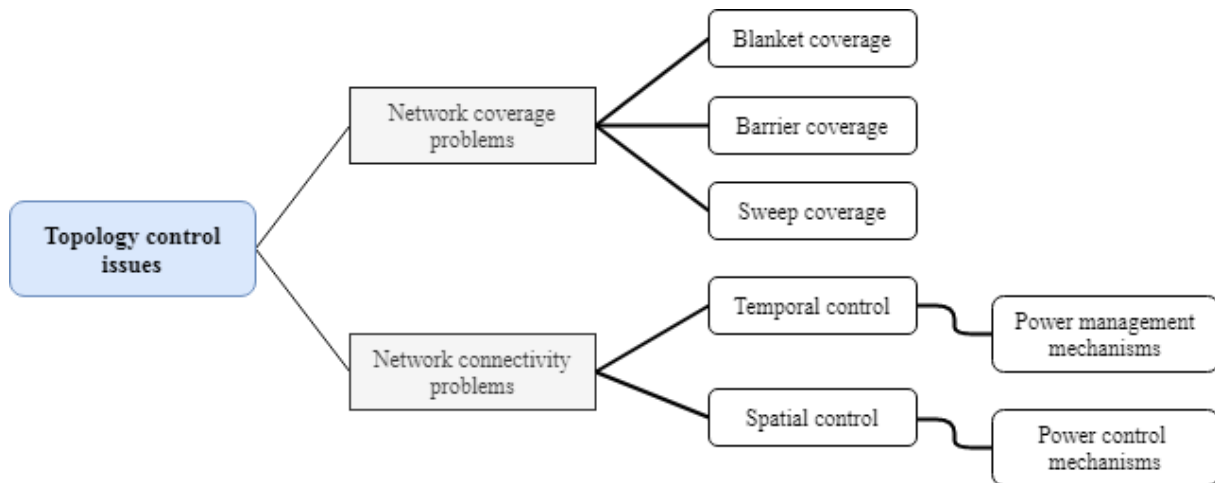


Figure 5.2 Classification des problèmes de contrôle de topologie dans le RCSF.

5.3 Facteurs affectant les RCSF dans le domaine de l'irrigation

Les dernières années ont été marquées par un changement radical dans le domaine agricole. Grâce à ce changement, de nouvelles solutions ont été trouvées pour développer et améliorer ce domaine, tout en résolvant ses problèmes. Le réseau de capteurs sans fil est largement utilisé avec succès dans divers services agricoles, en particulier dans les services d'irrigation. Cela est principalement dû à l'importance de disposer d'un système d'irrigation précis et automatisé, qui aide à maintenir les ressources en eau et à améliorer les performances et l'efficacité de l'irrigation.

Néanmoins, dans de nombreux scénarios, les nœuds de capteurs peuvent être situés dans un environnement ouvert et non supervisé. En outre, l'agriculture peut être pratiquée dans des champs agricoles de plusieurs centaines d'hectares et peut englober différents climats, ressources et terres, ce qui pose de nombreux problèmes de mise en œuvre et de conception. Ci-dessous, nous discutons et analysons les principaux facteurs qui doivent être pris en compte lors de la conception et la mise en œuvre d'un réseau de capteurs sans fil dans le domaine de l'irrigation, ainsi qu'un ensemble de procédures et de solutions proposées. La Figure 5.3 montre les principaux facteurs affectant les réseaux de capteurs sans fil dans le domaine de l'irrigation.



Figure 5.3 Principaux facteurs affectant les RCSF dans le domaine de l'irrigation.

5.3.1 Placement du nœud de capteurs

Le placement des nœuds de capteurs en fonction des besoins demandés est l'un des facteurs critiques dans la conception et la mise en œuvre de réseau de capteurs sans fil dans le domaine de l'irrigation. Il joue un rôle très important pour garantir que le RCSF fonctionne de manière fiable et indépendante. Par conséquent, il faut faire très attention lors du placement des nœuds de capteurs dans la zone à irriguer afin que le capteur soit positionné à l'emplacement et à la hauteur appropriés pour mesurer les paramètres sans obstruction et de telle sorte que la zone à irriguer doit être entièrement couverte. En outre, des dispositifs appropriés (c.-à-d., des fixations) doivent être installés pour supporter les nœuds afin d'éviter des changements dans leurs positionnements qui pourraient résulter de l'eau de pluie, des courants d'eau ou des vents forts.

Dans la zone à irriguer, les capteurs d'humidité du sol doivent être placés, par exemple, aussi près que possible du sol pour obtenir des mesures précises, démarrant ainsi le processus d'irrigation si l'humidité du sol est inférieure aux valeurs seuils. Tandis que les capteurs de température de l'air doivent être à un endroit élevé pour mesurer correctement la température de l'air. De plus, pour gérer correctement la position de chaque nœud dans la zone à irriguer, une méthode appropriée de déploiement des nœuds de capteurs dans le RCSF est nécessaire.

5.3.2 Boîtier du nœud de capteurs

Dans la zone à irriguer, les nœuds de capteur déployés peuvent être endommagés en raison de mauvais traitements infligés aux humains ou aux animaux et peuvent également être

soumis à diverses conditions environnementales difficiles, par exemple des vents forts, une chaleur très élevée, un froid extrême, une haute pression et la pluie. Par conséquent, les nœuds de capteurs doivent être enfermés dans un boîtier de protection qui les rend aussi résistants que possible aux conditions mentionnés ci-dessus.

En outre, le boîtier utilisé doit être adapté et conçue de telle sorte que le contenu interne du boîtier n'atteigne jamais une température supérieure à celle que les batteries des nœuds peuvent supporter dans des conditions pratiques. Il est recommandé d'utiliser un moyen de contrôle de la température interne et une construction à double paroi dans le boîtier utilisé pour améliorer l'efficacité des systèmes d'irrigation basés sur le RCSF [368].

5.3.3 Taille et déploiement du nœud de capteurs

La taille du nœud de capteurs est un autre facteur qui joue un rôle très important dans la conception et la mise en œuvre de réseau de capteurs sans fil dans le domaine de l'irrigation. Par conséquent, un nœud doit être petit et adapté au déploiement dans la zone à irriguer.

Pour augmenter la performance des systèmes d'irrigation basés sur les RCSF, une méthode appropriée de déploiement des nœuds de capteurs est nécessaire pour gérer correctement la position de chaque nœud dans la zone à irriguer. Le déploiement des nœuds de capteurs peut être un déploiement aléatoire ou un déploiement déterministe [346], [347], [358]. Comme mentionné dans la Section 5.2.1, le déploiement aléatoire permet aux nœuds de capteurs d'être déployés de manière aléatoire, généralement dans des zones à grande échelle dont les détails sont inconnus ou inaccessibles. Dans le cadre du déploiement déterministe, les nœuds de capteurs sont déployés dans des emplacements prédéterminés. Le déploiement d'un grand nombre de nœuds dans le RCSF les rend vulnérables aux pannes. Ainsi, la maintenance topologique du réseau de capteurs avant, pendant et après le déploiement est une tâche très compliquée qui nécessite une bonne gestion comme également évoqué précédemment.

5.3.4 Tolérance aux pannes

Un autre facteur critique dans la conception et la mise en œuvre de réseau de capteurs sans fil dans le domaine de l'irrigation est la tolérance aux pannes. La tolérance aux pannes est la capacité de conserver les fonctionnalités du réseau de capteurs en cas de défaillance, due à un défaut dans un ou plusieurs nœuds, sans interruption. Étant donné que dans la zone à irriguer, un grand nombre de nœuds de capteurs sont déployés dans un environnement ouvert où ces nœuds peuvent être endommagés et/ou tomber en panne. La défaillance d'un nœud de capteur dans un RCSF peut se produire pour plusieurs raisons [150].

La dislocation du nœud de capteurs, l'instabilité de la liaison de transmission, les interférences environnementales, le colmatage, l'épuisement de la batterie, les dommages physiques dus à une mauvaise manipulation par les humains ou les animaux dans les terres agricoles, des problèmes logiciels, des conditions environnementales extrêmes et la défaillance des composants matériels du nœud sont parmi les raisons importantes qui peuvent provoquer une défaillance des nœuds dans un système d'irrigation basé sur un RCSF. Toutefois, ces défaillances ne devraient pas affecter le fonctionnement du reste du réseau, grâce au principe de tolérance aux pannes qui vise à améliorer la fiabilité et la disponibilité des RCSF [351]. Différentes stratégies de tolérance aux pannes, telles que les mécanismes basés sur le regroupement, les mécanismes basés sur la redondance et les mécanismes basés sur le déploiement, améliorent la fiabilité du réseau [151]. En outre, les schémas de gestion de la topologie et d'agrégation de données doivent être tolérants aux pannes lors d'un déploiement à grande échelle.

Dans plusieurs scénarios d'irrigation [233], [242], [369], des nœuds de capteurs alimentés par l'énergie solaire ont été utilisés pour réduire le risque de défaillance des nœuds due à l'épuisement de la batterie. De plus, dans [233], une défaillance de communication et une tolérance aux pannes de nœud ont été introduites pour le système d'irrigation et un programme d'irrigation par défaut est suivi en cas de problème.

5.3.5 Consommation et gestion de l'énergie

Dans un réseau de capteurs sans fil, un nœud de capteur est composé principalement de quatre unités de base : une unité de détection, une unité de transmission, une unité d'alimentation et une unité de traitement. Chaque nœud de capteur a pour tâche d'identifier l'événement, de transmettre et de traiter les données. Il peut également effectuer la tâche supplémentaire de routage des données lorsqu'il s'agit d'un réseau à sauts multiples. Chacune de ces tâches consomme beaucoup d'énergie. En règle générale, un nœud de capteur dispose d'une source d'énergie limitée et restreinte, comme des piles au lithium ou alcalines, de sorte que la durée de vie d'un nœud de capteur dépend largement de la durée de vie de la batterie. Etant donné que la batterie d'un nœud de capteur fournit une énergie limitée, il est crucial de s'assurer que les composants du nœud de capteurs consomment une puissance minimale. En particulier, la réduction de la consommation d'énergie de l'unité de transmission en tant qu'unité qui consomme plus d'énergie que les autres composants du nœud de capteur peut contribuer à atténuer ce problème [230].

L'énergie est également un facteur important dans la conception et la mise en œuvre de réseaux de capteurs sans fil. Par conséquent, la gestion de l'énergie est une question importante dans tout système basé sur les réseaux de capteurs sans fil, y compris les systèmes d'irrigation. Une stratégie appropriée de gestion d'énergie (c.-à-d., des mécanismes et des algorithmes) peut être mise en œuvre dans les matériels et les logiciels pour prolonger la durée de vie de la batterie de plusieurs mois supplémentaires.

Dans les scénarios d'irrigation, une durée de vie plus longue des nœuds de capteurs peut être réalisée en tenant également compte de l'utilisation des solutions de récupération d'énergie disponibles [370]–[372] telles que l'énergie éolienne, l'énergie thermique et l'énergie solaire lors de la conception de systèmes d'irrigation basés sur un RCSF, une solution considérée comme coûteuse. De plus, les nœuds de capteurs peuvent fonctionner avec des batteries remplacées car ils sont généralement bien définis en termes de localisation et d'accès [328].

5.3.6 Collecte et transmission des données

Dans chaque détection, mesure, traitement et transmission des données, de l'énergie est dépensée, ce qui consomme une grande partie de la durée de vie de la batterie. Il est donc nécessaire de programmer des techniques efficaces et améliorées d'agrégation de données et de taux d'échantillonnage afin que, parallèlement à la collecte de données pertinentes et utiles, l'énergie ne soit pas gaspillée. D'autre part, l'acquisition fréquente de données entraîne l'envoi d'un nombre massif de paquets, ce qui épuise rapidement les batteries. Dans le domaine de l'irrigation, le taux d'échantillonnage pour l'acquisition de données n'est généralement pas élevé. Cependant, il peut être modifié en fonction de l'environnement, du type de cultures à irriguer et des ressources disponibles pour l'irrigation.

Une stratégie de transmission des données peut également être développée pour réduire le nombre de transmissions, ce qui permet d'économiser de l'énergie. Cette stratégie peut donc impliquer une transmission intelligente des données, comme que des valeurs agrégées ou des valeurs modifiées uniquement, et un stockage local des données dans les nœuds de capteurs. En outre, la mise en œuvre d'une fonction de veille/réveil peut améliorer les performances du réseau grâce aux économies d'énergie, de sorte que les émetteurs ne soient réveillés que lorsque cela est nécessaire. La fiabilité des liens de communication exige que les nœuds de capteurs soient situés à proximité les uns des autres pour garantir une communication multi-sauts fiable. Néanmoins, les caractéristiques des terres à irriguer peuvent être un obstacle à une telle communication fiable.

5.3.7 Coût du système

L'utilisateur final, c.-à-d., l'agriculteur, considère généralement le coût et s'il peut se le permettre. Ainsi, le budget d'un système d'irrigation basé sur le RCSF est considéré comme l'une des principales priorités pour une utilisation efficace du RCSF. Le coût total du matériel et du logiciel des nœuds de capteurs est un facteur très important lors de la conception d'un réseau de capteurs sans fil dans le domaine de l'irrigation.

La conception des nœuds de capteurs pour les applications d'irrigation doit être peu coûteuse tout en démontrant de bonnes performances. Il est donc toujours préférable de concevoir une application à faible coût afin qu'elle soit disponible pour une utilisation par les marchés des pays à revenu faible et intermédiaire (LMIC) en minimisant le coût du matériel et des logiciels et en maximisant la production du système [56].

5.3.8 Pertes de propagation

Dans les applications d'irrigation, le réseau de capteurs sans fil doit pouvoir fonctionner dans différentes conditions climatiques ainsi que dans divers environnements, tels que des terrains complexes, des fermes, des serres et du sol. Chacune de ces conditions peut affecter les performances de propagation des ondes radio. Par ailleurs, pour atteindre les nœuds récepteurs, le signal transmis par les nœuds de capteurs peut traverser une couverture végétale dense, ce qui empêche d'assurer une zone de dégagement suffisante et provoque une diffusion, une atténuation et une absorption de la propagation du signal, ce qui conduit à une détérioration de la qualité de la liaison, en particulier dans les cultures denses. On peut affirmer que la communication entre les nœuds d'un réseau de capteurs dans l'irrigation est toujours confrontée à de sérieux problèmes, que la topographie du terrain soit complexe ou simple.

Il convient donc d'assurer la qualité des liens de communication et des variables spatiales et temporelles lors du déploiement des RCSF. Étant donné que les performances de la connectivité du réseau de capteur sont liées à la nature de l'environnement et que les ressources RCSF sont limitées, il faut adopter un modèle précis de perte de chemin de canal sans fil pour refléter les caractéristiques de propagation. Le modèle approuvé doit démontrer une optimisation correcte et une performance d'évaluation du réseau lors de la conception du déploiement afin de garantir la QoS du réseau, de réduire le nombre de retransmissions et de développer l'efficacité énergétique du nœud de capteurs [328].

5.4 Synthèse

Les réseaux de capteurs sans fil ont attiré l'attention du monde entier ces dernières années, ce qui les rend largement utilisés avec succès dans divers systèmes d'irrigation. Nous avons discuté et analysé ci-dessus plusieurs facteurs clés à prendre en compte lors de la conception et du déploiement d'un réseau de capteurs sans fil dans les terres agricole à irriguer, dont certains sont le coût, la position du nœud, la consommation et la gestion de l'énergie, la taille et le déploiement du nœud de capteur et la tolérance aux pannes, ainsi qu'un ensemble de mesures pour les surmonter.

Dans le Tableau 5.1, nous résumons un ensemble de facteurs et des mesures proposées pour surmonter les problèmes de conception et de déploiement d'un réseau de capteurs sans fil dans le domaine de l'irrigation.

Tableau 5.1 Facteurs influençant la conception et la mise en œuvre du RCSF dans l'irrigation et mesures proposées.

Facteurs influant	Causes de problèmes	Mesures / Solutions proposées
Placement du nœud de capteur	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Nœuds de capteur mal placés dans la zone à irriguer ◦ Changement de position du nœud de capteur après le déploiement 	<ul style="list-style-type: none"> - Placer le nœud de capteur dans la position et la hauteur appropriées - Installation de dispositifs de support de nœud pour éviter tout changement de position - Méthode de déploiement appropriée pour les nœuds de capteur pour gérer correctement la position de chaque nœud (déploiement aléatoire ou déploiement déterministe)
Collecte et transmission de données	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Détection des données ◦ TROP de consommation d'énergie par l'unité de transmission ◦ Liens de communication peu fiables en raison des caractéristiques de la terre à irriguer 	<ul style="list-style-type: none"> - Techniques d'agrégation de données et de taux d'échantillonnage - Stratégie de transmission de données pour réduire le nombre de transmissions - Mise en œuvre d'un mode veille / réveil pour les nœuds de capteur - Placement des nœuds de capteurs à proximité les uns des autres pour garantir une communication multi-sauts fiable

Boîtier du nœud de capteur	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Dommages aux nœuds de capteurs déployés dus à une mauvaise utilisation humaine ou animale ◦ Exposition des nœuds de capteurs déployés à des conditions environnementales extrêmes (p. ex., vents forts et pluie) 	<ul style="list-style-type: none"> - Placement du nœud de capteur dans un boîtier de protection - Conception de la boîte utilisée de manière à ce que le contenu interne de cette boîte n'atteigne pas des températures très élevées - Utilisation d'un moyen de contrôle de la température interne - Utilisation d'une construction à double paroi
Taille et déploiement du nœud de capteur	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Taille du nœud de capteur ◦ Problèmes de déploiement du réseau ◦ Topologie dynamique du réseau 	<ul style="list-style-type: none"> - Nœud de capteur doit être de petite taille et adaptée au déploiement dans la zone à irriguer - Méthode de déploiement appropriée des nœuds de capteurs - Déploiement aléatoire - Déploiement déterministe - Maintenance topologique du réseau de capteurs avant, pendant et après le déploiement
Coût du système d'irrigation	Coût élevé du matériel et des logiciels utilisés	<ul style="list-style-type: none"> - Conception de nœuds de capteurs à faible coût et performants pour des applications d'irrigation - Réduction des coûts logiciels et matériels utilisés
Tolérance aux pannes	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Dislocation du nœud de capteur ◦ Défaillance de la communication ◦ Dommages physiques ◦ Epuisement des ressources ◦ Blocage ◦ Conditions environnementales extrêmes ◦ Interférences environnementales 	<ul style="list-style-type: none"> - Mécanismes basés sur le clustering - Mécanismes basés sur la redondance - Mécanismes basés sur le déploiement - Tolérance des schémas de gestion de la topologie et d'agrégation de données lors d'un déploiement à grande échelle - Utilisation des nœuds de capteurs à énergie solaires pour réduire l'épuisement de la batterie du nœud
Consommation et gestion de l'énergie	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Détection des données ◦ Traitement des données ◦ Transmission des données ◦ Routage de données ◦ Source d'alimentation restreinte et limitée 	<ul style="list-style-type: none"> - Stratégie appropriée de gestion d'énergie (mécanismes et algorithmes) pour prolonger la durée de vie de la batterie - Utilisation des solutions de récupération d'énergie disponibles telles que l'énergie éolienne, l'énergie thermique et l'énergie solaire - Nœuds de capteurs avec des batteries remplacées

5.5 Facteurs d'amélioration associés aux solutions d'irrigation basées sur RCSF

À l'avenir, nous devons accorder plus d'attention, en particulier au Maroc, à plusieurs facteurs associés aux solutions d'irrigation basées sur les réseaux de capteurs sans fil afin de parvenir à un système d'irrigation efficace et cohérent. La Figure 5.4 illustre certains de ces facteurs.

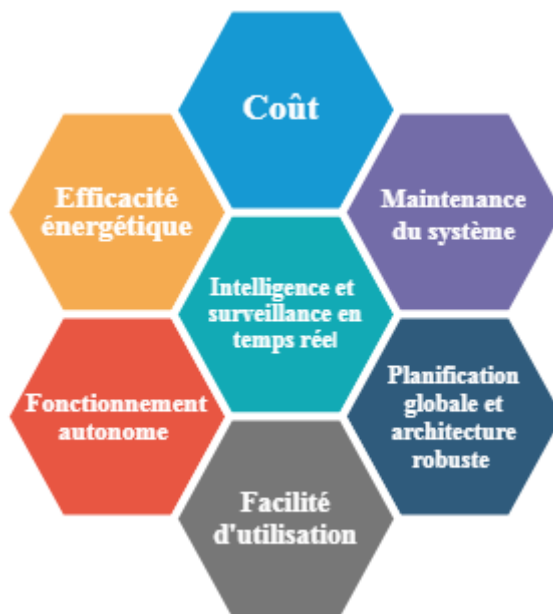


Figure 5.4 Facteurs d'amélioration clés associés aux solutions d'irrigation basées sur les RCSF.

5.5.1 Coût

Selon les données fournies par l'organisation de coopération et de développement économiques (OECD) [373], le Maroc figure sur la liste des pays LMIC. Le coût élevé des matériaux, programmes et systèmes associés au RCSF, où des équipements importés de l'étranger sont utilisés, est le principal obstacle à l'utilisation du RCSF dans le domaine de l'irrigation au Maroc. Nous constatons donc qu'il existe un besoin urgent de solutions rentables pour accroître l'application du RCSF dans l'irrigation afin d'étendre son utilisation et son accès largement parmi les agriculteurs et les parties prenantes. Dans ce contexte, les efforts actuels de recherche et de développement devraient se concentrer sur la réduction des coûts logiciels et matériels utilisés tout en augmentant les performances du système, ce qui réduirait le coût total d'un système d'irrigation basé sur RCSF. Ainsi, la mise à disposition de ces systèmes sur les marchés des pays LMIC, y compris le marché marocain.

5.5.2 Maintenance du système

Comme mentionné ci-dessus, le coût global élevé d'un système d'irrigation basé sur un RCSF est l'un des principaux obstacles empêchant l'utilisation du RCSF dans le domaine de l'irrigation à grande échelle au Maroc. En plus de réduire les coûts des logiciels et du matériel utilisés dans les réseaux de capteurs, une faible maintenance du système est requise. Un système d'irrigation basé sur un réseau de capteurs sans fil doit être conçu avec une maintenance aussi faible que possible, ce qui réduira certainement le coût total moyen à long terme.

5.5.3 Efficacité énergétique

Comme mentionné dans la Section 5.3.5, la gestion de l'énergie est une question importante dans les systèmes d'irrigation basés sur les réseaux de capteurs sans fil. Par conséquent, les futures solutions doivent également être plus efficaces sur le plan énergétique en intégrant des algorithmes intelligents pour assurer une durée de vie prolongée du système.

5.5.4 Fonctionnement autonome

Le fonctionnement autonome est une caractéristique très importante qui permet un mode de fonctionnement simple et avancé dans la plupart des applications d'irrigation basées sur le RCSF, en particulier dans les régions éloignées à irriguer. Par conséquent, les futures solutions d'irrigation basées sur un RCSF doivent intégrer la capacité de continuer à fonctionner de manière autonome sans contrôle tout en prolongeant la période de fonctionnement autonome pour une période plus longue.

5.5.5 Facteur d'intelligence et de surveillance en temps réel

De nombreuses cultures sont sensibles aux conditions climatiques, ce qui oblige les agriculteurs à suivre de près et en permanence l'évolution des conditions climatiques afin d'éviter des problèmes inattendus sur les terres agricoles à irriguer. Ainsi, en plus d'un fonctionnement autonome, les solutions futures pour l'irrigation basée sur le RCSF doivent également être développées avec une intelligence inhérente avec une capacité de surveillance en temps réel pour interagir de manière proactive afin de répondre à une variété de défis tels que l'amélioration du rendement, la réponse en temps réel et la conservation de l'énergie.

5.5.6 Facilité d'utilisation

Dans la plupart des cas, les utilisateurs finaux des applications d'irrigation sont des personnes non techniques. Par conséquent, les futures solutions d'irrigation devraient fournir des applications simples et faciles à utiliser pour une communication efficace avec l'utilisateur final. En outre, les éléments de ces solutions, tels que l'interface de communication, doivent être compréhensibles, simples et faciles à utiliser.

5.5.7 Différents climats et sols

Le Maroc se caractérise par la diversité du climat et du sol dans tout le pays, ce qui rend difficile la conception d'un système d'irrigation efficace basé sur les réseaux de capteurs sans fil. Les paramètres d'application doivent donc être réglés pour fonctionner correctement à divers endroits.

5.5.8 Planification globale et architecture robuste

En raison du grand nombre de nœuds différents déployés dans le RCSF, le réseau de capteurs doit être déployé dans la terre agricole à irriguer selon un plan soigneusement défini. Dans les futures solutions d'irrigation basées sur le RCSF, une planification globale et une architecture robuste et tolérante aux pannes, tenant compte de la structure des terres agricoles et des besoins des agriculteurs, seront essentielles pour assurer un fonctionnement à long terme tout en minimisant les coûts et en améliorant les performances du système.

5.6 Avantage des RCSF dans le domaine de l'irrigation

L'utilisation des réseaux de capteurs sans fil dans le domaine de l'agriculture est maintenant à un stade avancé. Il existe de nombreuses applications potentielles des réseaux de capteurs sans fil dans le domaine de l'irrigation. Dans ce qui suit, nous mettons en évidence les principaux avantages de l'utilisation du RCSF dans l'irrigation, comme la Figure 5.5 montre.

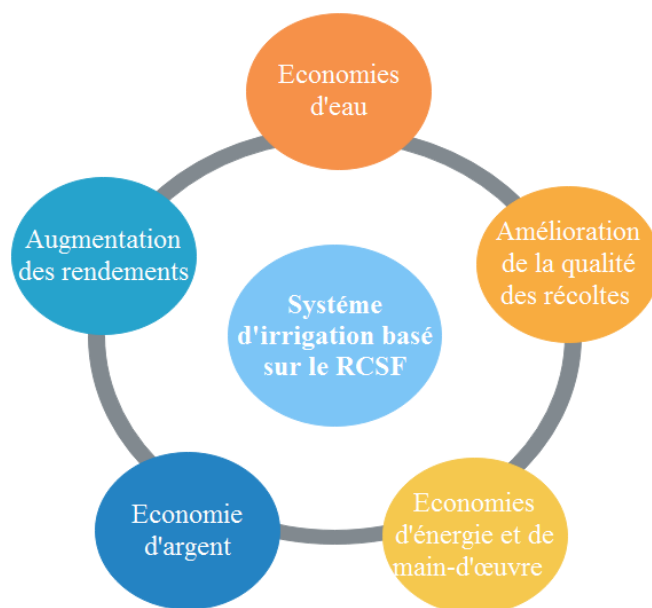


Figure 5.5 Principaux avantages de l'utilisation des RCSF dans l'irrigation.

5.6.1 Economies d'eau

Les pratiques d'irrigation traditionnelles employées visent uniquement à contrôler la distribution de l'eau aux endroits requis sans compromettre les besoins en eau, perdant ainsi une grande quantité d'eau dans chaque processus d'irrigation. Alors que nous constatons que le principal objectif de l'utilisation des réseaux de capteurs sans fil dans l'irrigation est d'assurer une utilisation efficace et rationnelle de l'eau, réalisant ainsi des économies d'eau significatives.

De nombreux travaux et recherches ont prouvé que le RCSF est un moyen idéal pour réaliser d'importantes économies d'eau. Gutiérrez et al. [233] ont montré que des économies d'eau significatives, c.-à-d., jusqu'à 90%, par rapport aux techniques d'irrigation traditionnelles sont possibles grâce à l'utilisation du RCSF. Fernández-Pacheco et al. [374] ont également montré des économies d'eau de 0,71 à 6,46%. Dans un autre travail réalisé par González-Briones et al. [249], il a été rapporté que la consommation d'eau a été réduite de 15,06% dans le processus d'irrigation automobile grâce à l'utilisation du RCSF et du système multi-agents. Les tests réalisés par Katyara et al. [244] ont également montré des résultats positifs en termes de réduction de l'eau utilisée pour l'irrigation, c.-à-d., une conservation d'environ 2150 cusecs d'eau par an. D'autres tests suggérés par Difallah et al. [241] indique une diminution de la consommation d'eau de 28,51%.

5.6.2 Augmentation des rendements et amélioration de la qualité de la production agricole

Lorsque le bon moment pour l'irrigation est bien défini, il existe un grand potentiel pour augmenter les rendements et améliorer la qualité de la production agricole. Tandis que tout retard dans l'irrigation peut entraîner des pertes allant de 62 à 300 \$ US/ha [343]. Ainsi, un autre objectif de l'utilisation de réseaux de capteurs sans fil dans le domaine de l'irrigation est de déterminer les besoins en irrigation dans une zone particulière au bon moment, ce qui permet d'augmenter les rendements et d'améliorer la qualité de la production agricole.

Les résultats d'Abd El-kader et El-Basioni [344] ont montré une augmentation des rendements de pommes de terre et une perte de 2 milliards de livres sterling a été compensée en un an par l'utilisation du RCSF pour les champs de pommes de terre. Les tests réalisés par Katyara et al. [244] ont également montré des résultats positifs en termes d'augmentation de la productivité des terres agricoles, soit une augmentation d'environ 20 à 25%. Dans un autre travail mené par Khan et Kumar [254], il a été rapporté que l'utilisation d'un évier mobile dans les réseaux de capteurs sans fil pour surveiller les champs de culture ambiants contribue à augmenter le rendement des cultures. Nagarajan et Minu [242] ont également conclu qu'un système de surveillance des caractéristiques du sol utilisant un RCSF pour automatiser le système d'irrigation par aspersion pourrait améliorer les rendements avec une qualité élevée et contrôler l'approvisionnement en eau.

5.6.3 Economies de main-d'œuvre, d'argent et d'énergie

Les systèmes d'irrigation traditionnels de la plupart des fermes nécessitent beaucoup de main-d'œuvre, d'argent et d'énergie pour bien fonctionner. Les agriculteurs s'efforcent toujours de saper ces trois facteurs. Les nombreux avantages du RCSF lui ont permis de fournir des stratégies rentables et efficaces pour soutenir et améliorer les systèmes d'irrigation. Ainsi, un autre objectif de l'utilisation du RCSF dans le domaine de l'irrigation est d'offrir des solutions économiques et efficaces, permettant ainsi de réaliser des économies de main-d'œuvre, d'argent et d'énergie.

Des études expérimentales ont été menées par Khan et Kumar [254] pour surveiller les champs de culture ambiants en utilisant un évier mobile dans les réseaux de capteurs sans fil, ils ont été signalés que la diminution de la consommation d'énergie était de 0,0115 J dans le réseau. Işik et al. [245] ont montré que des économies d'énergie et de coûts importantes peuvent être réalisées. Des tests réalisés par Nikolidakis et al. [230] ont également montré une

amélioration de la durée de vie du RCSF en utilisant le protocole ECHERP, c.-à-d., jusqu'à 1825 minutes. L'automatisation du système d'irrigation basé sur RCSF et ZigBee dans [374] a également permis d'économiser le coût du système entre 1,24% et 6,72% par rapport au coût total des associations d'usagers de l'eau, avec des économies d'énergie de 2,05 à 8,21%.

Le Tableau 5.2 montre l'efficacité d'application de certains articles examinés dans le domaine de l'irrigation et la technologie de RCSF pour réaliser une agriculture de précision.

Tableau 5.2 Efficacité d'application de certains articles examinés dans le domaine de l'irrigation et le RCSF.

Méthode d'irrigation / Modèle / Technologie	Efficacité de l'application	Référence
Drip hole spacing	- Des économies d'eau allant jusqu'à 90 % par rapport aux pratiques d'irrigation traditionnelles	Gutiérrez et al. [233]
Linear programming Model	- Réduction de la consommation d'eau de 28,5%	Difallah et al. [241]
SCADA based Wireless Sensing Irrigation system	- Conservation d'environ 2150 cusecs d'eau par an - Augmentation de la productivité de terres d'environ 20 à 25%	Katyara et al. [244]
Individual sprinkler control / Variable-rate irrigation	- Économies d'eau annuelles moyennes de 21,8 à 26,3	Hedley et Yule [339]
Equalized Cluster Head Election Routing Protocol	- Amélioration de la durée de vie du réseau en utilisant le protocole ECHERP, jusqu'à 1825 minutes	Nikolidakis et al. [230]
WSAN-based DSS	- Economie d'eau améliorée	Viani et al. [236]
Drip irrigation / IOS /Android	- Ajustement de la quantité d'eau nécessaire aux stades de croissance des plantes - Economies d'énergie et de coûts significatives	Işik et al. [245]
Ambient crop field monitoring using a mobile sink	- Réduction de la consommation d'énergie de 0,0115 J dans le réseau - Augmentation des rendements des cultures	Khan et Kumar [254]
Automotive irrigation / Multi-agent system	- 15,06% de réduction de la consommation d'eau par rapport à l'irrigation automobile traditionnelle	González-Briones et al. [249]

Et la Figure 5.6 montre les avantages d'application des réseaux de capteurs sans fil dans l'irrigation pour différents acteurs (p. ex., les agriculteurs).

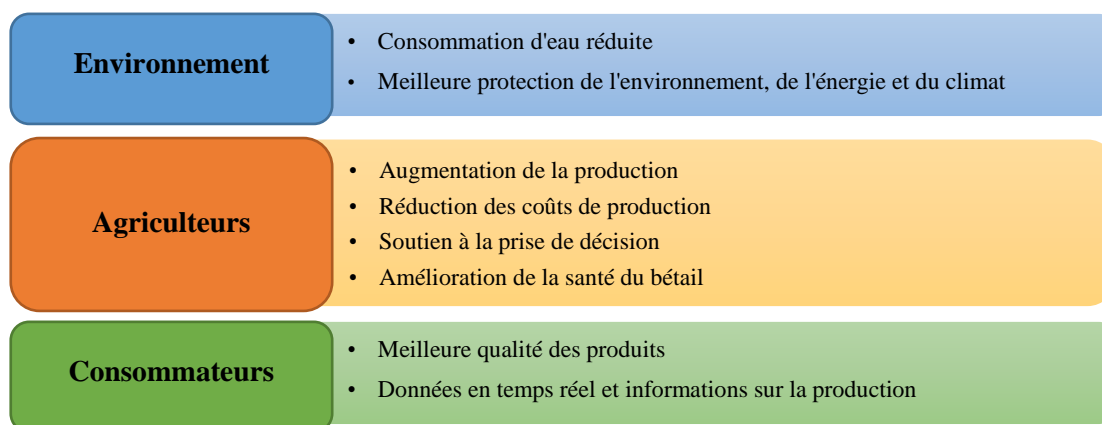


Figure 5.6 Avantages des RCSF dans l'irrigation pour différents acteurs.

5.7 Analyse SWOT de l'utilisation des RCSF dans le domaine d'irrigation

L'analyse SWOT [375] est un outil d'analyse utile pour comprendre et évaluer une technologie, une solution ou une entreprise. L'analyse SWOT vise à identifier les principaux facteurs internes (forces et faiblesses) et externes (opportunités et menaces) qui peuvent affecter le succès d'une cible analysée. L'analyse SWOT a été appliquée dans de nombreux domaines tels que l'industrie, la gestion et l'ingénierie.

Selon la Commission européenne [376], une analyse SWOT est définie comme « un outil d'analyse stratégique. Elle combine l'étude des forces et faiblesses d'une organisation, d'un territoire, d'un secteur, d'une politique, d'un programme de développement, d'un plan d'action, etc. avec celle des atouts et des menaces de son environnement, afin d'aider à la définition d'une stratégie de développement ».

L'analyse SWOT est une méthode utilisée pour analyser et positionner les ressources et l'environnement d'une cible analysée selon quatre paramètres : forces, faiblesses, opportunités et menaces [377]. Les forces et les faiblesses sont souvent d'ordre interne, tandis que les opportunités et les menaces se concentrent généralement sur l'environnement extérieur.

Sur la base des études que nous avons menées au quatrième chapitre et au présent chapitre, nous avons effectué une analyse SWOT pour évaluer les forces, les faiblesses, les opportunités et les menaces de l'utilisation du RCSF en irrigation au Maroc afin de mieux comprendre cette utilisation et de diagnostiquer les avantages et les inconvénients de ce type d'application. En outre, ce type d'analyse n'a pas été largement réalisé par les chercheurs dans ce domaine.

5.7.1 Forces (Strengths)

A travers cette étude, il s'avère que le RCSF devient un choix pour de nombreux systèmes qui nécessitent une haute précision, comme c'est le cas dans les systèmes d'irrigation qui profitent de ses avantages. L'un des principaux atouts de l'utilisation des réseaux de capteurs sans fil dans l'irrigation est d'assurer une utilisation rationnelle et une application précise de l'eau, ce qui permet de réaliser d'importantes économies d'eau, d'augmenter les rendements et d'améliorer la qualité de la production agricole. Cette utilisation permet également de réduire les besoins de main-d'œuvre dans le système d'irrigation. De plus, les principales caractéristiques du RCSF permettent de fournir des solutions économiques et efficaces pour soutenir et améliorer les systèmes d'irrigation. Un RCSF dans un système d'irrigation peut être constitué d'un grand nombre de nœuds, de plusieurs dizaines à des milliers, qui sont de petite taille et hétérogènes (p. ex., des nœuds de capteurs de sol et des nœuds de capteurs d'air). Un RCSF peut également s'adapter à différents environnements et fonctionner de manière autonome sans surveillance dans des zones éloignées ou hostiles et permettre une surveillance des données en temps réel, permettant un mode de fonctionnement avancé dans les applications d'irrigation.

5.7.2 Faiblesses (Weaknesses)

Bien que le réseau de capteurs sans fil ait de nombreux atouts pour les systèmes d'irrigation, il présente quelques faiblesses. L'une de ses principales faiblesses est le coût global élevé du matériel et des logiciels pour le réseau de capteurs sans fil, qui représente l'obstacle le plus important à l'utilisation généralisée du RCSF dans le domaine de l'irrigation au Maroc. L'une de ses faiblesses est également sa sécurité limitée. De plus, la contrainte d'énergie est un facteur critique dans tout système qui repose sur les RCSF, y compris les systèmes d'irrigation ; le nœud de capteurs contient généralement une source d'énergie limitée et restreinte, de sorte que la durée de vie du système basé sur les RCSF est limitée en raison de la durée de vie limitée de la batterie du nœud de capteurs. La capacité de stockage et la puissance de calcul peuvent également être limitées dans un nœud de capteurs.

5.7.3 Opportunités (Opportunities)

Le Maroc, depuis son indépendance, a mis le domaine agricole au cœur de ses choix de développement en raison des enjeux majeurs que ce secteur soulève au niveau territorial, social, environnemental et économique. Ce dernier s'est distingué au cours des décennies par

ses effets d'entraînement sur l'ensemble de l'économie nationale par ses performances propres que par ses interactions avec les autres secteurs, en tant que premier secteur créateur de richesses et employeur le plus important du pays [34]. Pour promouvoir le secteur agricole, le Maroc a lancé un ensemble de nouvelles stratégies de développement agricole. Au cours de la dernière décennie, le secteur agricole a connu un tournant majeur avec le lancement du PMV en 2008, un programme qui définit la politique agricole du Royaume du Maroc et insuffle une nouvelle dynamique au secteur agricole [33], [115]. Par ailleurs, en 2020, un nouveau programme de développement agricole a été lancé, le plan « Génération Green 2020-2030 », une nouvelle stratégie qui définit les traits du développement de l'agriculture au Maroc pour les dix prochaines années et constitue une suite logique du PMV [378], [379]. Nous pouvons donc considérer que l'encouragement du gouvernement marocain à faire progresser les différents domaines du secteur agricole est l'une des principales opportunités à saisir pour parvenir à une large utilisation des réseaux de capteurs sans fil dans les systèmes d'irrigation. Par ailleurs, l'agriculture au Maroc s'appuie encore largement sur des méthodes conventionnelles, de sorte qu'il y a encore d'énormes opportunités à saisir sur le marché local. Les réseaux de capteurs sans fil ont également de nombreuses opportunités qui les rendent très adaptés à une utilisation dans l'irrigation, notamment plus d'innovation et des développements technologiques très rapides, c'est-à-dire de nouvelles technologies et de nouveaux produits.

5.7.4 Menaces (Threats)

La WB a mis en garde contre l'impact du changement climatique sur le Maroc, à travers une étude qu'elle a réalisée, dans laquelle elle conclut que le Maroc souffrira à l'avenir du réchauffement climatique et de son impact sur les principaux secteurs d'activité [380]. En effet, un climat plus sec et plus chaud se traduit par une augmentation des températures moyennes, des sécheresses plus fréquentes, des vagues de chaleur, une pénurie d'eau et des inondations. La situation au Maroc risque de s'aggraver selon les scénarios les plus optimistes. D'après cette étude [380], une réduction des précipitations moyennes de 10% à 20% est prévue d'ici 2050 ainsi qu'un changement du régime des précipitations avec des pluies fortes plus fréquentes et concentrées. Les températures moyennes annuelles ont augmenté de 1°C à travers le Maroc à l'horizon 2020, et les prévisions indiquent également une augmentation de 1 à 1,5°C d'ici 2050 [381], [382]. Par ailleurs, le Maroc souffre de sécheresses de plus en plus sévères et fréquentes ces dernières années [383]. Entre 1940 et 1979, il y a eu 5 sécheresses en 40 ans, et ce nombre a doublé entre 1980 et 2002, soit 10 sécheresses. Les périodes de

sécheresse devraient s'étendre sur 5 jours d'ici 2100 [381]. Par conséquent, le changement climatique et ses effets attendus, tels que l'augmentation de la température moyenne, l'augmentation et la fréquence des sécheresses et la pénurie d'eau, font partie des principales menaces associées au secteur agricole, notamment à l'irrigation, et menacent également l'utilisation généralisée des RCSF dans le domaine d'irrigation. Une autre menace qui pourrait être envisagée est l'appréhension des agriculteurs et leur réticence à utiliser les nouvelles technologies comme les RCSF. Par ailleurs, les principales menaces pesant sur les RCSF dans le domaine d'irrigation sont les dommages aux nœuds de capteurs, l'indisponibilité de leurs composants et l'exposition des nœuds de capteurs déployés à des conditions environnementales extrêmes. Une température relative élevée peut endommager, dysfonctionner ou surchauffer les composants électroniques du nœud. De même, l'humidité relative élevée peut endommager ou dysfonctionner les composants électroniques du nœud. Les nœuds de capteurs déployés peuvent également être endommagés en raison d'une mauvaise manipulation par les humains ou les animaux sur les terres agricoles à irriguer. Un résumé de l'analyse SWOT est présenté dans la Figure 5.7.

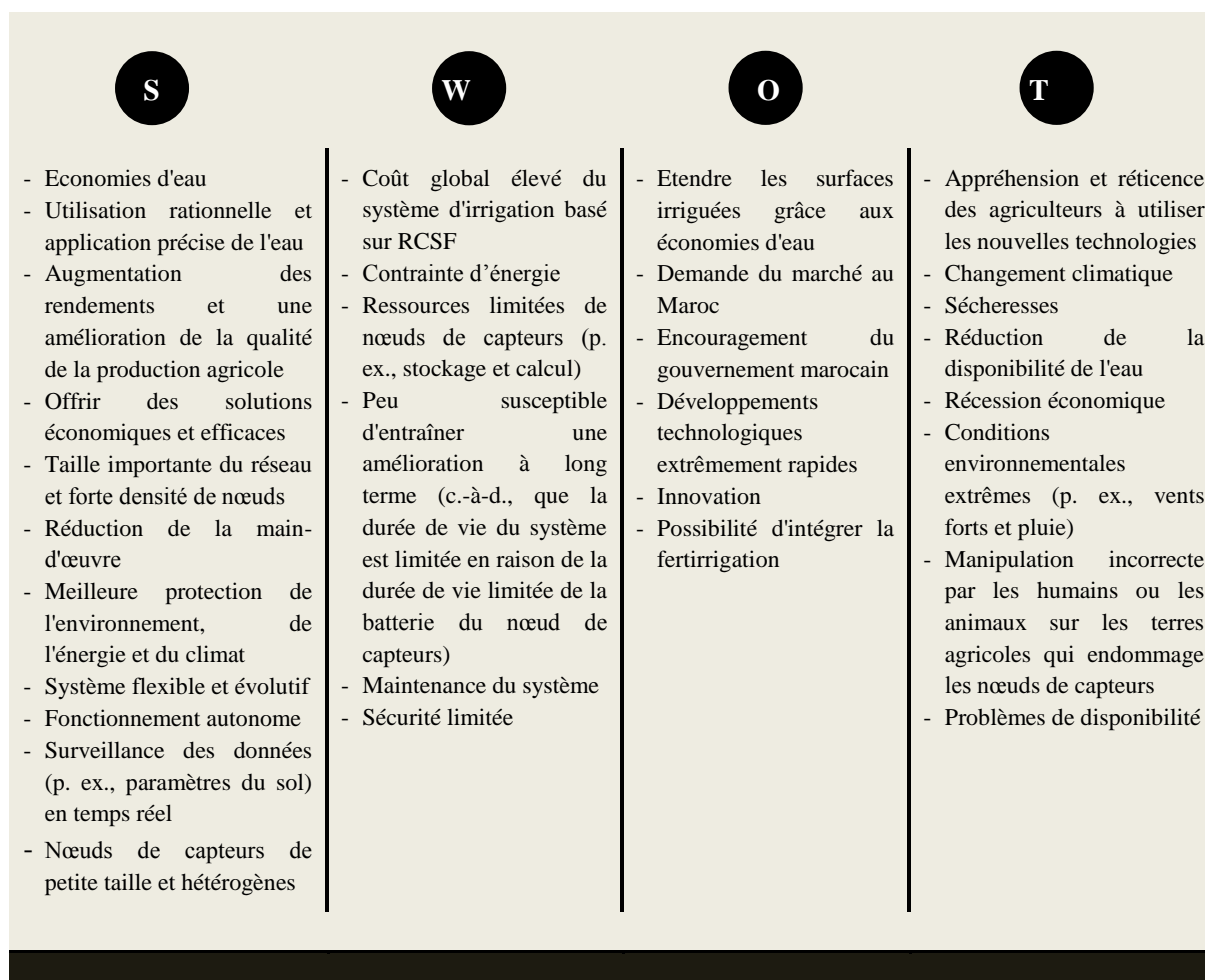


Figure 5.7 Analyse SWOT de l'utilisation du RCSF en irrigation.

5.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé trois aspects liés aux réseaux de capteurs sans fil dans le domaine de l'irrigation. Nous avons analysé un ensemble de facteurs clés affectant la conception et la mise en œuvre de réseaux de capteurs sans fil, notamment le déploiement des nœuds de capteurs, la tolérance aux pannes, la durée de vie du réseau, la topologie du réseau et le facteur d'échelle. Ensuite, nous avons étudié et analysé les principaux facteurs affectant les réseaux de capteurs sans fil dans le domaine de l'irrigation, notamment le placement du nœud de capteurs, la taille et le déploiement du nœud de capteurs, la consommation et la gestion de l'énergie, le coût du système et le boîtier du nœud de capteurs. En outre, nous avons proposé un ensemble de procédures et de solutions qui doivent être suivies pour surmonter les défis de l'utilisation d'un réseau de capteurs sans fil en irrigation. Nous avons également mis en évidence plusieurs facteurs d'amélioration pour parvenir à un système d'irrigation efficace et cohérent en utilisant le RCSF. Enfin, nous avons mené une analyse SWOT pour évaluer l'utilisation du RCSF en irrigation au Maroc dans le but de mieux comprendre ce type d'application, soulignant l'importance de la technologie RCSF dans l'irrigation en mettant en évidence ses avantages.

Le prochain chapitre présentera notre troisième contribution à cette thèse. En effet, dans le chapitre suivant, nous présenterons et détaillerons une solution proposée pour un système d'irrigation intelligent utilisant le réseau de capteurs sans fil.

Chapitre 6

Systeme d'irrigation intelligent en utilisant les RCSF

Sommaire

6.1	Introduction.....	200
6.2	Méthodologie proposée.....	201
6.3	Analyse fonctionnelle.....	205
6.4	Etude conceptuelle.....	210
6.5	Outils et technologies utilisés.....	220
6.6	Prototype et architectures du système.....	227
6.7	Sous-systèmes et flux de travail du système.....	235
6.8	Conclusion.....	244

6.1 Introduction

Actuellement, de nouvelles technologies telles que les réseaux de capteurs sans fil sont utilisées pour soutenir le secteur agricole, afin d'améliorer les performances de ce secteur et résoudre ses problèmes. Les réseaux de capteurs sans fil sont devenus une technologie très importante capable de gérer, détecter, transmettre et traiter des données environnementales de manière autonome sans intervention humaine. L'irrigation est considérée comme l'un des services agricoles garantissant le succès de l'agriculture. L'utilisation de réseaux de capteurs sans fil dans la gestion et le contrôle des systèmes d'irrigation est une solution idéale pour éviter une irrigation excessive et préserver l'eau tout en développant le secteur agricole et en diminuant la crise de l'eau dans le monde.

Dans ce chapitre, nous proposerons un système d'irrigation intelligent. Le système proposé est basé sur un réseau de capteurs sans fil, qui utilise un ensemble de nœuds de capteurs spécifiques pour effectuer des mesures des caractéristiques météorologiques et du sol pour aider à la prise de décision en irrigation, le tout afin de contrôler correctement le système d'irrigation.

Ce chapitre est scindé en cinq parties. Dans la première partie, nous proposerons une méthodologie pour la mise en œuvre d'un système automatisé typique pour gérer intelligemment l'irrigation à l'aide de RCSF en définissant un ensemble de règles de base, d'étapes et de procédures à suivre ainsi qu'une structure typique pour ce système d'irrigation intelligent. Dans la seconde partie, nous effectuons une analyse fonctionnelle du système d'irrigation proposé en présentant le diagramme bête à corne, le diagramme pieuvre et la carte mentale pour définir clairement et formaliser les objectifs de ce système. Une étude conceptuelle du système proposé sera présentée en troisième partie. Ensuite, nous présenterons et décrirons l'ensemble des technologies, des méthodes et des outils qui seront utilisés dans le système, à savoir le système d'irrigation, la technologie de communication sans fil et les types de capteurs utilisés. Une description détaillée du système proposé sera également présentée, dans laquelle le prototype et les architectures du système proposé, ainsi que les sous-systèmes et le flux de travail du système seront exposés.

6.2 Méthodologie proposée

En raison du développement technologique rapide et aussi de l'existence de nombreuses conditions différentes telles que divers systèmes d'irrigation, différents capteurs, divers types de sol et de cultures, ainsi que diverses technologies, il est compliqué de suggérer et de développer un scénario standardisé pour toutes les conditions et situations afin d'utiliser le réseau de capteurs sans fil dans le domaine de l'irrigation. Néanmoins, cela ne nous empêche pas de définir un ensemble de règles de base, d'étapes et de procédures à suivre dans la mise en œuvre d'un système automatisé typique pour gérer intelligemment l'irrigation à l'aide de réseaux de capteurs sans fil.

6.2.1 Règles de base

Pour mettre en œuvre un système automatisé permettant de gérer intelligemment l'irrigation en utilisant des réseaux de capteurs sans fil, nous devons tout d'abord nous arrêter à plusieurs règles de base, dont les plus importantes sont :

- (i) Il est nécessaire de développer une interface de communication simple et compréhensible pour une communication efficace avec l'utilisateur, qui pourrait être l'agriculteur,
- (ii) Le système développé ne doit pas être affecté par les différentes phases de croissance des cultures,
- (iii) Le système ne doit pas être affecté également par les différents changements climatiques,
- (iv) Le système d'irrigation doit être capable de fournir et d'appliquer la quantité d'eau nécessaire pour répondre aux besoins en eau des cultures,
- (v) Le système doit assurer une réponse rapide en temps réel.

6.2.2 Procédures et étapes

En outre, nous devons envisager un ensemble de procédures et d'étapes pour créer un système d'irrigation intelligent automatisé qui repose sur des réseaux de capteurs sans fil, comme le résume le Tableau 6.1.

Tableau 6.1 Procédures et étapes pour la mise en place d'un système d'irrigation intelligent utilisant RCSF.

1	Déploiement d'un groupe de nœuds de capteur dans la zone à irriguer afin mettre en place un réseau de capteurs sans fil,
2	Surveillance des paramètres du sol (par exemple, la température et l'humidité) et des paramètres météorologiques (par exemple, la température, la vitesse du vent et l'humidité) à des moments prédéterminées en fonction du type de sol et de culture utilisés,
3	Traitement des données mesurées et transmission des données obtenues au nœud de coordination pour une analyse plus approfondie,
4	Exploitation et utilisation des données traitées par le nœud de coordination de manière à ce que l'unité de contrôle prenne la décision d'ouvrir ou de fermer l'électrovanne, et donc d'activer ou de désactiver le système d'irrigation,
5	Enregistrement et sauvegarde des données traitées dans une base de données pour un usage ultérieur.
6	L'envoi d'alertes à l'utilisateur via la technologie GSM si nécessaire.

6.2.3 Structure typique

La détermination de la structure d'un système d'irrigation intelligent est l'une des étapes les plus importantes qui peuvent fournir une efficacité optimale pour la gestion du système d'irrigation. Principalement, un système automatisé de gestion intelligente de l'irrigation à l'aide de réseaux de capteurs sans fil inclure les composants énumérés ci-dessous (voir Figure 6.1).

6.2.3.1 Nœuds de capteur

Dans le domaine de l'irrigation, les nœuds de capteurs peuvent être des nœuds de capteur météorologiques et / ou des nœuds de capteurs de sol. Le nombre de nœuds de capteurs dispersés dans la zone à irriguer varie en fonction de la surface du champ. De plus, en fonction des besoins et des exigences des systèmes d'irrigation développés, le type de nœuds de capteurs utilisés est décidé.

De nombreux capteurs peuvent être utilisés dans l'irrigation, les capteurs liés au sol tels que EC-5, VH 400, Sensor S8000 pH et TDR-3A et les capteurs météorologiques tels que SHT85, HMP35C, DS18B20 et Wind Monitor Modèle 05103.

6.2.3.2 Station de base

La station de base sert de point d'entrée au réseau de capteurs sans fil. Il s'agit d'un nœud doté de puissantes fonctionnalités pour la collecte et le traitement des données détectées et mesurées par les nœuds de capteurs. Elle permet également le transfert de ces données vers un nœud coordinateur pour une analyse plus approfondie.

6.2.3.3 Réseau de transmission

Les nœuds de capteur sont connectés et communiqués entre eux et à la station de base, et la station de base au nœud coordinateur par une technologie de communication sans fil pour la transmission des données collectées et traitées.

Il existe de nombreuses technologies de communication sans fil différentes. Pour choisir un protocole de communication sans fil, il est nécessaire de prendre en compte de nombreux paramètres, dont les plus importants sont : la portée et la taille de la zone, le budget défini et le nombre maximum de nœuds déployés.

La plupart des applications utilisant le RCSF nécessitent une faible consommation d'énergie et un transfert sur de longues distances de petites quantités de données. Le protocole ZigBee est le mieux adapté à une utilisation dans le réseau de capteurs sans fil, et il constitue donc le meilleur choix pour les types d'applications de surveillance en temps réel comme les applications RCSF dans l'irrigation.

6.2.3.4 Nœud coordinateur

Le nœud coordinateur effectue des analyses complémentaires pour vérifier et identifier les données mesurées. Il permet également le stockage de ces données dans une base de données, ce qui permet aux agriculteurs d'afficher plus facilement l'état des zones irriguées et donc d'aider à la prise de décision en matière d'irrigation. En outre, ce nœud transmet des ordres à de nombreux autres nœuds pour gérer correctement l'irrigation à l'aide de RCSF.

6.2.3.5 Surveillance du terminal et exploitation des données traitées

La décision d'irrigation sera prise sur la base de la vérification des données traitées et de leur analyse avec des valeurs seuils pour chaque paramètre mesuré. L'état de la terre à irriguer

pour les agriculteurs est affiché via une application en ligne utilisant par exemple un smartphone.

6.2.3.6 Systeme d'irrigation

Selon les résultats de la comparaison des données traitées avec les valeurs seuils, de sorte que si ces résultats sont inférieurs aux valeurs seuils, l'électrovanne s'ouvrira, et donc le système d'irrigation sera activé, et vice versa.

Il existe de nombreux systèmes d'irrigation, qui peuvent être classés en trois catégories principales : l'irrigation de surface, l'irrigation par aspersion et l'irrigation goutte à goutte. Le système d'irrigation goutte à goutte est le mieux adapté pour être utilisé avec le réseau de capteurs sans fil dans le domaine de l'irrigation. Cela est principalement dû au fait que l'irrigation goutte à goutte permet d'économiser beaucoup d'eau par rapport à d'autres systèmes et peut également être automatisée.

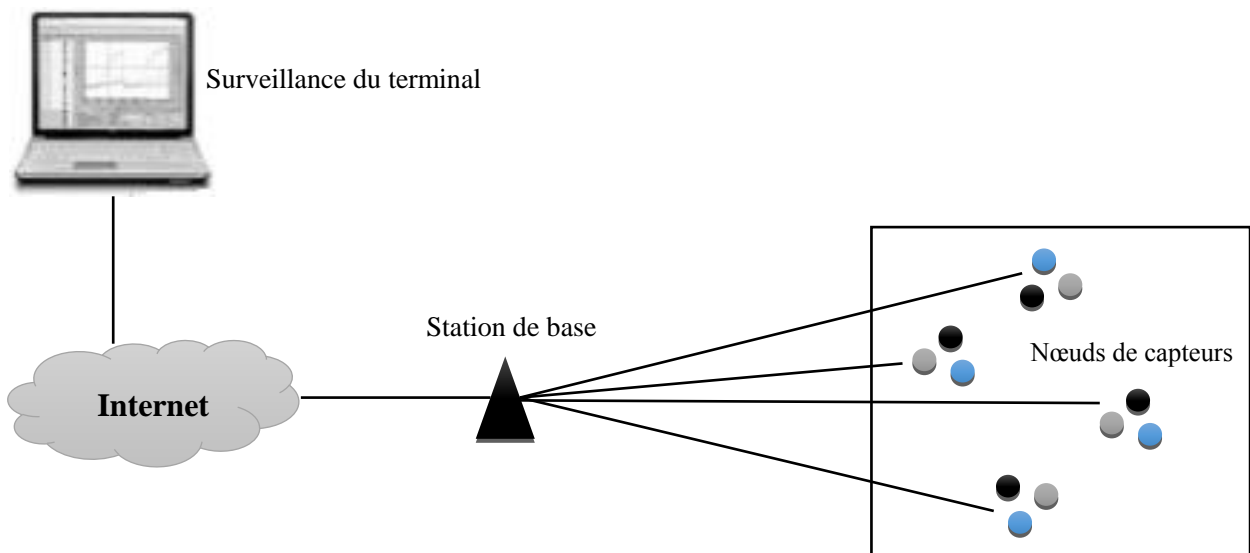


Figure 6.1 Structure générale d'un système d'irrigation intelligent typique.

6.3 Analyse fonctionnelle

Avant de procéder à la conception du système proposé, il est essentiel de définir clairement et de formaliser les objectifs de ce dernier. Cette étape est nécessaire car elle détermine la direction du travail à effectuer. Dans cette analyse fonctionnelle, nous présenterons trois outils : le diagramme bête à corne, le diagramme pieuvre et la carte mentale.

6.3.1 Bête à corne

Une bête à corne permet d'exprimer le besoin qui satisfait un système étudié en répondant à trois questions :

- À qui rend-il service ?
- Sur quoi agit-il ?
- Dans quel but ?

Pour notre système proposé, la réponse à ces trois questions est la suivante :

- À qui rend-il service ?

Le système d'irrigation intelligent en utilisant RCSF rend service à l'utilisateur final, c.-à-d., l'agriculteur.

- Sur quoi agit-il ?

Le système d'irrigation proposé agit sur l'eau, mais aussi sur la végétation et l'humidité des terres agricoles.

- Dans quel but ?

Comme nous l'avons déjà indiqué dans le chapitre précédent, les objectifs du système d'irrigation intelligent basé sur le RCSF sont multiples. Mais l'objectif principal est d'améliorer la performance et l'efficacité du système d'irrigation et assurer l'utilisation rationnelle et efficace de l'eau d'irrigation.

Nous résumons que le système d'irrigation intelligent utilisant RCSF aide l'agriculteur à améliorer la performance et l'efficacité du système d'irrigation et à assurer l'utilisation rationnelle et efficace de l'eau d'irrigation tout en régulant la quantité d'eau utilisée et les conditions de la terre agricole.

La bête à corne du système d'irrigation proposé est présentée à la Figure 6.2.

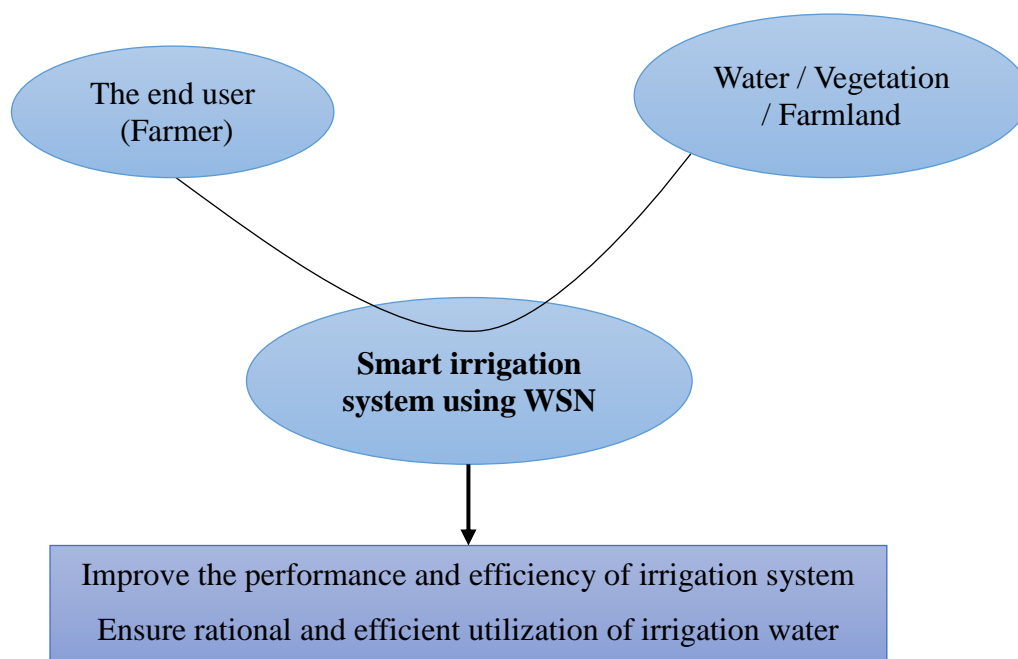


Figure 6.2 Diagramme bête à corne du système d'irrigation proposé.

6.3.2 Diagramme pieuvre

Un diagramme pieuvre est un diagramme des interactions qui permet de lister les éléments externes au système. Il aide à définir le périmètre du projet et à définir les fonctions que le système devra remplir et les contraintes qu'il devra respecter.

Les éléments environnant agissant sur le système d'irrigation proposé, comme indiqué sur la Figure 6.3, sont :

- RCSF / Capteurs,
- Paramètres du sol et les paramètres climatique,
- Terres agricoles / végétation,
- L'eau,
- Agriculteur,
- Environnement,
- Coût,
- Sécurité,
- Énergie,
- Entretien,
- Programmeur,
- Utilisation.

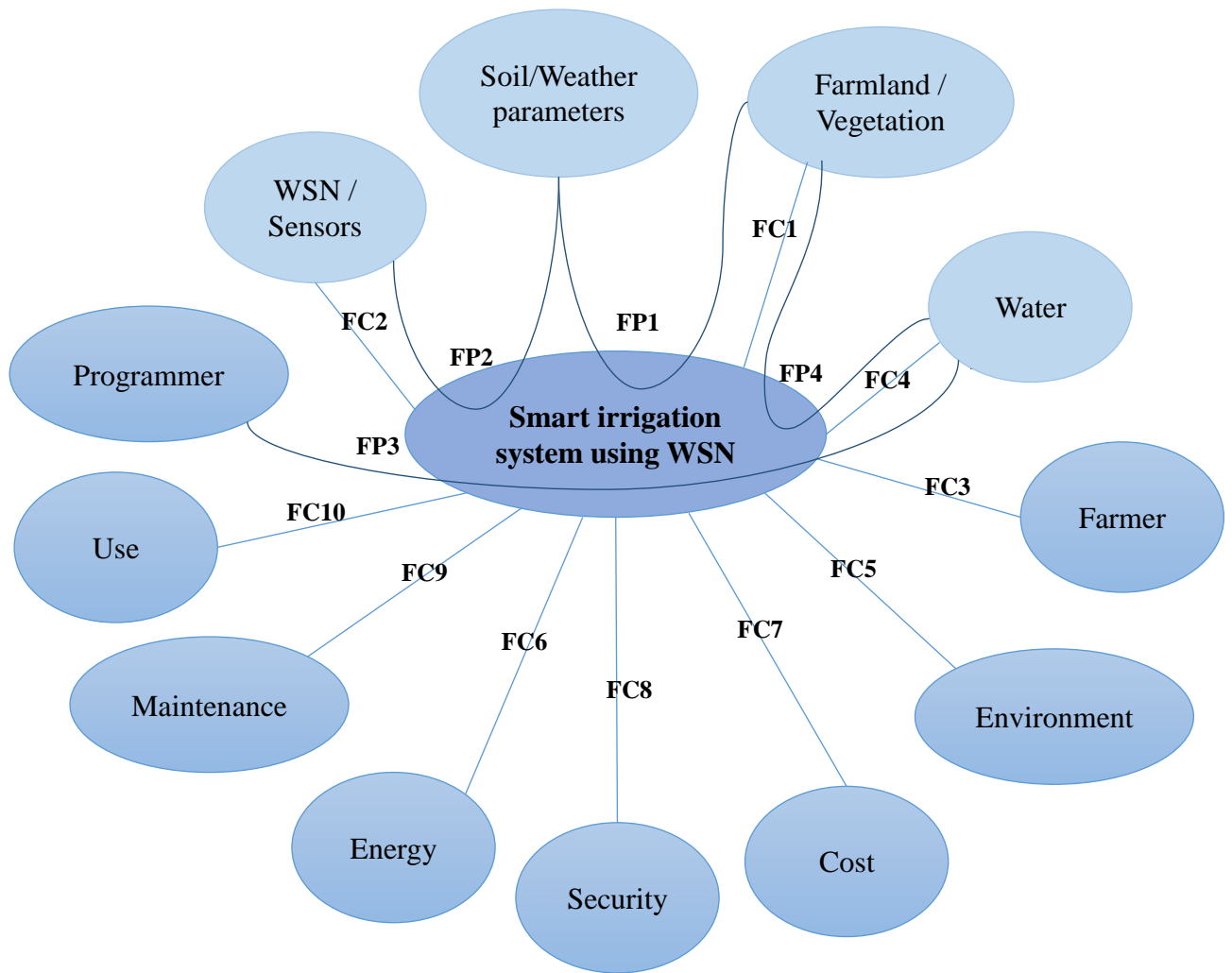


Figure 6.3 Diagramme pieuvre du système d'irrigation proposé.

➤ Fonction principale (FP) :

FP1 : Mesurer les paramètres du sol et les paramètres climatique de la terre agricole.

FP2 : Capturer les paramètres du sol et climatique de la terre agricole à l'aide de RCSF (capteurs).

FP3 : Maintenir une quantité d'eau optimale pour l'irrigation.

FP4 : Irriguer la terre agricole d'une manière optimale en gérant les réserves d'eau.

➤ Fonctions contraintes (FC) :

FC1 : Positionner l'arrosage en fonction des conditions de la terre agricole et de la végétation.

FC2 : RCSF aide à gérer l'irrigation d'une manière intelligente.

FC3 : Gérer l'arrosage à distance.

FC4 : Réaliser une gestion intelligente de l'eau.

FC5 : Se déclencher en fonction des conditions météorologiques.

FC6 : Etre autonome en énergie.

FC7 : Ne pas coûter très cher.

FC8 : Respecter les règles de sécurité.

FC9 : Faible maintenance du système est requise.

FC10 : Etre facile à utiliser.

6.3.3 Carte mentale

Une carte mentale est un outil qui aide à cerner et à organiser des idées autour d'un sujet, dans le but d'aider à créer des liens entre différentes informations.

Par exemple :

Le système proposé est directement lié à « l'eau » qui est dans un état dangereux, et l'irrigation est l'une des raisons qui contribuent à la grave pénurie d'eau. Dans ce sens, l'objectif principal du système est d'assurer une utilisation rationnelle et efficace de l'eau d'irrigation.

La carte mentale du système d'irrigation proposé est présentée à la Figure 6.4.



Figure 6.4 Carte mentale du système d'irrigation proposé.

6.4 Etude conceptuelle

Pour décrire le fonctionnement du système d'irrigation intelligent. Ainsi que montrer les différentes fonctionnalités souhaitées de ce système et décrire les différentes interactions trouvées. Dans cette partie, nous présentons les objectifs, le principe et la conception de la solution proposée.

6.4.1 Perception et prise de décision

La perception des différentes situations sont des tâches importantes pour le système d'être au courant et être conscient de l'environnement intérieur et extérieur.

6.4.1.1 Système d'irrigation

Pour déterminer si le sol est sec ou non, nous avons besoin de la température, de l'humidité et de l'humidité du sol.

D'après les données fournies par [13], [28], [118], nous pouvons fixer les seuils optimaux correspondant à chaque type de sol :

- Une zone de type « argile-limoneux » est humide si l'humidité du sol va être égale ou supérieure à 20%, sinon elle est sèche.
- Une zone de type « limoneux » est humide si l'humidité du sol varie entre 10 à 15%, sinon elle est sèche.
- Une zone de type « sablé » est humide si l'humidité du sol va être égale ou supérieure à 5%, sinon elle est sèche.

Après que nous avons testé si le sol est sec ou non, nous avons décidé d'autoriser l'irrigation ou non.

Si l'humidité du sol est inférieure à 20 dans le cas du sol argile-limoneux, la décision d'irrigation est prise (voir Figure 6.5).

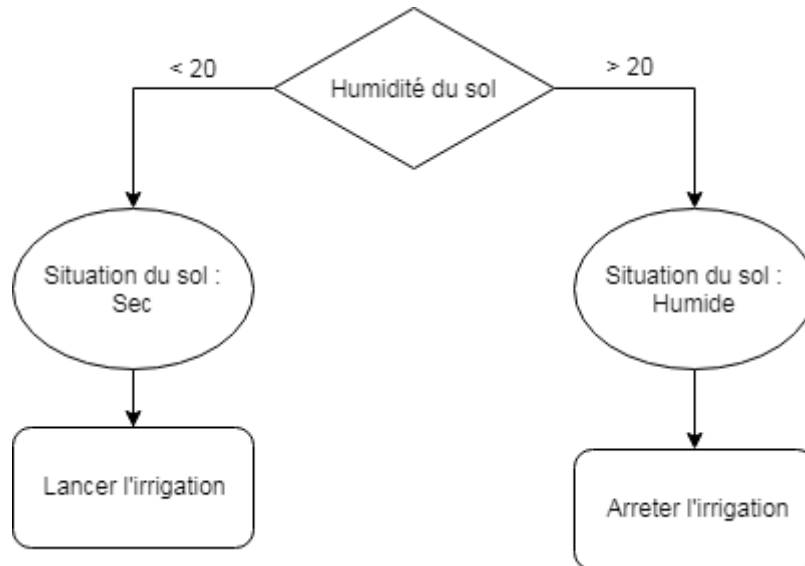


Figure 6.5 Arbre de décision pour la gestion de l'irrigation.

6.4.1.2 Réservoir d'eau

Pour déterminer également si le réservoir d'eau doit être rempli ou non, nous avons besoin du capteur de niveau d'eau. Si la valeur est inférieure à 1 litre, la pompe est activée pour remplir le réservoir (voir Figure 6.6).

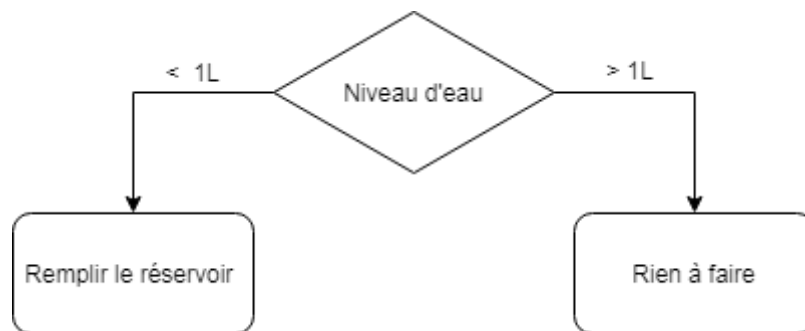


Figure 6.6 Arbre de décision pour la gestion du réservoir d'eau.

6.4.2 Conception du système

6.4.2.1 Diagrammes de cas d'utilisation

Un diagramme de cas d'utilisation est un diagramme UML qui permet de donner une vision globale du comportement fonctionnel d'un système. Il est utile pour donner une présentation auprès des différents acteurs d'un projet.

Un cas d'utilisation représente une unité discrète d'interaction entre un utilisateur (humain ou machine) et un système. Il est une unité significative de travail. Dans un diagramme de cas

d'utilisation, les utilisateurs sont appelés acteurs (actors), ils interagissent avec les cas d'utilisation (use cases).

i. Identification des acteurs

Un acteur est une entité externe au système et qui utilise un sous ensemble de ses fonctionnalités, il peut être une personne physique, un autre système, un équipement ou autre.

L'étude du système a permis d'identifier les différents acteurs qui rentrent en jeu :

- Administrateur
- Observateur
- Réseau de capteurs
- Capteur
- Electrovanne
- Pompe à eau

Le Tableau 6.2 liste l'ensemble des rôles pour chaque acteur.

Tableau 6.2 Rôles des acteurs.

Acteurs	Rôles
Administrateur	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Gestion de toutes les fonctionnalités offertes par l'application. ◦ Gestion des données de l'application telle que l'ajout, la suppression et la mise à jour de ces données. ◦ La consultation et la recherche des données selon un ensemble des conditions. ◦ L'impression des données.
Observateur	<ul style="list-style-type: none"> ◦ La consultation et la recherche des données selon un ensemble des conditions. ◦ L'impression des données.
Réseau de capteurs	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Contrôler de l'environnement pour permet aux capteurs de faire leurs rôles.
Capteur	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Charger de capter et de mesurer les paramètres du sol et les paramètres météorologiques.
Electrovanne	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Contrôler l'ouverture et la fermeture du passage de l'eau pour l'irrigation
Pompe à eau	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Utiliser pour s'assurer qu'une quantité adaptée d'eau entre dans le système

ii. Diagrammes de cas d'utilisation

A partir de toutes les fonctionnalités souhaitées du système proposé, on va représenter un diagramme de cas d'utilisation. Dans ce diagramme, on va situer les différents cas d'utilisation de notre application ainsi que ses différentes interactions avec le milieu extérieur, comme le montre la Figure 6.7.

Ce diagramme permet de représenter chaque acteur avec les différents cas d'utilisation qui lui sont rattachés. Les acteurs étant représentés par des personnages et les cas d'utilisation par des cercles.

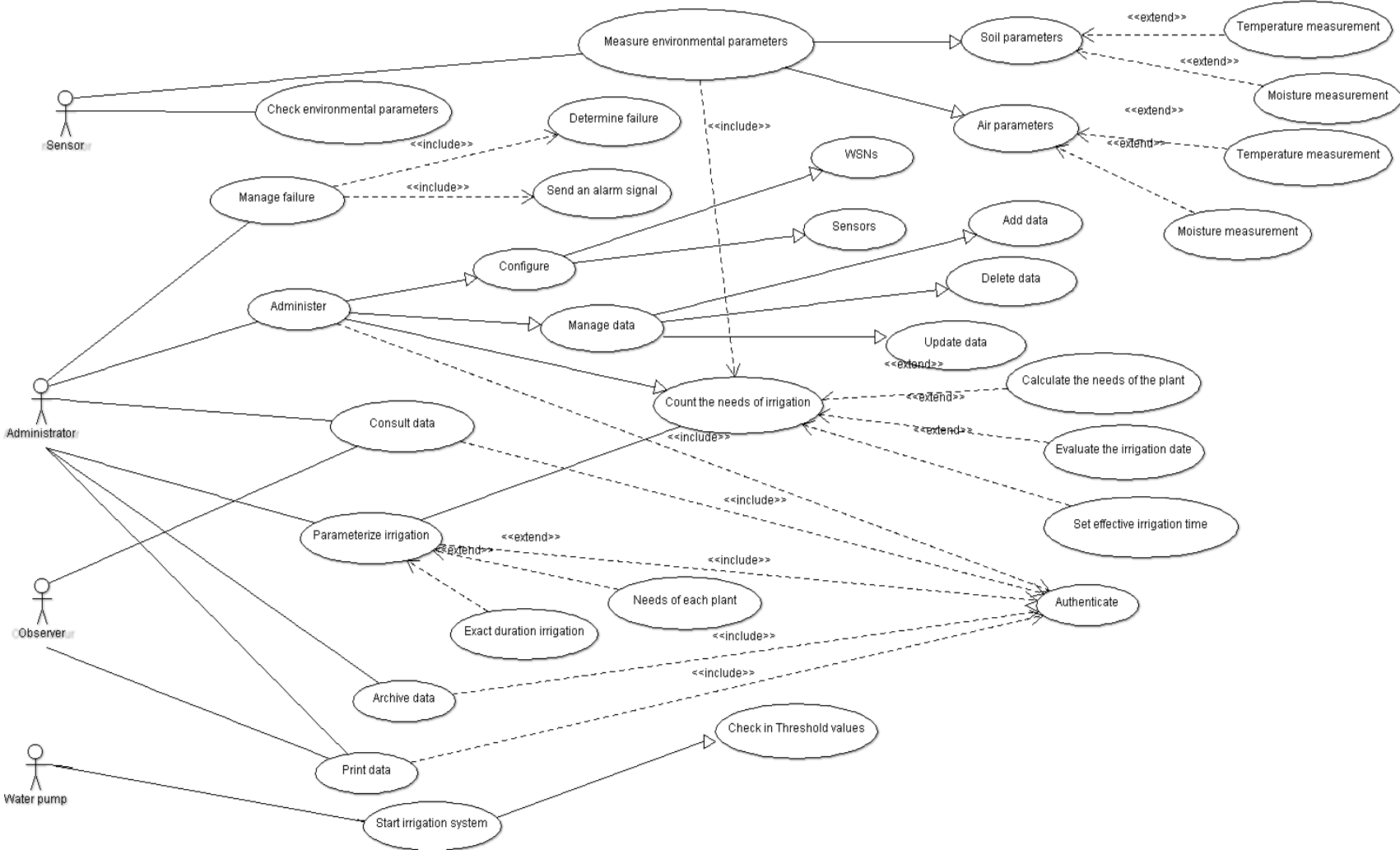


Figure 6.7 Diagramme de cas d'utilisation du système proposé.

6.4.2.2 Diagrammes de séquences

Un diagramme de séquences est une représentation graphique des interactions entre les acteurs et le système selon un ordre chronologique dans la formulation UML. Ainsi qu'il présente les échanges de messages entre objets, dans le cadre d'un fonctionnement particulier du système.

i. Gestion de réservoir d'eau

Pour gérer le réservoir d'eau, nous avons proposé le modèle illustré à la Figure 6.8. Ce modèle comprend les étapes suivantes :

- Après chaque irrigation, le système affiche la quantité d'eau restant dans le réservoir.
- Si le niveau d'eau dans le réservoir est inférieur à 1 litre.
- L'utilisateur choisit la taille de l'eau qu'il veut remplir le réservoir.
- Un module décision envoie un ordre à la pompe pour remplir le réservoir.

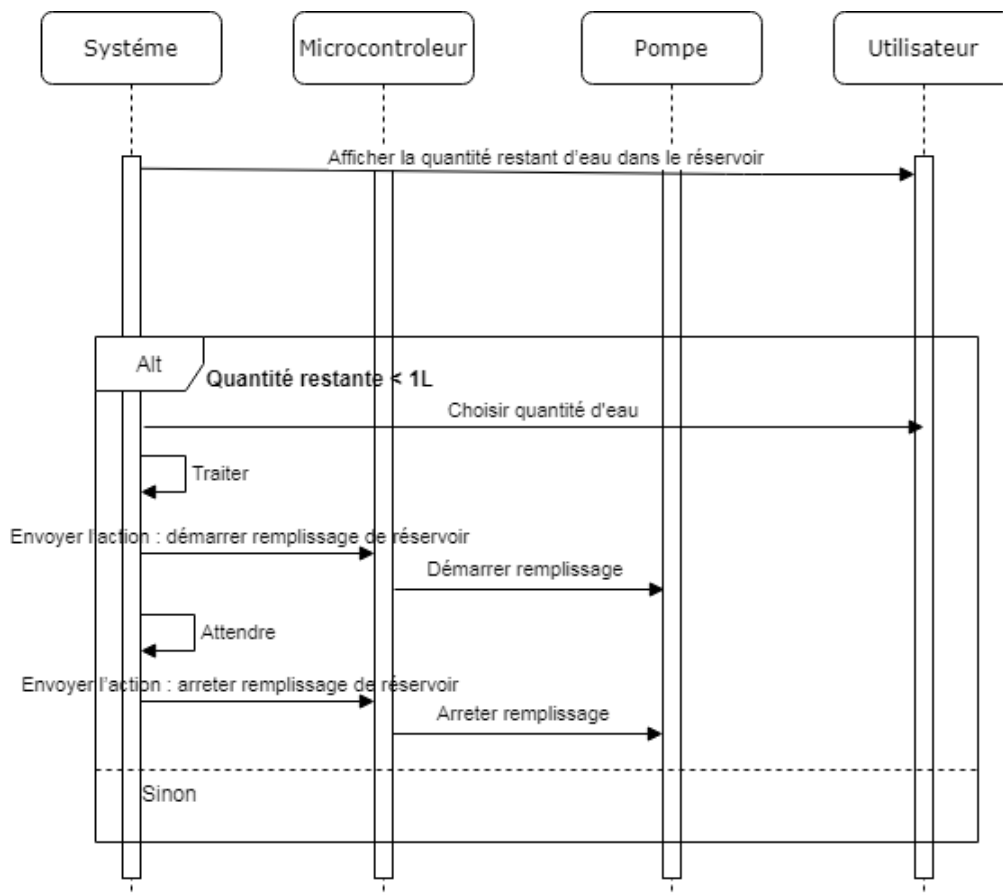


Figure 6.8 Diagramme de séquence de la gestion réservoir.

ii. Gestion d'irrigation

Pour gérer l'irrigation, nous avons proposé le modèle illustré à la Figure 6.9. Ce modèle comprend les étapes suivantes :

- Le capteur de température, le capteur d'humidité de l'air, le capteur d'humidité du sol et le capteur du pH du sol enregistrent les valeurs mesurées, ensuite les envoyées au microcontrôleur.
- Le microcontrôleur traite ces données et décide l'état du sol, qu'il soit sec ou non utilisant l'arbre de décision pour la gestion de l'irrigation (voir Figure 6.5).
- Un module de décision envoie des demandes d'ouverture ou de fermeture l'électrovanne pour l'irrigation.

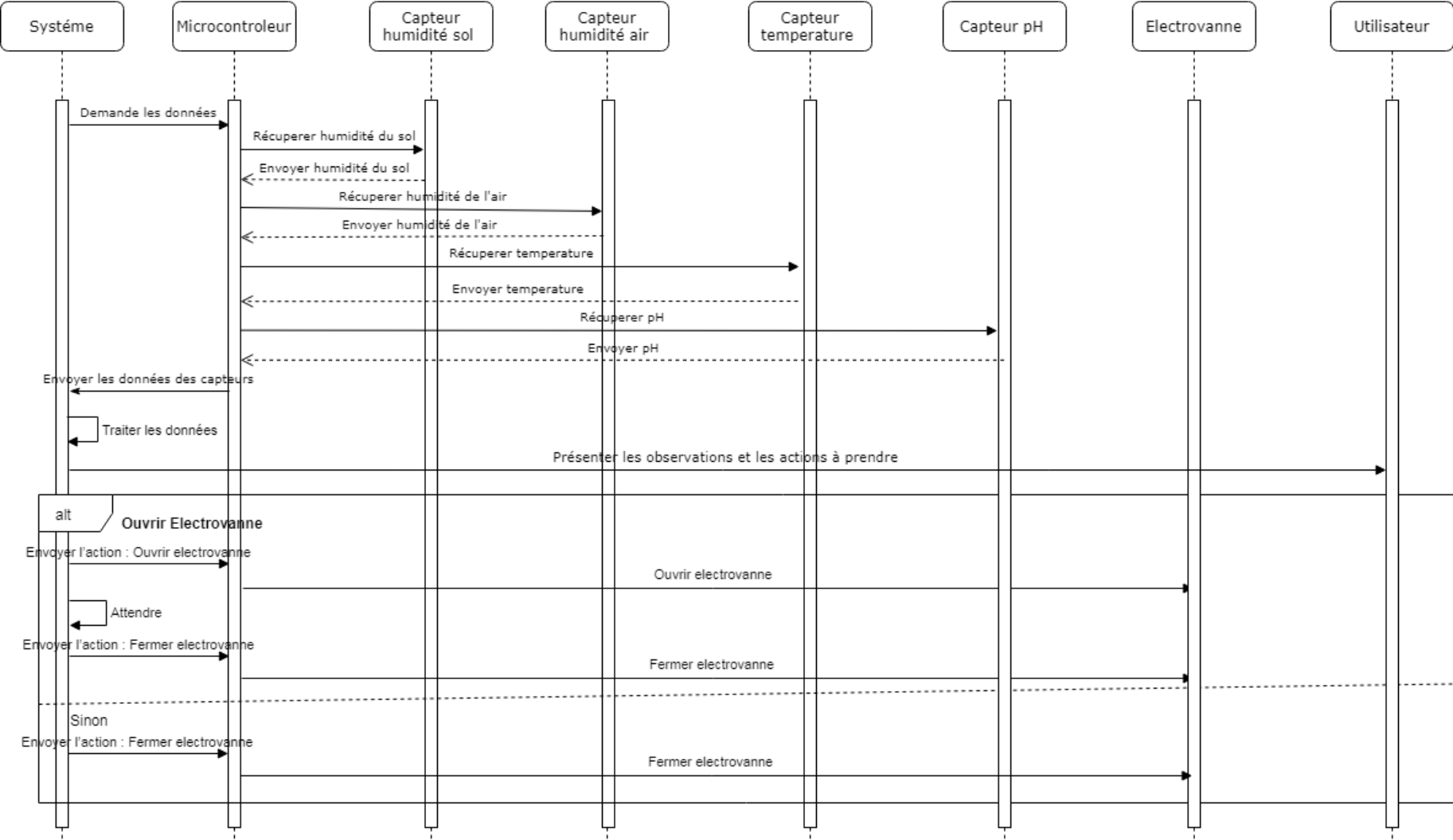


Figure 6.9 Diagramme de séquence de la gestion d'irrigation.

iii. Mesure des paramètres d'environnement (sol et climat)

Pour mesurer les paramètres d'environnement (sol et climat), nous avons proposé le modèle illustré à la Figure 6.10. Ce modèle comprend les étapes suivantes :

- Pour chaque période prédéfinie, le système capte des données du sol et météorologiques et fait des expériences.
- Le réseau de capteurs envoie les valeurs de l'expérience par des messages.

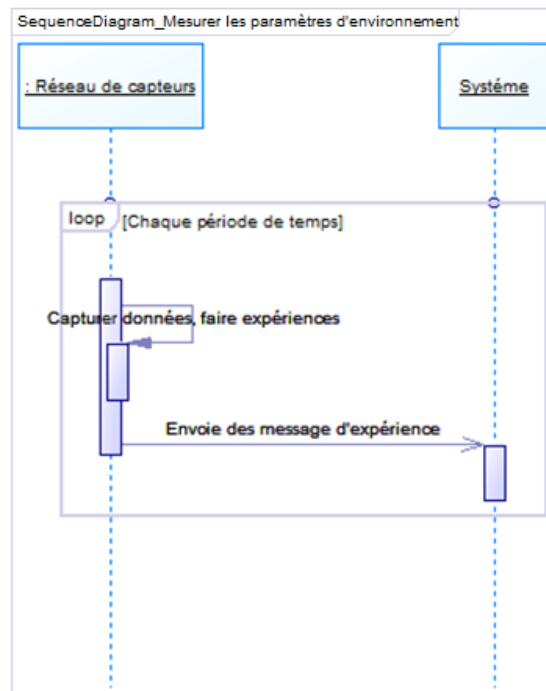


Figure 6.10 Diagramme de séquence de la mesure des paramètres d'environnement.

6.4.2.3 Diagramme de classes

Un diagramme de classe est un schéma qui permet de présenter les classes de système ainsi que les différentes relations entre celles-ci.

Une classe décrit les responsabilités, le comportement et le type d'un ensemble d'objets. Les éléments de cet ensemble sont les instances de la classe. Une classe est un ensemble de fonctions et de données (attributs) qui sont liées ensemble par un champ sémantique.

➤ Description des relations entre les classes

Parmi ces relations, nous citons :

- Un réseau de capteurs peut avoir un ou plusieurs capteurs.
- Un capteur appartient à un et un seul réseau de capteurs.
- Une ferme peut avoir une ou plusieurs zones.

- Une zone est appartient à une et une seule ferme.
- Un réseau de capteurs peut implémenter sur un ou plusieurs zones.
- Une zone est appartient à un et un seul réseau de capteurs.
- Un réseau de capteurs peut effectuer un ou plusieurs expériences.
- Une expérience est appartient à un et un seul réseau de capteurs.
- Un réseau de capteurs peut implémenter sur un ou plusieurs zones.
- Une zone est appartient à un et un seul réseau de capteurs.

Le diagramme des classes du système d'irrigation proposé est présenté à la Figure 6.11.

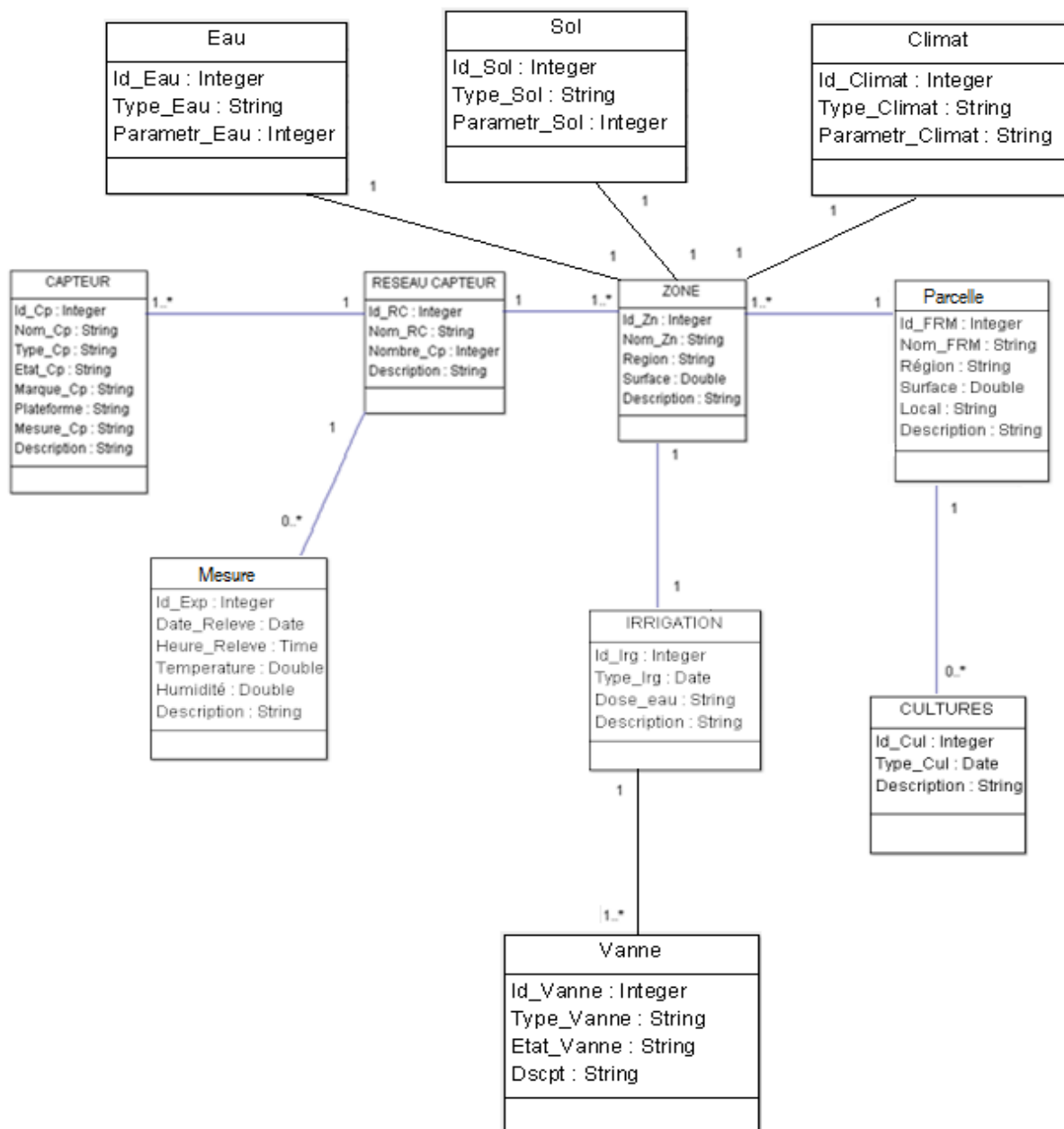


Figure 6.11 Diagramme de classes du système proposé.

6.5 Outils et technologies utilisés

Nous avons sélectionné un ensemble des technologies, méthodes et outils à utiliser pour le système proposé.

6.5.1 Système d'irrigation

L'irrigation est une opération qui permet d'apporter artificiellement l'eau sur le sol, et donc aux plantes cultivées. La technique d'irrigation est principalement utilisée pour couvrir le manque ou l'insuffisance d'eau d'origine naturelle (c.-à-d., d'eau de pluie) et dans les régions desséchées. Il existe actuellement de nombreux systèmes d'irrigation et peuvent être classés en trois catégories principales (voir Tableau 6.3).

- Irrigation de surface : est inclus toute technique d'irrigation où l'application et la distribution de l'eau sur la surface du sol est fait totalement à l'air libre en utilisant un écoulement par gravité. Elle est la plus répandue et le plus ancien dans le monde. L'utilisation de rivières, canaux, puits tubulaires profonds est observée dans ce type d'irrigation.
- Irrigation par aspersion : permet d'appliquer et distribuer l'eau sur la surface du sol sous formes de pluie artificielle. Dans ce type, l'eau est distribuée par un système de tuyaux sous pression, ensuite il est pulvérisé dans l'air à travers d'un ensemble des sprinkleurs sous forme de pluie.
- Irrigation goutte à goutte : est une méthode d'irrigation moderne qui économise beaucoup d'eau par rapport aux autres méthodes d'irrigation. Cette méthode permet de distribuer l'eau sous forme des gouttes en laissant l'eau s'écouler lentement jusqu'à la racine de plante à l'aide d'un ensemble de goutteurs distribués tout au long des rangées de cultures. Dans l'irrigation goutte à goutte, l'eau est appliquée fréquemment pendant de longues périodes à un faible débit, à une basse pression et avec des faible doses.

Tableau 6.3 Comparaison de différents systèmes d'irrigation.

	Irrigation de surface		Micro-aspersion	Goutte à goutte
	Aspersion sur frondaison	Aspersion sous frondaison		
Conditions requises				
Cultures arboricoles	Toutes les cultures (sauf les types sensibles à l'éclatement)	Toutes les cultures	Toutes les cultures	Toutes les cultures (l'adaptation pas liée à l'espèce mais au liée au système)
Type de sol	Tous types de sol	Tous types de sol	Tous types de sol	Sols à bonne conductivité hydrique.
Qualité de l'eau	En cas de présence de limon, taches sur les fruits	Rôle mineur	Filtration fine, 130 μ	<ul style="list-style-type: none"> Filtration très fine, 100μ, Double filtration en cas d'eau très trouble
Avantages / désavantages				
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> Lutte contre le gel Bassinage (folletage, coloration des fruits) Favorise l'humidité ambiante 	<ul style="list-style-type: none"> Favorise l'humidité ambiante, mais effet inférieur à celui de l'aspersion sur frondaison. Pas de lessivage des produits phytosanitaires 	<ul style="list-style-type: none"> Pas de lessivage des produits phytosanitaires Limite l'érosion du sol Bon pour les sols de faible profondeur Ne nécessite pas une grande qualité de l'eau Peut opérer sans surveillance 	<ul style="list-style-type: none"> Ferti-irrigation possible Irrigation des terrains accidentés Possibilité d'automatisation Limite l'érosion du sol Economie en main d'œuvre
Désavantages	<ul style="list-style-type: none"> Favorise certaines maladies Accentue l'érosion du sol Médiocre répartition de l'eau 	<ul style="list-style-type: none"> Accentue l'érosion du sol Médiocre répartition de l'eau Pas adapté à la lutte contre le gel 	<ul style="list-style-type: none"> Pas adapté à la lutte contre le gel Evaporation directe pendant l'irrigation 	<ul style="list-style-type: none"> Pas adapté à la lutte contre le gel Sensibilité à l'obstruction (sable, limon, matière organique,...)
Consommation d'eau	Elevée en raison des pertes par mauvaise répartition, évaporation, ruissellement, absence de localisation.	Elevée en raison des pertes par mauvaise répartition, évaporation, ruissellement, absence de localisation.	Economie possible par rapport à l'irrigation en plein.	<ul style="list-style-type: none"> Importante économie par rapport à l'irrigation en plein Economie possible par rapport à la micro-aspersion.
Aspects économiques Investissement	Elevé	Elevé	Moyen à élevé	Faible à moyen

À partir du Tableau 6.3, nous pouvons résumer que l'irrigation de surface consomme une quantité d'eau importantes par rapport aux autres systèmes, en plus c'est une techniques avec une faible efficience et nécessité toujours un terrain plat ou un nivellement. L'irrigation par aspersion consomme également plus d'eau que l'irrigation goutte à goutte, en plus cette technique peut affecter par les conditions météorologiques (par exemple, le vent peut affecter les modèle de mouillage) et peut favoriser le développement de maladies en aspergeant les feuillages. Alors que l'irrigation goutte à goutte se caractérise par de nombreux avantages par rapport à d'autres systèmes d'irrigation, tels la réduction de l'érosion des sols, la possibilité d'automatisation, la réduction du ruissellement et des économies d'eau significatives.

L'utilisation de l'irrigation goutte à goutte dans le système proposé est le meilleur choix et il sera très utile car un système d'irrigation goutte à goutte est la technique d'irrigation la plus efficace et adaptative pour avoir un système d'irrigation intelligent s'il est correctement géré.

6.5.2 Technologie de communication sans fil

D'après le résumé du Tableau 4.9, nous avons clairement remarqué que le Wi-Fi est une technologie qui nécessite des composants coûteux et utilise une bande passante élevée, ce qui nécessite beaucoup d'énergie. Le Bluetooth n'est utilisé que sur de courtes distances avec très peu de nœuds cellulaires, sa consommation d'énergie est également élevée et il est le mieux adapté pour connecter un équipement à un ordinateur ou des communications audio (comme des écouteurs). Bien que Zigbee se caractérise par une faible consommation d'énergie et un faible coût, de plus, le terminal ZigBee peut être mis en mode veille tout en maintenant sa connexion à son réseau. Zigbee est la technologie la plus efficace pour les applications à faible débit de données et à faible consommation d'énergie, elle est donc plus adaptée à une utilisation dans les réseaux de capteurs sans fil. En fonction des besoins du système proposé, nous pouvons choisir d'utiliser ZigBee comme technologie de communication sans fil.

6.5.3 Technologie réseaux de capteurs sans fil

Le réseau de capteurs sans fil est une nouvelle technologie qui promet une surveillance et un contrôle précis de la terre agricole à un coût inférieur. L'auto-organisation de RCSF qui permet d'avoir un déploiement rapide du réseau, la transmission des données collectées via des nœuds intermédiaire sans augmentation des coûts ou d'énergie, et la capacité de suivi du réseau en répondant aux besoins d'application spécifiques se sont parmi des importantes avantages de cette technologies qui nous amènons à choisir l'utilisation du réseau de capteurs

sans fil comme une technologie de coordination, de planification, de contrôle et de surveillance dans le système d'irrigation proposé.

6.5.4 Outils utilisés

6.5.4.1 Plate-forme TelosB

La plate-forme TelosB (voir Figure 6.12) a été élaborée et publiée à la communauté scientifique par l'université Berkeley. Cette plate-forme offre une faible consommation d'énergie permettant une longue autonomie de la batterie ainsi qu'un éveil rapide de l'état de veille. Le microcontrôleur TPR2420 utilisé dans TelosB, est compatible avec la distribution open-source de TinyOs. Ce type de nœud peut être utilisé dans les applications suivantes :

- Plate-forme à faible puissance pour le développement de la recherche.
- Expérimentation des réseaux de capteurs sans fil.

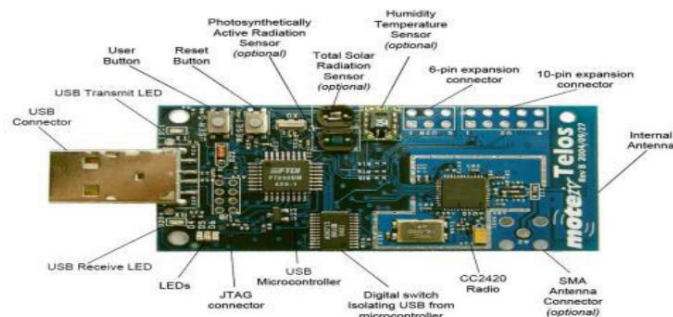


Figure 6.12 Plate-forme TelosB.

- Principales caractéristiques de TelosB :
 - Micro-contrôleur MSP430 de Texas Instrument cadencé à 8MHz, avec 10Kb de RAM et 48Kb de flash.
 - Radio Chipcon Wireless Transceiver CC2420 2.4GHz à 250kbps respectant la norme IEEE 802.15.4.
 - Convertisseurs analogique-digital et contrôleur DMA intégrés.
 - Liaison USB.
 - Très faible consommation électrique.
 - Temps de réveil inférieur à 6us.
 - Un support d'expansion 16 ports.
 - Encombrement réduit.
 - Supporté par TinyOS.
 - Optionnel intégré le capteur de température, de lumière et d'humidité.

- Différents composants matériels du TelosB :
 - Le Micro-contrôleur MSP430 : Le MSP430 contient un processeur RISC 16 bits et un système d'horloges flexible conçu spécialement pour une utilisation avec une batterie.
 - Le module radio CC2420 : Un module radio CC2420, conforme à la norme IEEE 802.15.4, travaillant sur une bande de fréquences comprise entre 2,4 GHz et 2,4835 GHz. Il permet de travailler sur 16 canaux étanches différents.

6.5.4.2 Description des capteurs utilisés

L'amélioration de la performance et l'efficacité des systèmes d'irrigation dépend d'un ensemble de critères liés au sol et d'un ensemble de critères météorologique. La solution proposée de gestion d'irrigation permet de surveiller et de mesurer les paramètres liés au sol : température du sol, humidité du sol et pH du sol et les paramètres météorologique : température de l'air, humidité de l'air et vitesse du vent. Pour atteindre cet objectif, plusieurs capteurs seront utilisés.

i. Capteur de température

Le capteur de température permet de mesurer et de détecter le degré de température d'un objet donné. Les capteurs de température du sol ont un grand avantage pour déterminer le type de culture approprié et fournir des alertes si la température dépasse des seuils spécifiques. En général, le capteur de température est une diode à jonction p-n, où l'équation (1) calcule la température en utilisant l'équation (2).

Où I_F est le courant direct de la diode de jonction p-n, T est la température absolue, k est la constante de Boltzmann, n a une valeur comprise entre 1 et 2 et q est l'amplitude de la charge électronique.

$$T \cong q \times \frac{V_F}{nK \times \log I_F} \quad (1)$$

$$I_F \cong \exp\left(\frac{qV_F}{nKt}\right) \quad (2)$$

ii. Capteur de teneur en humidité du sol

Le capteur de teneur en humidité du sol permet de mesurer le niveau de stress hydrique du sol pour signaler le quantum d'effort requis par le système racinaire de la plante lors de

l'extraction de l'eau du sol. Si l'effort requis pour extraire l'eau du sol est plus important, alors ce sol est classé comme sol plus sec. En général, le capteur de teneur en humidité du sol comprend deux électrodes montées dans un bloc de gypse, ce capteur convertissant la résistance électrique entre ces électrodes en bloc de gypse en une lecture calibrée de la teneur en humidité du sol [384]. L'équation (4) calcule la teneur en eau du sol en utilisant le résultat de la résistance mesurée [384].

Où R_{21} est la résistance à 21°C , R_s est la résistance mesurée, T_s est le paramètre de température du sol et dT est égal à $(T_s - 21)$.

$$R_{21} = \frac{R_s}{1 - (0.018 \times dT)} \quad (3)$$

$$\text{Soil Moisture Content} = \frac{(0.07407 \times R_{21}) - 0.03704}{0.03704} \quad (4)$$

iii. Capteur de pH

Le capteur de pH est utilisé pour mesurer les valeurs de pH. Dans le secteur agricole, si les valeurs du pH du sol sont en dehors de la plage de 5,5 à 6,5, le sol souffre d'un manque important de disponibilité des nutriments, donc ce problème doit être résolu par l'application d'engrais acides ou alcalins. En général, le capteur de pH se compose fondamentalement d'une électrode de référence et d'une électrode de mesure, et l'équation (5) définit la détermination potentiométrique de la valeur du .

Où R est la constante de gaz, F est la constante de Faraday, T est la température thermodynamique, $pH(S)$ représente la valeur de pH connue de la solution standard, $pH(X)$ représente la valeur de pH inconnue de la solution et $E(S)$ et $E(X)$ décrivent le potentiel d'électrode d'une cellule de pH contenant une solution standard avec un pH connu, $pH(S)$ et $pH(X)$ une solution avec un pH inconnu.

$$pH(X) = pH(S) + \frac{E(S) - E(X)}{R \times T / F \log 10} \quad (5)$$

iv. Capteur de vitesse du vent

Le capteur de vitesse du vent détermine la vitesse du vent de surface. En général, les vents à la surface de la Terre sont turbulents et se caractérisent par des fluctuations aléatoires de la direction et de la vitesse, le capteur de vitesse du vent permet de mesurer la valeur de la

vitesse du vent et la transmet sous forme de paramètre électrique. Ce type de capteur doit être monté à une hauteur appropriée où les zones de turbulences doivent être évitées.

6.5.4.3 Choix des capteurs utilisés

D'après les résultats des études réalisés dans le chapitre 4, nous avons choisi d'utiliser les capteurs suivants : le capteur d'humidité du sol « EC-5 Soil Moisture Sensor », le capteur de température « DS1822 » et le capteur « Sensor S8000 pH », le capteur de température « DHT11 », le capteur d'humidité « HMP35C » et le « Wind Monitor Modèle 05103 ».

i. Sonde Decagon diélectrique EC-5

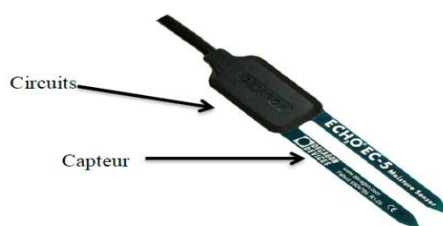


Figure 6.13 Plate-forme TelosB.

La sonde diélectrique EC-5 (voir Figure 6.13) est un capteur de teneur en eau du sol disponible dans le commerce fourni par Decagon Devices. Il mesure le constant diélectrique du sol à une technologie dans le domaine fréquentiel, il utilise 70 MHz pour le rendre insensible à la texture du sol. On mesure la teneur volumétrique en eau de 0 à 100% dans la détermination de l'humidité du sol. La teneur en eau volumétrique de la gamme de sol saturé de 40% à 60%. La gamme varie selon les différents types de sol.

Le circuit de la lecture de capteur comprend trois éléments à savoir: le détecteur de phase, l'oscillateur et le tampon. Le détecteur de phase est relié à la ligne de transmission du capteur et la sortie du circuit tampon. Pour placer le CE-5 dans le sol, il suffit de pousser le capteur jusqu'à ce que la profondeur désirée du sol.

6.5.4.4 Electrovanne et pompe

i. Electrovanne

Une électrovanne ou électrovalve est une vanne commandée électriquement. Grâce à cet organe, il est possible d'agir sur le débit d'un fluide dans un circuit par un signal électrique.

Nous avons choisi l'électrovanne DC12V G3/4 car il s'agit une électrovanne électrique de type simple et facile à utiliser, le laiton a une bonne performance antirouille, sûr pour être employé pour l'eau.

ii. Pompe

Le rôle de la pompe à eau est de remplir le réservoir. Nous avons choisi une pompe électrique pour le contrôle à distance.

6.6 Prototype et architectures du système

L'objectif du système d'irrigation intelligent proposé est d'utiliser différentes technologies : le réseau de capteurs sans fil et la technologie de communication sans fil ZigBee pour concevoir un système de contrôle d'irrigation goutte à goutte à distance pour les agriculteurs. Pour ce faire, nous fournissons un prototype qui surveille et mesure des données (par exemple l'humidité et la température) à l'aide d'un ensemble de capteurs spéciaux. Ensuite, nous analysons et vérifions les données mesurées avec des valeurs seuils prédéfinies pour l'humidité et la température du sol et de l'air (les valeurs seuils prédéfinies peuvent être modifiées en fonction du type de culture). Sur la base du résultat de cette analyse et de cette vérification, le système d'irrigation est activé / désactivé.

La Figure 6.14 donne une vue d'ensemble du système proposé.

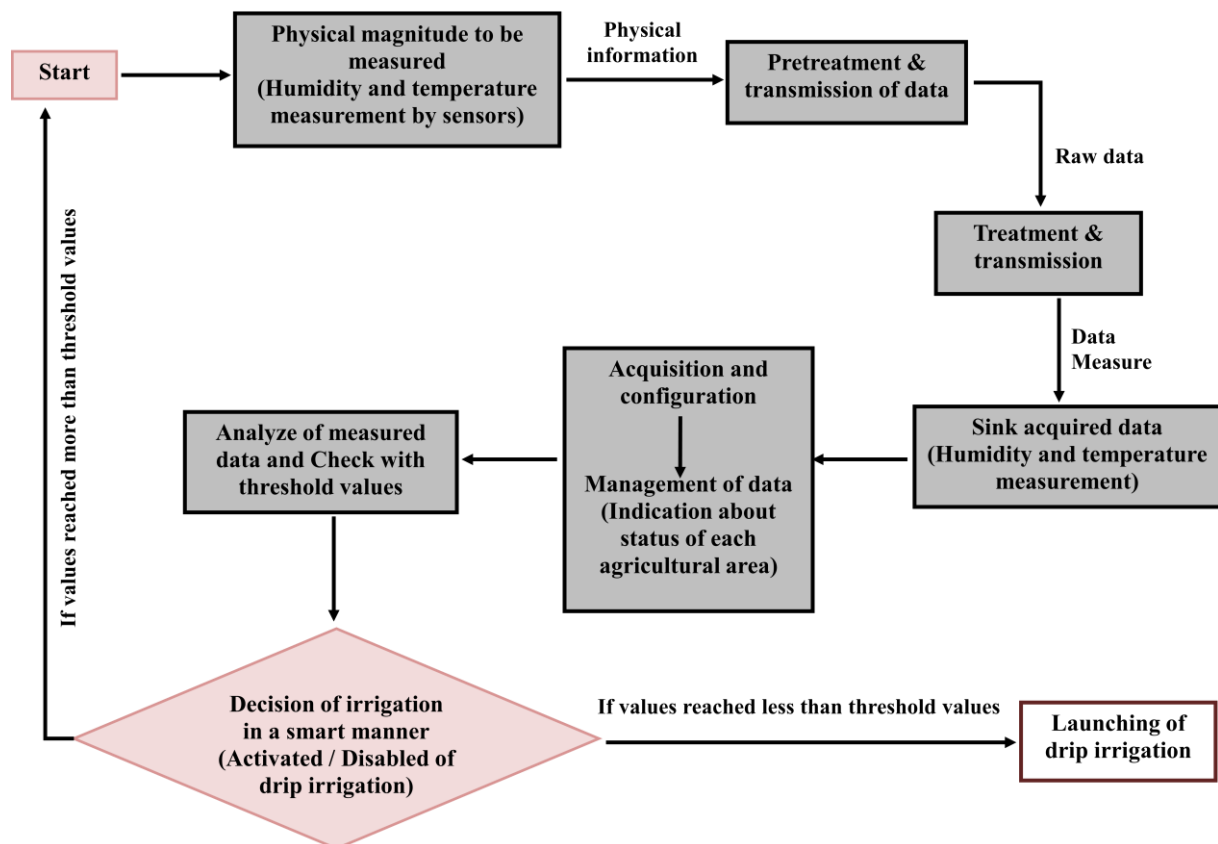


Figure 6.14 Vue d'ensemble du système proposé.

6.6.1 Architecture et composants du système proposé

Le système d'irrigation proposé est conçu pour gérer le système d'irrigation goutte à goutte d'une manière intelligente en déployant un réseau de capteurs sans fil au moyen d'une variété d'éléments. Il est composé de nombreux composants, notamment : un système d'irrigation goutte à goutte (p. ex., tubes, goutteurs), station de base, électrovanne, nœuds de capteurs météo météorologiques, nœuds de capteurs de sol, nœud coordinateur, système de télésurveillance et divers capteurs (p. ex., capteurs de température, capteurs de pH et capteurs d'humidité).

La Figure 6.15 montre une illustration du système d'irrigation proposé avec un déploiement de RCSF.

6.6.1.1 Nœuds de capteurs de sol

Le nœud de capteur de sol permet d'effectuer de nombreuses opérations et traitements dans le but de mesurer les paramètres du sol. Il détecte et recueille des informations sur les paramètres du sol : l'humidité du sol, la température du sol et le pH du sol. Il permet également le traitement et la transmission de ces données, ainsi que la communication avec d'autres nœuds connectés au réseau. De plus, le nœud de capteur de sol envoie et achemine les données de sol mesurées avec un retard vers une station de base via la technologie de communication sans fil ZigBee. Ce type de nœud est déployé en les dispersant sur le sol dans la zone à irriguer. Chaque nœud de capteur comprend un microcontrôleur, un ensemble de capteurs : un capteur d'humidité du sol, un capteur de température du sol et un capteur de pH, une batterie pour l'alimentation électrique et un émetteur-récepteur.

6.6.1.2 Nœuds de capteurs météorologiques

Le nœud de capteur météorologique permet de nombreux traitements et processus, comme le nœud de capteur de sol, mais ces processus sont utilisés afin de mesurer les paramètres météorologiques. Il détecte et collecte des informations sur les paramètres de l'air : l'humidité de l'air, la température de l'air et la vitesse du vent. Il permet également de traiter et de transmettre ces données, et de communiquer avec les autres nœuds connectés au réseau. De plus, le nœud du capteur météo envoie et achemine les données météorologiques mesurées avec un retard vers une station de base via la technologie de communication sans fil ZigBee. Semblable à un nœud de sol, ce nœud comprend un émetteur-récepteur, un microcontrôleur,

une batterie pour l'alimentation électrique et une gamme de capteurs : un capteur d'humidité, un capteur de température et un capteur de vitesse du vent.

6.6.1.3 Nœud coordinateur

Le nœud coordinateur nous permet d'identifier et de vérifier les données mesurées de RCSF en effectuant une analyse plus approfondie de ces données. Il rassemble également toutes les données mesurées et analysées dans une base de données afin de faciliter la visualisation de l'état des terres agricoles pour les agriculteurs, et ainsi faciliter la prise de décision en matière d'irrigation. Le nœud de coordination envoie des ordres à divers autres nœuds pour gérer correctement le système d'irrigation proposé.

6.6.1.4 Station de base

La station de base est le point d'entrée du réseau de capteurs sans fil. Ce nœud collecte les données détectées et mesurées à partir des nœuds de capteur dans le RCSF. Il permet également d'effectuer l'analyse et la visualisation de ces données. De plus, la station de base envoie les données collectées et analysées à un nœud coordinateur via Internet, où une analyse plus approfondie des données RCSF peut être effectuée.

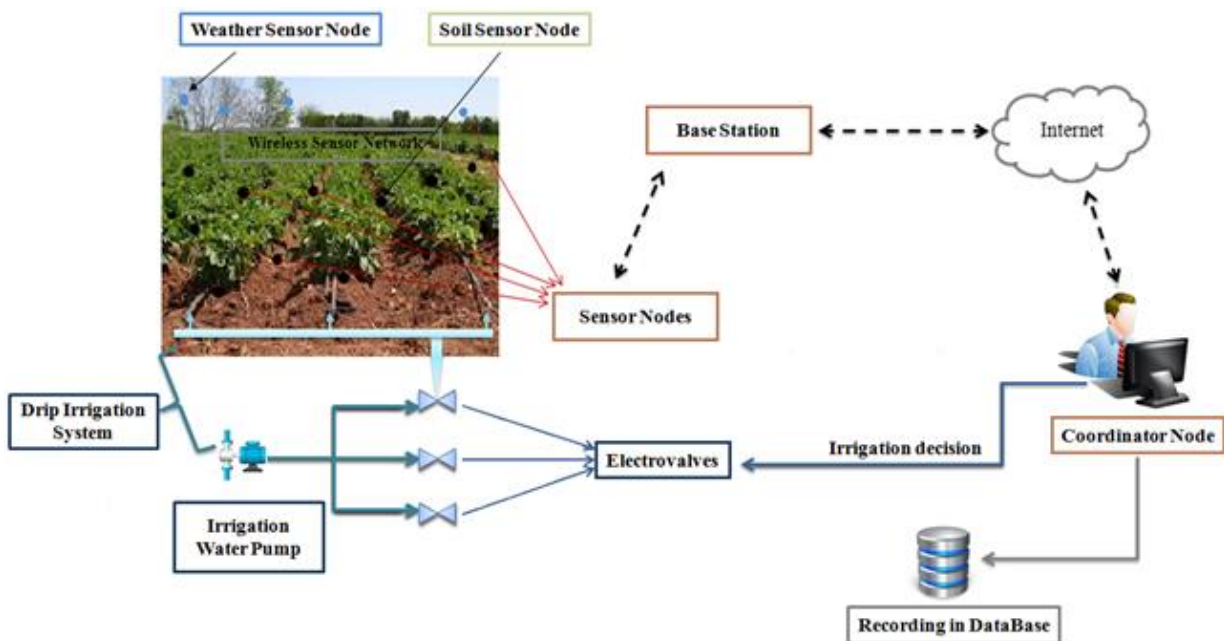


Figure 6.15 Disposition du système d'irrigation proposé.

6.6.2 Prototype et fonctionnement du système

Le système d'irrigation proposé est basé sur l'intégration d'un système d'irrigation goutte à goutte avec le réseau de capteurs sans fil et d'autres technologies tels que le ZigBee afin de réaliser un contrôle intelligent de l'irrigation. Dans le prototype proposé, nous divisons la terre agricole à irriguer en plusieurs zones géographiques dans le but de prolonger la durée de vie du RCSF, et donc du système. Dans chaque zone, nous déployons un ensemble de capteurs pour surveiller et mesurer les paramètres du sol et de l'air. Les paramètres du sol sont mesurés à l'aide du capteur d'humidité du sol « EC-5 Soil Moisture Sensor », du capteur de température « DS1822 » et du capteur « Sensor S8000 pH » ; ces capteurs ont été placés près de la partie racinaire des plantes. Les paramètres de l'air sont mesurés à l'aide du capteur de température « DS18B20 », du capteur d'humidité « HMP35C » et du « Wind Monitor Modèle 05103 ». Les données mesurées par ces capteurs sont transférées à la station de base puis à un nœud coordinateur. Le nœud coordinateur reçoit et traite les données et stocke les données traitées dans une base de données. Ces nœuds sont reliés entre eux via la technologie de communication sans fil ZigBee. Ensuite, une analyse des données enregistrées est effectuée en les vérifiant avec une base développée de valeurs seuils pour chaque paramètre mesuré. À partir du résultat de cette vérification, le système d'irrigation est mis en marche ou arrêté (Activé / Désactivé). En cas de zone sèche, il activera l'irrigation goutte à goutte si les valeurs ont atteint des valeurs inférieures aux seuils.

Le prototype du système d'irrigation proposé est présenté à la Figure 6.16.

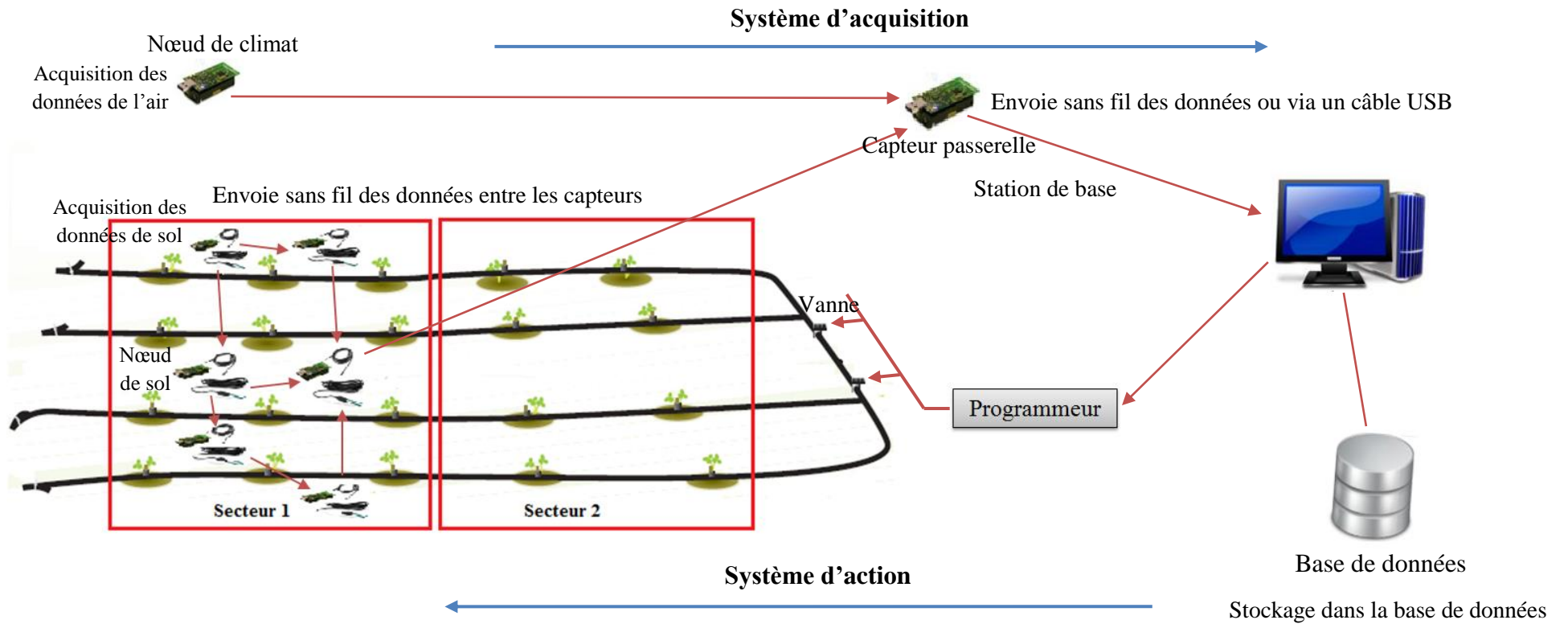


Figure 6.16 Prototype du système d'irrigation proposé.

6.6.3 Algorithme de flux de travail de nœuds

Comme détaillé ci-dessus, le système d'irrigation est basé sur un ensemble de composants. Les algorithmes de flux de travail du nœud de capteur de sol et du nœud de capteur météorologique sont illustrés à la Figure 6.17 et à la Figure 6.18.

L'algorithme de flux de travail du nœud coordinateur est illustré à la Figure 6.19.

Ces algorithmes se divisent en deux parties principales : le processus d'initialisation et le processus de traitement. La tâche principale de chaque nœud de capteur est d'effectuer un ensemble d'opérations et de traitements dans le but de mesurer les paramètres du sol et de l'air. Les nœuds de capteurs sont mis en veille chaque fois que possible sans que rien ne se passe pour économiser de l'énergie.

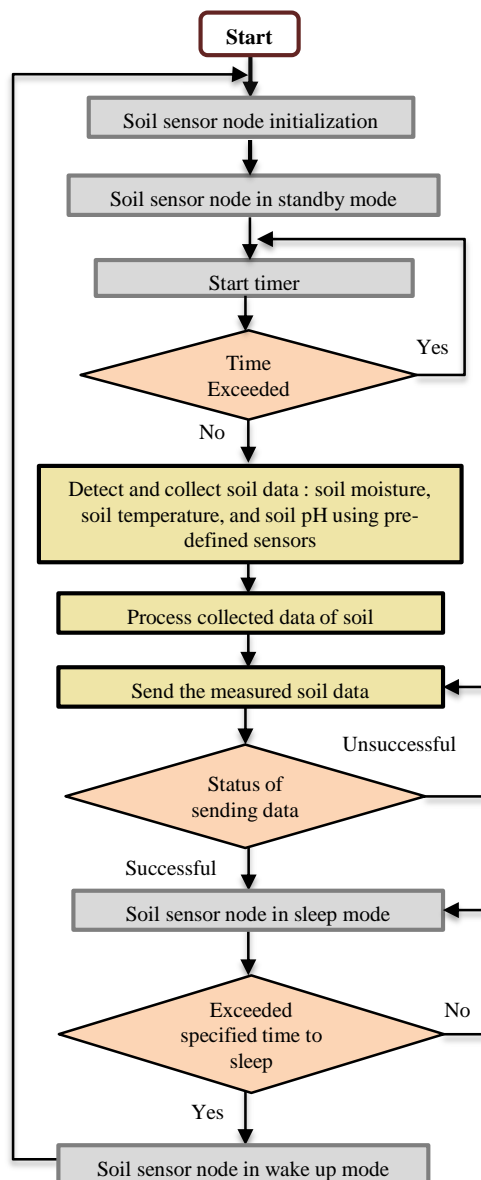


Figure 6.17 Algorithme de flux de travail du nœud de capteur de sol.

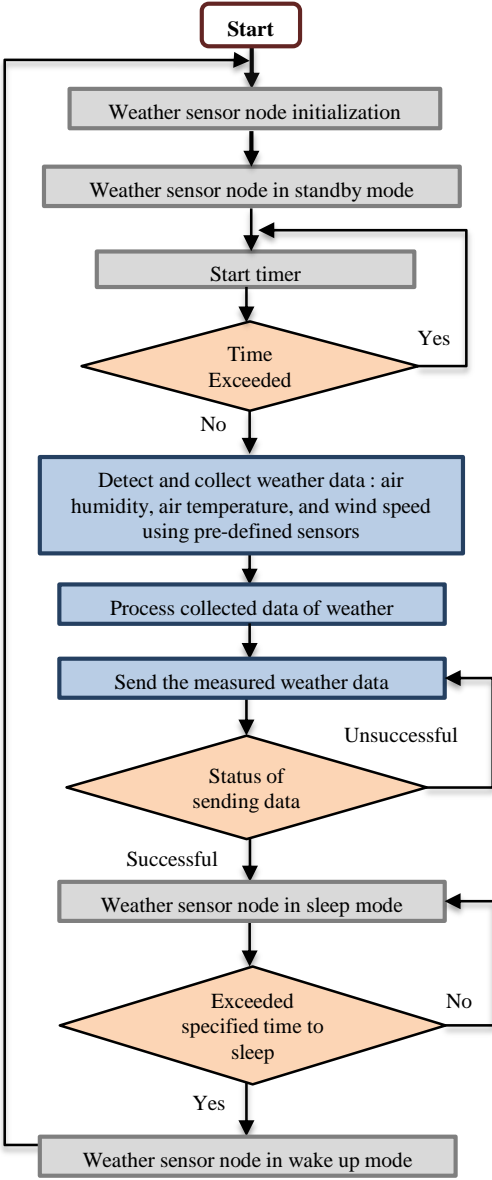


Figure 6.18 Algorithme de flux de travail du nœud de capteur météorologiques.

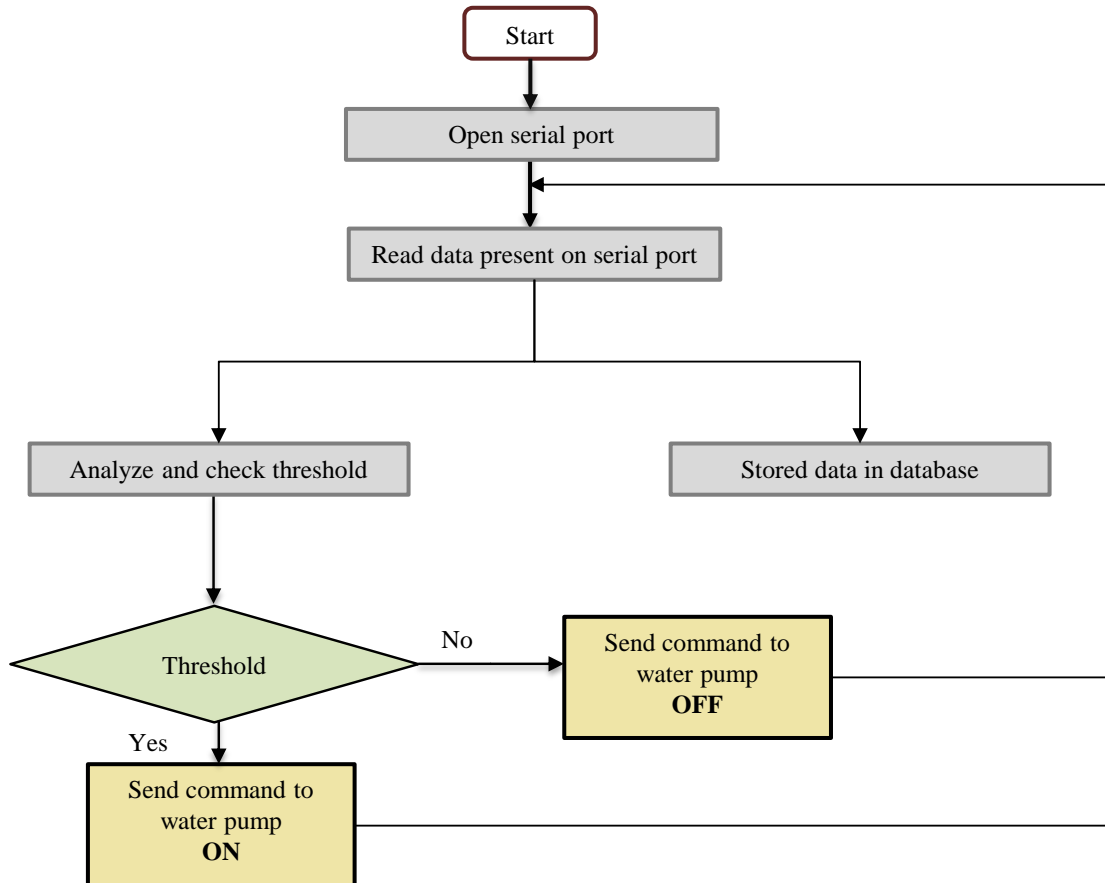


Figure 6.19 Algorithme de flux de travail du nœud coordinateur.

6.6.4 Schéma synoptique du système

Le schéma synoptique du système d'irrigation proposé est constitué de quatre parties, comme la Figure 6.20 montre. Une carte contenant des capteurs qui forment une unité de mesure ; cette unité se compose d'un ensemble de capteurs, à savoir des capteurs d'humidité et des capteurs de température, pour mesurer les paramètres du sol et les paramètres météorologiques. Une carte de traitement et de contrôle ; l'unité de traitement est chargée de capter et gérer les informations fournies par les capteurs. Un circuit pour les indicateurs ; ces indicateurs nous permettent de gérer le système d'irrigation. Et une source d'énergie.

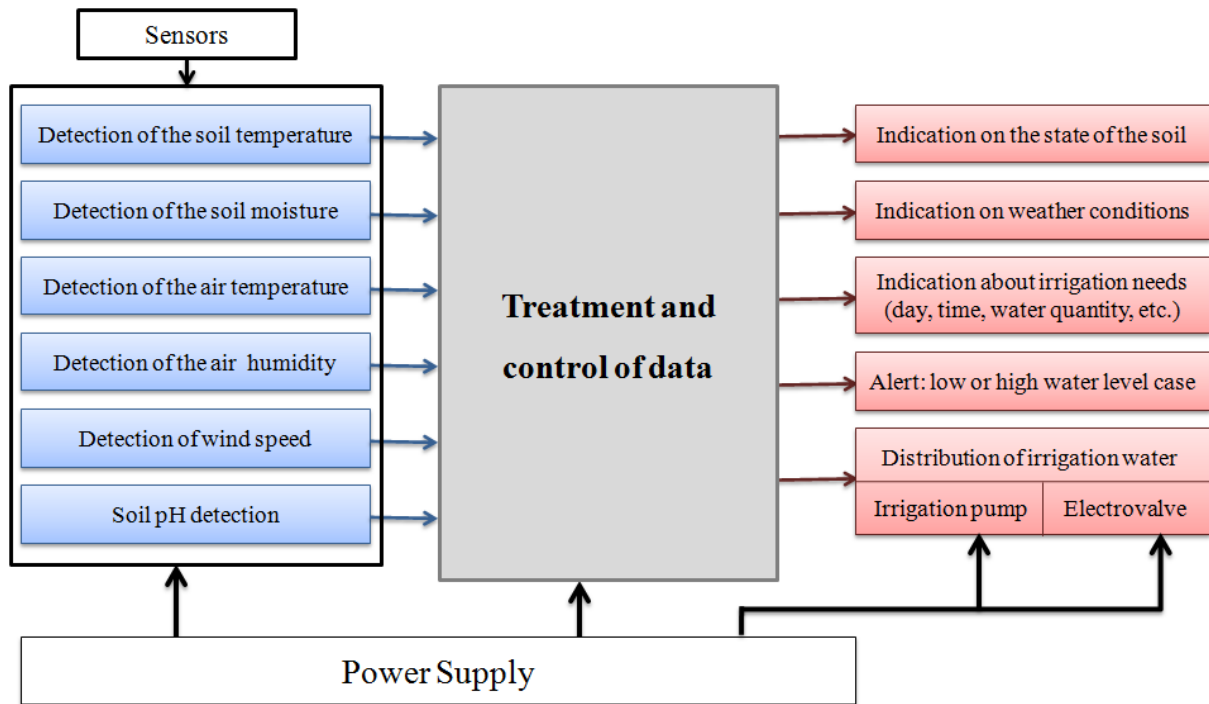


Figure 6.20 Schéma synoptique du système proposé.

6.7 Sous-systèmes et flux de travail du système

6.7.1 Sous-systèmes

Notre système est composé de 3 sous-systèmes :

- 1) Source d'eau + unité de tête
- 2) Système d'irrigation goutte à goutte
- 3) Système de surveillance de l'irrigation (RCSF)

6.7.1.1 Source d'eau + unité de tête

Ce sous système est composé d'une arrivée d'eau principale et une unité de tête qui comporte les éléments nécessaires au conditionnement et à la sécurité de fonctionnement.

Cette unité est composée :

- Electrovanne : est une vanne automatique à commande électrique, permettant l'ouverture et la fermeture du passage de l'eau,
- Régulateur de pression,

- Filtre permet de réaliser une filtration adéquate des impuretés contenues dans l'eau d'irrigation ainsi que celles qui peuvent se former en cours d'utilisation,
- Compteur.

6.7.1.2 Système d'irrigation goutte à goutte

Ce sous système permet d'installer les différents composants de goutte à goutte ainsi que d'irriguer les cultures, il est composé :

- Système de tuyaux en polyéthylène de 20 mm, ce type est caractérisé par une résistance aux agressions chimiques, la non toxicité du produit, non cassant et une bonne résistance aux chocs et au vieillissement, une inertie chimique empêcher toute détérioration de la pureté de l'eau, en particulier sous l'angle du goût et de la pollution et stabilité dans le temps.
- Goutteurs
- Micro-asperseur
- Vannes d'arrêt
- Té de dérivation
- Bouchons
- Piquets de maintien.

Les systèmes d'irrigation par goutte à goutte plus complexes sont composés d'une pompe, d'une tête de contrôle, d'une ligne principale et de lignes secondaires, latérales, et d'émetteurs ou goutteurs. L'unité de pompe est utilisée pour s'assurer qu'une quantité adaptée d'eau entre dans le système, pour maintenir une faible pression. La tête de contrôle peut utiliser un filtre pour nettoyer le système et aussi contrôler la pression et la décharge. Les lignes principales, secondaires et latérales apportent l'eau à l'espace de culture. Les émetteurs et goutteurs sont placés sur les lignes latérales et au-dessus des plants pour leur apporter de l'eau.

6.7.1.3 Système de surveillance de l'irrigation (RCSF)

Ce sous système permet de mesurer et capter les informations nécessaires pour la gestion de l'irrigation, le WSN est composé :

- Station de base : PC + capteur TelosB gateway + une base de données local.
- Nœuds du sol, chaque nœud est composé d'un TelosB + capteur de teneur en eau + capteur de la température + capteur de pH du sol pour mesurer la température, le pH et l'humidité du sol.

- Nœuds de climat, chaque nœud est composé d'un TelosB + capteur d'humidité + capteur de la température pour mesurer la température et l'humidité de l'environnement.
- Le Wind Monitor Modèle 05103 est utilisé pour mesurer la vitesse du vent.
- Electrovanne programmable.

On va utiliser une topologie hiérarchique afin d'économiser l'énergie.

Donc les capteurs échangent des informations sur l'environnement pour construire une vue globale de la région contrôlée, qui est rendue accessible à l'utilisateur externe par un ou plusieurs nœud(s). Les données collectées par ces capteurs sont acheminées directement ou via les autres capteurs de proche en proche à un « point de collecte », appelé station de base. Cette dernière connecte à une machine puissante via internet. En outre, l'utilisateur peut adresser ses requêtes aux capteurs en précisant l'information d'intérêt.

La station de base communique avec les autres nœuds via un module radio IEEE 802.15.4.

6.7.2 Application java : Système de contrôle local

Pour gérer la solution d'irrigation proposée, nous avons créé une application java. Pour développer cette application, nous avons utilisé les outils suivants :

6.7.2.1 Environnement matériel

Nous avons utilisé un ordinateur portable présentant les caractéristiques suivantes :

- ✓ Processeur Intel(R) Pentium(R) Dual CPU T3400 @ 2.16 GHz 2.17 GHz
- ✓ RAM 3GO
- ✓ Système d'exploitation 32 bits

6.7.2.2 Langages et environnement de programmation

i. NetBeans

NetBeans est un environnement de développement intégré, placé en open source par Sun en juin 2000 sous licence CDDL et GPLv2 (Common Development and Distribution License). Outre Java, NetBeans peut également prendre en charge divers autres langages, tels que Python, C, C ++, JavaScript, XML, PHP et HTML. NetBeans est également une plateforme qui permet le développement des applications spécifiques. Parmi ses caractéristiques :

- Il contient un éditeur avec coloration syntaxique en fonction du langage choisi.

- Il permet la navigation et la gestion des différents projets et de leurs classes.
- Il contient un débogueur et un compilateur.
- Il renomme automatiquement les fonctions / classes / variables tout au long du code.
- Il est compatible avec Windows, Unix et Mac.

Nous constatons que le choix de ce logiciel est naturel, puisqu'il est très complet, gratuit et facile à utiliser.

ii. WampServer

WampServer est une plateforme de développement web qui permet de faire fonctionner des scripts PHP en local. Il n'est pas en soi un logiciel, mais un environnement comprenant deux serveurs (Apache et MySQL), un interpréteur de script (PHP), ainsi que phpMyAdmin pour l'administration web des bases de données MySQL. Il dispose d'une interface d'administration permettant de gérer et d'administrer ses serveurs au travers d'une icône dans la barre des tâches.

iii. MySQL

MySQL offre un certain nombre d'outils permettant d'exporter ses BD vers d'autres SGBD ou bien de les importer.

MySQL est un système de gestion de base de données de type SQL créé en 1995 par une société suédoise. Il a été développé dans un souci de haute performance. Il est multithread, robuste et multi-utilisateurs.

C'est un logiciel libre développé sous double licence en fonction de l'utilisation, commerciale ou non, qui en est faite. Si c'est le cas, la licence est payante, sinon elle est gratuite. Il permet de manipuler facilement et avec une grande souplesse un très grand volume de données. Il permet également d'effectuer plusieurs tâches telles que la création, l'exportation et l'importation de bases de données.

MySQL offre un certain nombre d'outils permettant d'exporter ses BD vers d'autres SGBD ou bien de les importer.

iv. Java

Le langage Java est un langage de programmation informatique orienté objet créé par James Gosling et Patrick Naughton, employés de Sun Microsystems, avec le soutien de Bill Joy, présenté officiellement le 23 mai 1995 à SunWorld. La particularité et l'objectif central de Java est que les logiciels écrits dans ce langage doivent être très facilement portables sur plusieurs systèmes d'exploitation tels que UNIX, Windows, Mac OS ou GNU/Linux, avec peu

ou pas de modifications. Pour cela, diverses plateformes et frameworks associés visent à guider, sinon à garantir, cette portabilité des applications développées en Java.

v. **Swing**

Swing est une bibliothèque graphique pour le langage de programmation Java, faisant partie du paquet Java Foundation Classes, inclus dans J2SE. Swing offre la possibilité de créer des interfaces graphiques identiques quel que soit le système d'exploitation sous-jacent, au prix de performances moindres que l'utilisation de l'Abstract Window Toolkit. Il utilise le principe Modèle-Vue-Contrôleur et offre plusieurs choix d'apparence pour chacun des composants standard.

vi. **SQL**

SQL est un langage informatique standardisé utilisé pour effectuer des opérations sur des bases de données relationnelles. La partie langage de manipulation des données de SQL permet de trouver, ajouter, modifier ou supprimer des données dans les bases de données relationnelles. En plus du langage de manipulation des données, la partie langage de définition des données permet de créer et de modifier l'organisation des données dans la base de données, la partie langage de contrôle des transactions permet de démarrer et de terminer des transactions, et la partie langage de contrôle des données permet d'autoriser ou d'interdire l'accès à certaines données à certaines personnes.

6.7.2.3 Interface graphique

Nous présentons l'interface graphique de l'application java.

D'abord et avant tout, il faut connecter les ports pour connecter l'interface physique de capteur et pour connecter l'interface physique d'actionneur. Une fois les ports sont connectés, le système commence à afficher en temps réel les courbes graphiques de toutes les données mesurées dans le système proposé comme la température, l'humidité de l'air et l'humidité du sol. Dans cette application, le propriétaire du système peut exécuter un ensemble d'actions (ouvrir ou fermer la vanne).

La première interface de l'application (voir Figure 6.21) permet à un utilisateur s'authentifier. Dans l'authentification, nous faisons un test pour vérifier les coordonnées de l'utilisateur. Si les coordonnées sont fausses, une alerte d'erreur sera affichée, sinon l'utilisateur s'authentifie et une session ouvert.

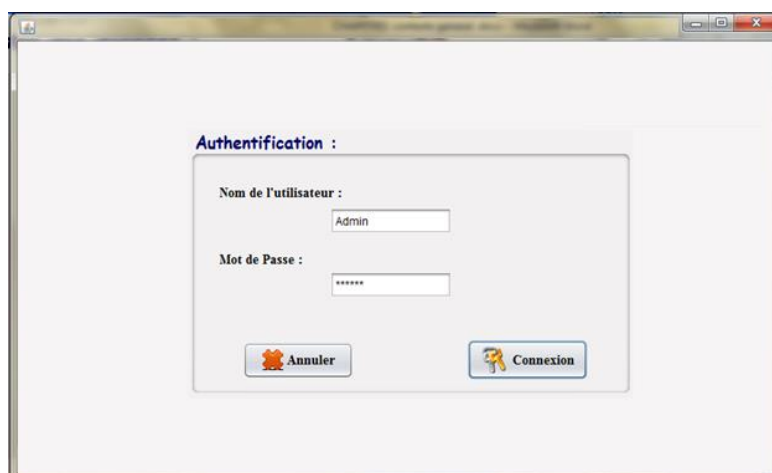


Figure 6.21 Authentification.

L'utilisateur connecte, une interface sera affichée (voir Figure 6.22) qui permet de gérer l'application. Cette interface comprend : le menu Affichage permet à l'utilisateur de consulter les données de capteurs enregistrées ; le menu Configuration permet de gérer l'irrigation et le réservoir ; le menu Aide permet de donner des conseils permettant d'améliorer l'irrigation utilisant les RCSF.

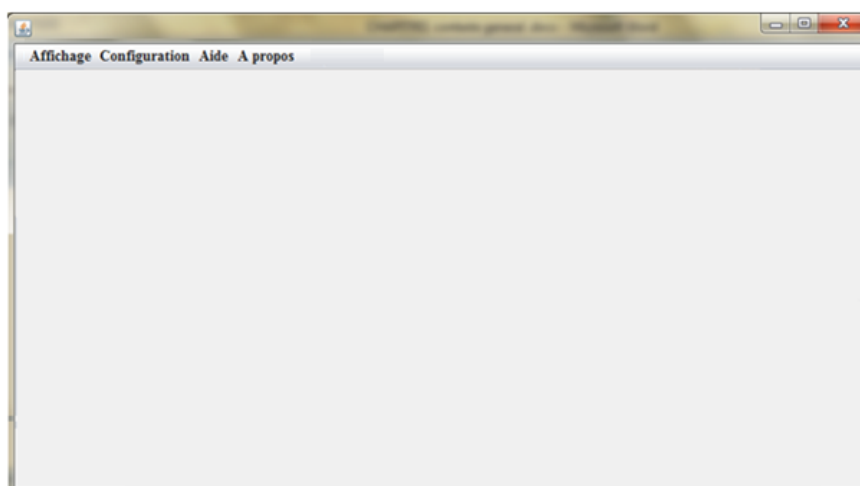


Figure 6.22 Première interface.

La Figure 6.23 montre un exemple d'affichage des données de température du sol.

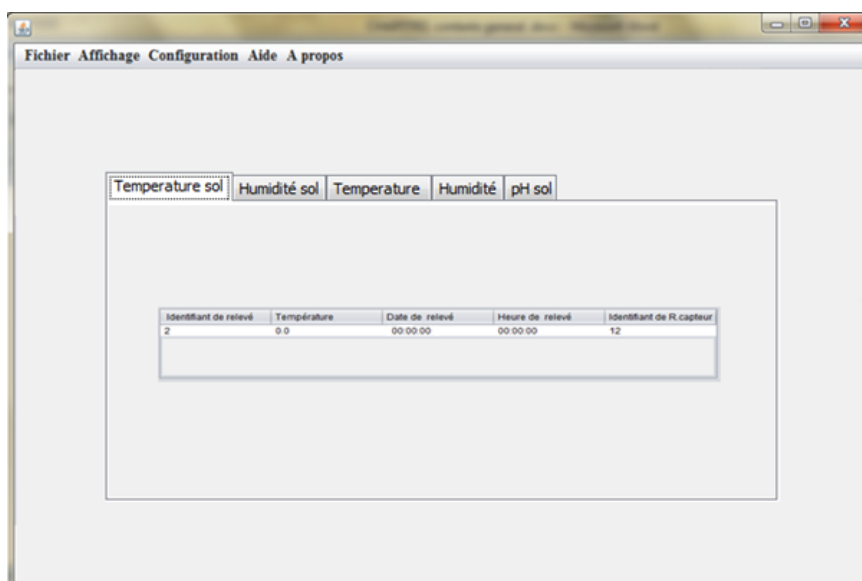


Figure 6.23 Exemple d'affichage des données de température du sol.

L'utilisateur peut visualiser des données captées en utilisant les graphiques pour analyser les résultats (comme voir si le sol est sec beaucoup plus ou non) des périodes précédentes. La Figure 6.24 montre un exemple d'affichage d'une courbe de données de température.

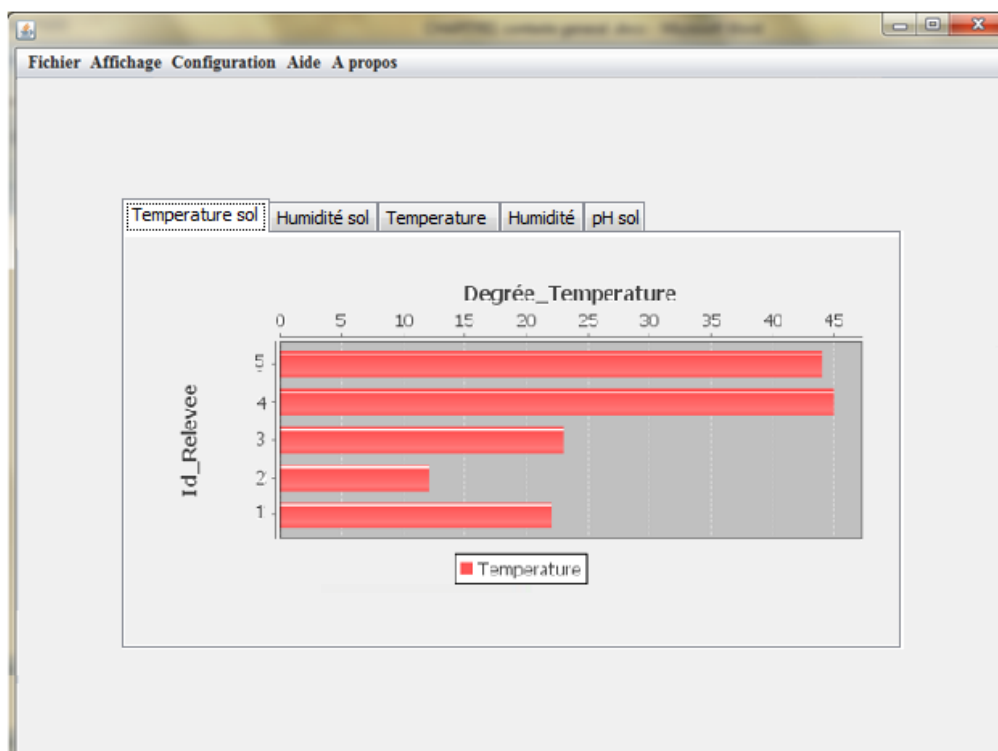


Figure 6.24 Affichage d'une courbe de données de température.

6.7.3 Flux de travail et étapes du système

Le système d'irrigation intelligent proposé suit plusieurs procédures et étapes décrites comme suit :

Afin de prolonger la durée de vie du système d'irrigation, nous allons essayer de prolonger la durée de vie du RCSF en divisant la terre agricole à irriguer en plusieurs petites zones. Dans chaque zone, nous suivrons une série d'étapes.

- **Etape 1**

Nous configurons le réseau de capteurs sans fil en dispersant un groupe de nœuds de capteurs de sol et météorologiques.

- **Etape 2** : Surveillance des paramètres du sol et des paramètres météorologiques en temps réel

Nous utilisons des nœuds de capteurs de sol pour mesurer la température, l'humidité et le pH du sol à l'aide des capteurs mentionnés ci-dessus et des capteurs météorologiques pour mesurer la température de l'air, l'humidité de l'air et la vitesse du vent en utilisant divers capteurs listés ci-dessus. Les nœuds de capteurs de sol doivent être placés près de la racine des plantes. Ces nœuds de capteurs sont communiqués les uns aux autres via la technologie de communication sans fil ZigBee.

- **Etape 3** : Traitement des données mesurées et collectées

Les données mesurées et collectées par les nœuds de capteurs sont transmises via une communication sans fil ZigBee vers une station de base. La station de base collecte, traite et analyse ces données, puis les envoie également à un nœud de coordination via Internet. Le nœud coordinateur permet d'effectuer une analyse plus approfondie pour vérifier et identifier ces données.

- **Etape 4** : Enregistrement et la sauvegarde des données traitées dans la base de données

Nous stockons les données traitées dans la base de données pour faciliter l'exploitation et l'utilisation de ces données.

- **Etape 5** : Exploitation des données traitées

En fonction de l'analyse des données traitées et de la vérification de ces données avec les valeurs seuils pour chaque paramètre mesuré, l'ensemble des besoins d'irrigation pour chaque zone sera calculé afin de prendre la décision d'irrigation.

▪ **Etape 6 :** Prendre la décision d'irrigation

Sur la base des résultats de l'étape 5, la décision d'irrigation goutte à goutte sera prise. Dans le cas d'une zone sèche, le système d'irrigation sera activé en pompant de l'eau pour irriguer les cultures en envoyant une commande au système pour ouvrir ou fermer l'électrovanne, activant ou désactivant ainsi le système d'irrigation goutte à goutte.

Dans la Figure 6.25, nous montrons et décrivons le flux opérationnel du système d'irrigation intelligent utilisant le RCSF.

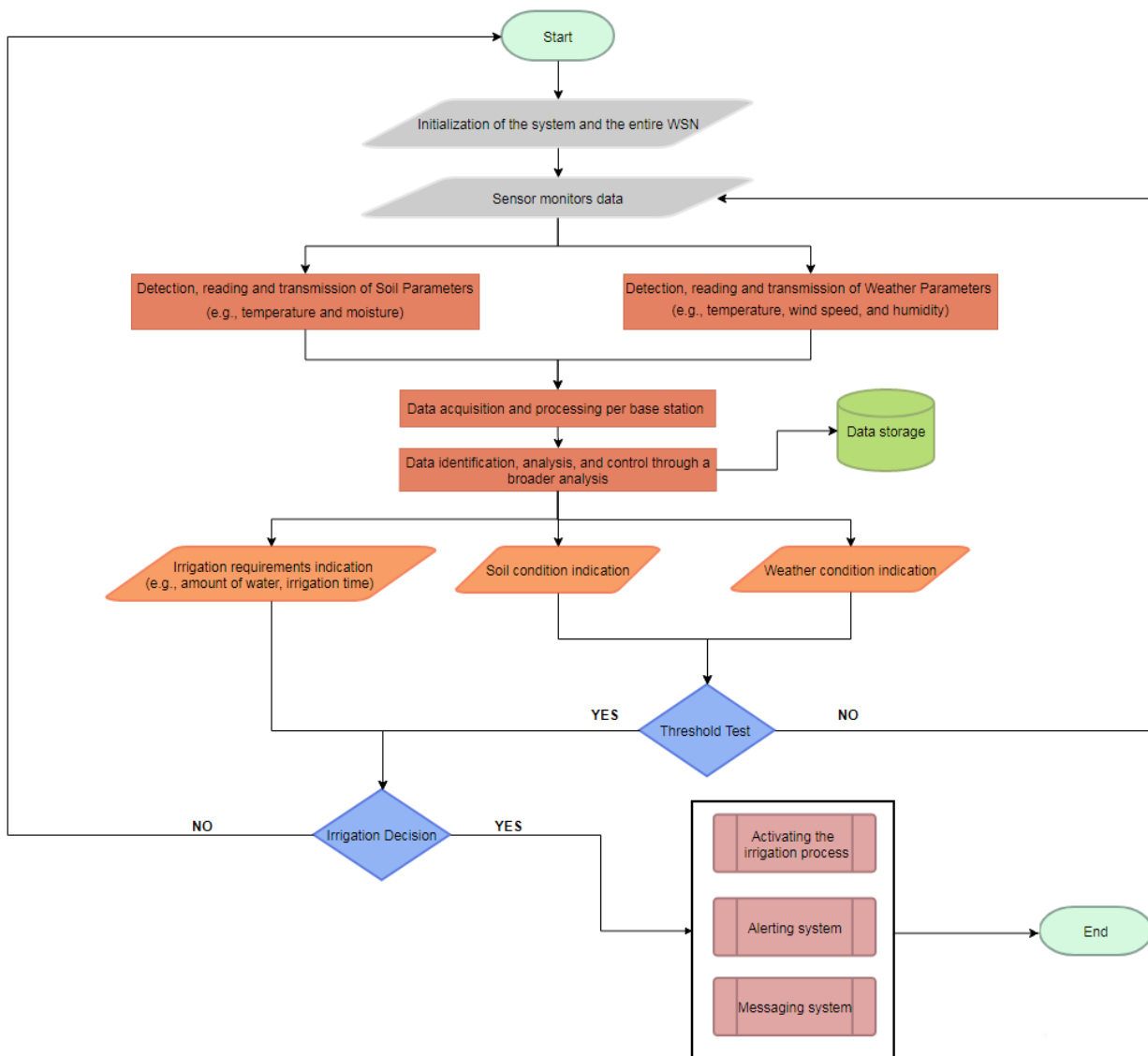


Figure 6.25 Flux opérationnel du système d'irrigation intelligent utilisant le RCSF.

6.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé et décrit un système d'irrigation intelligent basé sur RCSF. Nous avons d'abord proposé une méthodologie à suivre dans la mise en œuvre d'un système d'irrigation intelligent basé sur le RCSF. Par ailleurs, nous avons mené une analyse fonctionnelle du système d'irrigation proposé en présentant le diagramme bête à corne, le diagramme pieuvre et la carte mentale. Nous avons présenté également l'étude conceptuelle du système proposé. Ensuite, nous avons présenté les technologies, méthodes et outils utilisés dans le système. Enfin, nous avons fourni une description détaillée du système proposé à travers une présentation d'un ensemble de technologies, de méthodes et d'outils qui seront utilisés, ainsi qu'une présentation du prototype, des architectures, des sous-systèmes et du flux de travail du système proposé.

Conclusion général et perspectives

En raison de la croissance démographique et de l'augmentation de la demande de production alimentaire, l'automatisation du secteur agricole est devenue très nécessaire et très demandée. À l'heure actuelle, l'amélioration de la durabilité des différents services de l'agriculture est devenue un défi sérieux dans le but de réduire l'impact de la crise mondiale de l'eau. Le système d'irrigation est l'un des services les plus vitaux qui permet de développer et d'améliorer le domaine de l'agriculture. Par conséquent, l'utilisation des réseaux de capteurs sans fil comme technologie de coordination dans les différents services de ce secteur, en particulier l'irrigation, génère un nouveau domaine de recherche passionnant qui permettra de développer et d'améliorer l'efficacité de ce secteur, tout en augmentant la production agricole et en réduisant les coûts nécessaires.

Cette thèse a porté sur les contributions des réseaux de capteurs sans fil dans le domaine de l'irrigation. Elle visait d'abord à fournir une revue systématique exhaustive de la littérature, plus récente et approfondie, en examinant, étudiant et analysant l'application et l'utilisation du RCSF dans le domaine de l'irrigation. Ensuite, elle a abordé trois aspects principaux liés au RCSF dans le domaine étudié. Le premier axe consistait à fournir une analyse des principaux facteurs affectant le RCSF en général. Le deuxième axe visait à fournir une étude et une analyse des principaux facteurs affectant le RCSF dans le domaine de l'irrigation. Le troisième axe s'est concentré sur la réalisation d'une analyse SWOT pour évaluer l'utilisation du RCSF dans l'irrigation au Maroc. Enfin, nous avons proposé une solution pour un système d'irrigation intelligent utilisant le RCSF.

Les travaux que nous avons réalisés et les voies d'investigation explorées dans le cadre de cette thèse nous ouvrent de multiples perspectives de recherche. Nous organisons nos réflexions sur les points suivants : évolutivité, consommation d'énergie et sécurité, comme suit :

- Le déploiement de la solution proposée dans un environnement réel d'exploitation, une fois que les équipements seront disponibles.
- L'achèvement de l'étude « La crise de l'eau au Maroc et ses effets négatifs sur le secteur agricole ».
- Nous espérons étendre le système proposé en ajoutant d'autres capteurs, par exemple des capteurs de pression et capteur de conductivité électrique du sol, pour le rendre plus efficace. Nous essayerons également d'ajouter d'autres nouvelles technologies (comme l'Internet des objets) au système proposé pour augmenter son efficacité, ainsi qu'un système d'aide à la décision.
- Si d'autres types de capteurs sont ajoutés, nous pouvons observer que la taille du RCSF augmentera et que la consommation d'énergie deviendra très importante, réduisant ainsi la durée de vie du réseau. Il est donc impératif de trouver des solutions optimales et de les utiliser pour réduire la consommation d'énergie. Dans les travaux futurs, nous chercherons des solutions optimales pour minimiser la consommation d'énergie.
- De plus, nous aborderons le point de sécurité où nous tenterons de sécuriser les données mesurées à l'aide de solutions cryptage de données améliorées.

Publications

Journal publications

- [1] Hamami L., Nassereddine B., 2021. Factors influencing the use of wireless sensor networks in the irrigation field. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 12(3), 2021.
- [2] Hamami L., Nassereddine B., 2020. Application of wireless sensor networks in the field of irrigation: A review. *Computers and Electronics in Agriculture - Elsevier*, 179 (2020), 105782.
- [3] Loubna H., Bouchaib N., 2020. Wireless Sensor Network Application for Intelligent Irrigation System. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*, 12 (3 Special Issue), 163–173.
- [4] Hamami L., Nassereddine B., 2018. Integration of irrigation system with wireless sensor networks: prototype and conception of intelligent irrigation system. *Lecture Notes in Engineering and Computer Science 2238*, pp. 56–62. Newswood Limited. ISSN: 2078-0958.
- [5] Hamami L., Nassereddine B., 2021. A guide to performing a systematic literature review on applications of wireless sensor networks in irrigation. (En cours)

Full papers in international conference proceedings

- [6] Hamami L., Nassereddine B., 2019. A Study of the Main Factors Affecting Wireless Sensor Networks. In: 2019 Third International conference on IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud (I-SMAC). IEEE, pp. 211-215.
- [7] Hamami L., Nassereddine B., 2018. Towards a Smart Irrigation System based on Wireless Sensor Networks (WSNs). In: *Proceedings of the 1st International Conference of Computer Science and Renewable Energies, Vol. 1 - ICCSRE*, ISBN 978-989-758-431-2, pp. 433-442. K. Salah-ddine et al., ICCSRE 2018 Book (2020). SciTePress Digital Library.

- [8] Hamami L., Nassereddine B., 2018. Integration of irrigation system with wireless sensor networks: prototype and conception of intelligent irrigation system. International Conference on Communications Systems and Technologies (ICCST) 2018, The 26 World Congress on Engineering and Computer Science 2018, San Francisco, USA, Octobre 2018.
- [9] Hamami L., Nassereddine B., 2016. Toward an intelligent irrigation based on wireless sensor network (WSN) in Morocco. International Workshop on New Services and Networks 2016 (WNSN'16), Mai 2016.
- [10] Hamami L., Nassereddine B., 2015. Vers une irrigation intelligente au Maroc. Des actes du 1er Congrès International sur les Ingénieries Civile, Mécanique et Electrique pour l'Energie (CMEEE 2015) – Marrakech, Novembre 2015. ISSN : 2458-6226 (Dépôt légal : 2015PE0102)

National Conferences and Colloquia

- [11] Hamami L., Nassereddine B., 2017. A study of wireless sensor network and their applications in agriculture domain, 5^{ème} édition de la Journée Doctorant, Settat, Mars 2017.
- [12] Hamami L., Nassereddine B., 2016. The use of Wireless sensor networks in the field of irrigation, 4^{ème} édition de la Journée Doctorant, Settat, Avril 2016.
- [13] Hamami L., Nassereddine B., 2015. Vers un système expert de gestion d'irrigation en utilisant un réseau de capteurs sans fil, 3^{ème} édition de JDSIRT'15, ENSIAS, Novembre 2015.
- [14] Hamami L., Nassereddine B., 2015. Développement d'un système expert de gestion d'irrigation en utilisant un réseau de capteurs sans fil d'environnement, 3^{ème} édition de la Journée Doctorant, Settat, Juin 2015.

Bibliographie

- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, ‘Wireless sensor networks: a survey’, *Computer networks*, vol. 38, no. 4, pp. 393–422, 2002.
- [2] Y. K. Tan and S. K. Panda, ‘Review of energy harvesting technologies for sustainable wireless sensor network’, *Sustainable wireless sensor networks*, pp. 1–30, 2010.
- [3] M. A. Matin and M. M. Islam, ‘Overview of wireless sensor network’, *Wireless Sensor Networks-Technology and Protocols*, pp. 1–3, 2012.
- [4] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, ‘A survey on sensor networks’, *IEEE Communications magazine*, vol. 40, no. 8, pp. 102–114, 2002.
- [5] M. Tubaishat and S. Madria, ‘Sensor networks: an overview’, *IEEE potentials*, vol. 22, no. 2, pp. 20–23, 2003.
- [6] J. Yick, B. Mukherjee, and D. Ghosal, ‘Wireless sensor network survey’, *Computer networks*, vol. 52, no. 12, pp. 2292–2330, 2008.
- [7] I. F. Akyildiz and M. C. Vuran, *Wireless sensor networks*, vol. 4. John Wiley & Sons, 2010.
- [8] A. Baggio, ‘Wireless sensor networks in precision agriculture’, in *ACM Workshop on Real-World Wireless Sensor Networks (REALWSN 2005)*, Stockholm, Sweden, 2005, vol. 20, pp. 1567–1576.
- [9] *UNITED NATIONS WORLD WATER DEVELOPMENT REPORT 2021: valuing water*. S.l.: UNITED NATIONS EDUCATIONA, 2021.
- [10] FAO, *World Food and Agriculture - Statistical Yearbook 2020*. Rome, Italy: FAO, 2020. doi: 10.4060/cb1329en.
- [11] U. UN-Water, *United Nations World Water Development Report 2020: Water and Climate Change*. UNESCO: Paris, France, 2020.
- [12] I. Haddeland *et al.*, ‘Global water resources affected by human interventions and climate change’, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 111, no. 9, pp. 3251–3256, 2014.
- [13] FAO, ‘Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)’. <http://www.fao.org/home/en/> (accessed Jan. 01, 2020).
- [14] U. Nations, ‘United Nations’, *United Nations*. <https://www.un.org/en> (accessed Mar. 22, 2020).
- [15] F. R. Rijsberman, ‘Water scarcity: fact or fiction?’, *Agricultural water management*, vol. 80, no. 1–3, pp. 5–22, 2006.
- [16] M. A. Hanjra and M. E. Qureshi, ‘Global water crisis and future food security in an era of climate change’, *Food policy*, vol. 35, no. 5, pp. 365–377, 2010.
- [17] R. Damania, S. Desbureaux, A.-S. Rodella, and J. Russ, *Quality unknown: the invisible water crisis*. World Bank Publications, 2019.
- [18] P. H. Gleick, ‘Global freshwater resources: soft-path solutions for the 21st century’, *Science*, vol. 302, no. 5650, pp. 1524–1528, 2003.
- [19] A. Brown and M. D. Matlock, ‘A review of water scarcity indices and methodologies’, *White paper*, vol. 106, no. 1, p. 19, 2011.

- [20] C. J. Vörösmarty, P. Green, J. Salisbury, and R. B. Lammers, 'Global water resources: vulnerability from climate change and population growth', *science*, vol. 289, no. 5477, pp. 284–288, 2000.
- [21] UN-Water, 'UN-Water', *UN-Water*. <https://www.unwater.org/> (accessed Feb. 27, 2020).
- [22] N. Kalra *et al.*, 'Impacts of climate change on agriculture', *Outlook on AGRICULTURE*, vol. 36, no. 2, pp. 109–118, 2007.
- [23] A. Ghosh, *The great derangement: Climate change and the unthinkable*. Penguin UK, 2018.
- [24] A. K. Mishra and V. P. Singh, 'A review of drought concepts', *Journal of Hydrology*, vol. 391, no. 1, pp. 202–216, Sep. 2010, doi: 10.1016/j.jhydrol.2010.07.012.
- [25] M. de l'Agriculture et de la P. Maritime, *L'agriculture marocaine en chiffres*. 2014.
- [26] Ministre de l'Agriculture et de l'Alimentation - France, 'Les politiques agricoles à travers le monde - Quelques exemples - Collection 2015 - Maroc'. Accessed: Dec. 01, 2019. [Online]. Available: https://agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/1506-ci-resinter-fi-maroc_0.pdf
- [27] 'L'irrigation en agriculture : levier de développement économique et social - Fellah Trade'. <https://www.fellah-trade.com/fr/actualites-maroc/article/14461,l-irrigation-en-agriculture-levier-de-developpement-economique-et-social> (accessed Jan. 05, 2020).
- [28] 'Département de l'agriculture - Ministère de l'Agriculture, de la Pêche Maritime, du Développement Rural et des Eaux et Forêts'. <http://www.agriculture.gov.ma/> (accessed Jul. 03, 2020).
- [29] J. Bruinsma, *World agriculture: towards 2015/2030: an FAO perspective*. Earthscan, 2003.
- [30] R. Harbouze, J.-P. Pellissier, J.-P. Rolland, and W. Khechimi, 'Rapport de synthèse sur l'agriculture au Maroc', PhD Thesis, CIHEAM-IAMM, 2019.
- [31] 'Conseil Économique Social et Environnemental (CESE)', *Le Conseil économique social et environnemental*. <https://www.lecese.fr/en> (accessed Jun. 05, 2020).
- [32] P. Puchot, 'La sécheresse aggrave les difficultés du royaume marocain', *Le Monde diplomatique*, Apr. 01, 2020. <https://www.monde-diplomatique.fr/2020/04/PUCHOT/61631> (accessed Jun. 05, 2020).
- [33] N. Akesbi, 'Une nouvelle stratégie pour l'agriculture marocaine: Plan Maroc Vert', *New Medit: Mediterranean Journal of Economics, Agriculture and Environment= Revue Méditerranéenne d'Economie Agriculture et Environnement*, vol. 11, no. 2, p. 12, 2012.
- [34] A. LOUALI, 'DEPF Etudes "Le secteur agricole marocain : Tendances structurelles, enjeux et perspectives de développement"', 2019.
- [35] WWF, 'WWF - Endangered Species Conservation | World Wildlife Fund'. <https://www.worldwildlife.org/> (accessed Jan. 05, 2020).
- [36] S. L. Postel, 'Entering an era of water scarcity: the challenges ahead', *Ecological applications*, vol. 10, no. 4, pp. 941–948, 2000.
- [37] D. Pimentel *et al.*, 'Water resources: agricultural and environmental issues', *Bioscience*, vol. 54, no. 10, pp. 909–918, 2004.
- [38] W. A. Jury and H. J. Vaux Jr, 'The emerging global water crisis: managing scarcity and conflict between water users', *Advances in agronomy*, vol. 95, pp. 1–76, 2007.
- [39] U. N. Water, 'Sustainable Development Goal 6 synthesis report on water and sanitation', *Published by the United Nations New York, New York*, vol. 10017, 2018.
- [40] M. M. Mekonnen and A. Y. Hoekstra, 'Four billion people facing severe water scarcity', *Science advances*, vol. 2, no. 2, p. e1500323, 2016.
- [41] FAO, Ed., *The state of food security and nutrition in the world 2017: Building resilience for food and food security*. Rome: FAO, 2017.
- [42] FAO, 'Part 1 — The setting', in *Statistical Yearbook 2013: World Food and Agriculture*, Rome, Italy: FAO, 2013.
- [43] J. Rockström *et al.*, 'Sustainable intensification of agriculture for human prosperity and global sustainability', *Ambio*, vol. 46, no. 1, pp. 4–17, Feb. 2017, doi: 10.1007/s13280-016-0793-6.

- [44] R. Connor, *The United Nations world water development report 2015: water for a sustainable world*, vol. 1. UNESCO publishing, 2015.
- [45] P. Burek *et al.*, ‘Water futures and solution-fast track initiative’, 2016.
- [46] AQUASTAT, ‘AQUASTAT - FAO’s Global Information System on Water and Agriculture’. <http://www.fao.org/aquastat/en/> (accessed May 24, 2020).
- [47] FAO, IFAD, UNICEF, WFP, and WHO, *The state of food security and nutrition in the world 2018: building climate resilience for food security and nutrition*. Food & Agriculture Org., 2018.
- [48] V. Masson-Delmotte *et al.*, ‘Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty’, *Global warming of*, vol. 1, pp. 1–32, 2018.
- [49] N. Alexandratos and J. Bruinsma, ‘World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision’, 2012.
- [50] W. Schlenker and D. B. Lobell, ‘Robust negative impacts of climate change on African agriculture’, *Environmental Research Letters*, vol. 5, no. 1, p. 014010, 2010.
- [51] N. Fuxiang, H. Xixin, G. Xiaoding, W. Jinyu, L. Hongmin, and D. Chengwei, ‘Studies on several physiological indexes of the drought resistance of sweet potato and its comprehensive evaluation’, *Zuo wu xue bao*, vol. 22, no. 4, pp. 392–398, 1996.
- [52] H. Cooley, K. Donnelly, R. Phurisamban, and M. Subramanian, ‘Impacts of California’s ongoing drought: agriculture’, *Pacific Institute: Oakland, CA, USA*, vol. 24, 2015.
- [53] D. Shinghal and N. Srivastava, ‘Wireless sensor networks in agriculture: for potato farming’, *Neelam, Wireless Sensor Networks in Agriculture: For Potato Farming (September 22, 2017)*, 2017.
- [54] N. Fahmi, S. Huda, E. Prayitno, M. U. H. Al Rasyid, M. C. Roziqin, and M. U. Pamenang, ‘A prototype of monitoring precision agriculture system based on WSN’, in *2017 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)*, 2017, pp. 323–328.
- [55] L. Ruiz-Garcia, L. Lunadei, P. Barreiro, and I. Robla, ‘A review of wireless sensor technologies and applications in agriculture and food industry: state of the art and current trends’, *sensors*, vol. 9, no. 6, pp. 4728–4750, 2009.
- [56] T. Ojha, S. Misra, and N. S. Raghuvanshi, ‘Wireless sensor networks for agriculture: The state-of-the-art in practice and future challenges’, *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 118, pp. 66–84, 2015, doi: 10.1016/j.compag.2015.08.011.
- [57] A. Ur Rehman, A. Z. Abbasi, N. Islam, and Z. A. Shaikh, ‘A review of wireless sensors and networks’ applications in agriculture’, *Computer Standards & Interfaces*, vol. 36, no. 2, pp. 263–270, 2014.
- [58] D. Thakur, Y. Kumar, A. Kumar, and P. K. Singh, ‘Applicability of wireless sensor networks in precision agriculture: A review’, *Wireless Personal Communications*, vol. 107, no. 1, pp. 471–512, 2019.
- [59] M. Srbinovska, C. Gavrovski, V. Dimcev, A. Krkoleva, and V. Borozan, ‘Environmental parameters monitoring in precision agriculture using wireless sensor networks’, *Journal of cleaner production*, vol. 88, pp. 297–307, 2015.
- [60] N. Wang, N. Zhang, and M. Wang, ‘Wireless sensors in agriculture and food industry—Recent development and future perspective’, *Computers and electronics in agriculture*, vol. 50, no. 1, pp. 1–14, 2006.
- [61] D. Bri, M. Garcia, J. Lloret, and P. Dini, ‘Real deployments of wireless sensor networks’, in *2009 Third International Conference on Sensor Technologies and Applications*, 2009, pp. 415–423.
- [62] M. S. Farooq, S. Riaz, A. Abid, T. Umer, and Y. B. Zikria, ‘Role of IoT technology in agriculture: A systematic literature review’, *Electronics*, vol. 9, no. 2, p. 319, 2020.

- [63] M. S. Farooq, S. Riaz, A. Abid, K. Abid, and M. A. Naeem, 'A Survey on the Role of IoT in Agriculture for the Implementation of Smart Farming', *IEEE Access*, vol. 7, pp. 156237–156271, 2019.
- [64] S. Jaiganesh, K. Gunaseelan, and V. Ellappan, 'IOT agriculture to improve food and farming technology', in *2017 Conference on Emerging Devices and Smart Systems (ICEDSS)*, 2017, pp. 260–266.
- [65] D. Davcev, K. Mitreski, S. Trajkovic, V. Nikolovski, and N. Koteli, 'IoT agriculture system based on LoRaWAN', in *2018 14th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS)*, 2018, pp. 1–4.
- [66] S. Singh, I. Chana, and R. Buyya, 'Agri-Info: Cloud based autonomic system for delivering agriculture as a service', *Internet of Things*, vol. 9, p. 100131, 2020.
- [67] S. K. Choudhary, R. S. Jadoun, and H. L. Mandoriya, 'Role of cloud computing technology in agriculture fields', *Computing*, vol. 7, no. 3, 2016.
- [68] K. Ashokkumar, D. D. Chowdary, and C. D. Sree, 'Data analysis and prediction on cloud computing for enhancing productivity in agriculture', in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 590, no. 1, p. 012014.
- [69] L. Zhao, L. He, X. Jin, and W. Yu, 'Design of wireless sensor network middleware for agricultural applications', in *International Conference on Computer and Computing Technologies in Agriculture*, 2013, pp. 270–279.
- [70] N. M. Dabour, 'The role of irrigation in food production and agricultural development in the Near East Region', *Journal of Economic Cooperation*, vol. 23, no. 3, pp. 31–70, 2002.
- [71] S. Tilak, N. B. Abu-Ghazaleh, and W. Heinzelman, 'A taxonomy of wireless micro-sensor network models', *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, vol. 6, no. 2, pp. 28–36, 2002.
- [72] S. Mishra and H. Thakkar, 'Features of WSN and Data Aggregation techniques in WSN: A Survey', *Int. J. Eng. Innov. Technol. (IJEIT)*, vol. 1, no. 4, pp. 264–273, 2012.
- [73] M. S. Manshahia, 'Wireless sensor networks: a survey', *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 7, no. 4, pp. 710–716, 2016.
- [74] P. Bakaraniya and S. Mehta, 'Features of wsn and various routing techniques for wsn: a survey', *International Journal of Research in Engineering and Technology*, vol. 1, no. 3, pp. 349–354, 2012.
- [75] B. Rashid and M. H. Rehmani, 'Applications of wireless sensor networks for urban areas: A survey', *Journal of network and computer applications*, vol. 60, pp. 192–219, 2016.
- [76] J. Lloret, M. Garcia, D. Bri, and S. Sendra, 'A wireless sensor network deployment for rural and forest fire detection and verification', *sensors*, vol. 9, no. 11, pp. 8722–8747, 2009.
- [77] C.-Y. Chong and S. P. Kumar, 'Sensor networks: evolution, opportunities, and challenges', *Proceedings of the IEEE*, vol. 91, no. 8, pp. 1247–1256, 2003.
- [78] T. Arampatzis, J. Lygeros, and S. Manesis, 'A survey of applications of wireless sensors and wireless sensor networks', in *Proceedings of the 2005 IEEE International Symposium on, Mediterrean Conference on Control and Automation Intelligent Control, 2005.*, 2005, pp. 719–724.
- [79] J. A. Stankovic, A. D. Wood, and T. He, 'Realistic applications for wireless sensor networks', in *Theoretical aspects of distributed computing in sensor networks*, Springer, 2011, pp. 835–863.
- [80] R. E. Mohamed, A. I. Saleh, M. Abdelrazzak, and A. S. Samra, 'Survey on wireless sensor network applications and energy efficient routing protocols', *Wireless Personal Communications*, vol. 101, no. 2, pp. 1019–1055, 2018.
- [81] I. F. Akyildiz and M. C. Vuran, 'Factors influencing WSN design', 2010.
- [82] A. J. Swati and R. Priyanka, 'Wireless sensor network (WSN): Architectural design issues and challenges', *Int. J. Comput. Sci. Eng.*, vol. 2, no. 9, pp. 3089–3094, 2010.

- [83] E. P. K. Gilbert, B. Kaliaperumal, and E. B. Rajsingh, 'Research Issues in Wireless Sensor Network Applications: A Survey', *International Journal of information and electronics engineering*, vol. 2, no. 5, p. 702, 2012.
- [84] S. Sharma, R. K. Bansal, and S. Bansal, 'Issues and challenges in wireless sensor networks', in *2013 International Conference on Machine Intelligence and Research Advancement*, 2013, pp. 58–62.
- [85] D. of E. United Nations and P. D. Social Affairs, 'World Population Prospects: The 2019 Revision, Key Findings and Advance Tables', *Working Paper No. ESA/P/WP/248*, 2019.
- [86] O. Publishing, O. for E. Co-operation, and D. Staff, *OECD environmental outlook to 2050: The consequences of inaction*. OECD Publishing, 2012.
- [87] M. McLennan, 'The Global Risks Report 2021 16th Edition'.
- [88] WHO/UNICEF, *Progress on drinking-water, sanitation and hygiene 2000-2017: Special focus on inequalities*. UNICEF, World Health Organization Geneva, Switzerland, 2019.
- [89] 'UNICEF'. <https://www.unicef.org/> (accessed Jun. 24, 2020).
- [90] Unesco, Ed., *Nature-based solutions for water*. Paris: UNESCO, 2018.
- [91] 'Centre d'information sur l'eau'. <https://www.cieau.com/> (accessed Jun. 24, 2020).
- [92] H. Bulkeley and P. Newell, *Governing climate change*. Routledge, 2015.
- [93] M. Allen *et al.*, 'Technical Summary: Global warming of 1.5° C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5° C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty', 2019.
- [94] R. K. Pachauri *et al.*, *Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Ipcc, 2014.
- [95] L. D. Harvey, *Global warming*. Routledge, 2018.
- [96] O. Hoegh-Guldberg *et al.*, 'Impacts of 1.5 C global warming on natural and human systems', *Global warming of 1.5 C. An IPCC Special Report*, 2018.
- [97] W. Bank, *World Bank Group Climate Change Action Plan*. World Bank Washington, DC, 2016.
- [98] 'IPCC — Intergovernmental Panel on Climate Change'. <https://www.ipcc.ch/> (accessed Jun. 24, 2020).
- [99] 'Global Surface Temperature Anomalies | Monitoring References | National Centers for Environmental Information (NCEI)'. <https://www.ncdc.noaa.gov/monitoring-references/faq/anomalies.php> (accessed Jun. 25, 2020).
- [100] R. Connor *et al.*, 'The united nations world water development report 2017. wastewater: the untapped resource', *The United Nations World Water Development Report*, 2017.
- [101] E. Fukase and W. Martin, *Economic growth, convergence, and world food demand and supply*. The World Bank, 2017.
- [102] 'International Water Management Institute (IWMI): A water-secure world'. <https://www.iwmi.cgiar.org/> (accessed Jun. 25, 2020).
- [103] F. FAO, 'The State of Food and Agriculture: Climate change, agriculture and food security', *Agriculture and Food Security*, 2016.
- [104] 'World Resources Institute | Making Big Ideas Happen'. <https://www.wri.org/> (accessed Jun. 25, 2020).
- [105] R. W. Hofste, P. Reig, and L. Schleifer, '17 Countries, Home to One-Quarter of the World's Population, Face Extremely High Water Stress', Jun. 2019, Accessed: Jun. 25, 2020. [Online]. Available: <https://www.wri.org/insights/17-countries-home-one-quarter-worlds-population-face-extremely-high-water-stress>
- [106] 'Direction Générale de l'Eau'. <http://81.192.10.228/> (accessed Jun. 29, 2020).

- [107] 'World Bank Climate Change Knowledge Portal (CCKP, 2021). Morocco'. <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/morocco> (accessed Apr. 29, 2021).
- [108] Z. Zamrane, 'Recherche d'indices de variabilité climatique dans des séries hydroclimatiques au Maroc: identification, positionnement temporel, tendances et liens avec les fluctuations climatiques: cas des grands bassins de la Moulouya, du Sebou et du Tensift', PhD Thesis, Université Montpellier, 2016.
- [109] M. SINAN, A. DAKKINA, S. OUATTAR, and O. MHIRIT, 'IRES "La question de l'eau au Maroc selon l'approche NEXUS dans le contexte du changement climatique"', Rapports thématiques, 2021. [Online]. Available: <https://www.ires.ma/fr/publications/rapports-th%C3%A9matiques/7573-la-question-de-l%E2%80%99eau-au-maroc-selon-l%E2%80%99approche-nexus-dans-le-contexte-du-changement-climatique.html>
- [110] Organisation Météorologique Mondiale, 'Maroc, Etat du climat en 2020', 2020.
- [111] 'CGMS-MAROC'. <http://www.cgms-maroc.ma/> (accessed Jul. 02, 2020).
- [112] DEPF, AFD, DGM, DRPE, and Fondation Initiative AAA, 'DEPF Policy Brief "Morocco in the test of climatic change: Situation, Impacts and response politics in the water and agriculture sectors. Le Maroc à l'épreuve du changement climatique : situation, impacts et politiques de réponse dans les secteurs de l'eau et de l'agriculture"', 2020.
- [113] S. Dahan *et al.*, 'Gestion de la Rareté de l'Eau en Milieu Urbain au Maroc', *Banque Mondiale: Washington, DC, USA*, 2017.
- [114] PNE, 'Plan Nationale d'Eau', Rapport Général, 2015.
- [115] L. Stührenberg, 'Plan Maroc Vert: les grands principes et avancées de la stratégie agricole marocaine', *Bulletins de synthèse souveraineté alimentaire*, vol. 20, 2016.
- [116] Ministère de l'Agriculture, de la Pêche Maritime, du Développement Rural et des Eaux et Forêts, 'AGRICULTURE EN CHIFFRES 2018', 2019. [Online]. Available: http://www.agriculture.gov.ma/sites/default/files/19-00145-book_agricultures_en_chiffres_def.pdf
- [117] 'Site institutionnel du Haut-Commissariat au Plan du Royaume du Maroc', *Site institutionnel du Haut-Commissariat au Plan du Royaume du Maroc*. <https://www.hcp.ma> (accessed Jan. 05, 2021).
- [118] 'FAOSTAT'. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/visualize> (accessed Jul. 05, 2020).
- [119] hydrologie_org, 'hydrologie.org | ressources à propos de l'hydrologie'. <http://hydrologie.org/> (accessed Jul. 05, 2021).
- [120] 'World Bank Group - International Development, Poverty, & Sustainability'. <https://www.worldbank.org/en/home> (accessed Jul. 05, 2020).
- [121] 'FAO Country Profiles:Morocco', *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. <http://www.fao.org/countryprofiles/index/en/?iso3=MAR> (accessed Jul. 05, 2020).
- [122] M. Valipour, 'Comparison of surface irrigation simulation models: full hydrodynamic, zero inertia, kinematic wave', *Journal of Agricultural Science*, vol. 4, no. 12, p. 68, 2012.
- [123] E. Moreno-Jiménez *et al.*, 'Sprinkler irrigation of rice fields reduces grain arsenic but enhances cadmium', *Science of the total environment*, vol. 485, pp. 468–473, 2014.
- [124] S. Dasberg and D. Or, 'Springer Science & Business Media; 2013', *Drip Irrigation*. [Google Scholar].
- [125] 'Home | International Society of Precision Agriculture'. <https://www.ispag.org/> (accessed Jun. 26, 2020).
- [126] K. G. Cassman, 'Ecological intensification of cereal production systems: yield potential, soil quality, and precision agriculture', *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 96, no. 11, pp. 5952–5959, 1999.
- [127] A. McBratney, B. Whelan, T. Ancev, and J. Bouma, 'Future directions of precision agriculture', *Precision agriculture*, vol. 6, no. 1, pp. 7–23, 2005.
- [128] J. V. Stafford, 'Implementing precision agriculture in the 21st century', *Journal of agricultural engineering research*, vol. 76, no. 3, pp. 267–275, 2000.

- [129] D. Levy, W. K. Coleman, and R. E. Veilleux, 'Adaptation of potato to water shortage: irrigation management and enhancement of tolerance to drought and salinity', *American Journal of Potato Research*, vol. 90, no. 2, pp. 186–206, 2013.
- [130] S. Marios and J. Georgiou, 'Precision agriculture: Challenges in sensors and electronics for real-time soil and plant monitoring', in *2017 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS)*, 2017, pp. 1–4.
- [131] A. Milella, G. Reina, and M. Nielsen, 'A multi-sensor robotic platform for ground mapping and estimation beyond the visible spectrum', *Precision agriculture*, vol. 20, no. 2, pp. 423–444, 2019.
- [132] G. Grenier, *Agriculture de précision: comprendre et mettre en oeuvre les bases de la révolution agronomique*. 2018.
- [133] D. Schimmelpfennig, 'Farm profits and adoption of precision agriculture', 2016.
- [134] J. Schieffer and C. Dillon, 'The economic and environmental impacts of precision agriculture and interactions with agro-environmental policy', *Precision Agriculture*, vol. 16, no. 1, pp. 46–61, 2015.
- [135] D. Schimmelpfennig and R. Ebel, 'Sequential adoption and cost savings from precision agriculture', *Journal of Agricultural and Resource Economics*, pp. 97–115, 2016.
- [136] Y. S. Tey and M. Brindal, 'Factors influencing the adoption of precision agricultural technologies: a review for policy implications', *Precision agriculture*, vol. 13, no. 6, pp. 713–730, 2012.
- [137] D. R. Thomas, 'Wireless network', Dec. 24, 2002
- [138] A. Géron, *WiFi Professionnel-3e édition-: La norme 802.11, le déploiement, la sécurité*. Dunod, 2009.
- [139] K. BEYDOUN, 'Conception d'un protocole de routage hiérarchique pour les réseaux de capteurs', Doctorat, DE FRANCHE-COMTE, 2009.
- [140] S. Corson, *J. Marker-Mobile ad hoc networking (MANET): Routing protocol performance issues and evaluation consideration*. 1999.
- [141] D. Dhoutaut, 'Etude du standard IEEE 802.11 dans le cadre des réseaux ad hoc: de la simulation à l'expérimentation', Doctorat, Lyon, 2003.
- [142] W. J. Diepstraten, 'Wireless local area network system', 1994
- [143] H. Zheng, S. Maheshwari, Y. Saifullah, and S. Sreemanthula, 'Internetworking between wman and wlan networks', Nov. 12, 2009
- [144] M. A. M. Vieira, C. N. Coelho, D. jr da Silva, and J. M. da Mata, 'Survey on wireless sensor network devices', in *EFTA 2003. 2003 IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. Proceedings (Cat. No. 03TH8696)*, 2003, vol. 1, pp. 537–544.
- [145] W. Dargie and C. Poellabauer, *Fundamentals of wireless sensor networks: theory and practice*. John Wiley & Sons, 2010.
- [146] M. Li and B. Yang, 'A Survey on Topology issues in Wireless Sensor Network.', in *ICWN*, 2006, p. 503.
- [147] H. Ren and M. Q.-H. Meng, 'Game-theoretic modeling of joint topology control and power scheduling for wireless heterogeneous sensor networks', *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 6, no. 4, pp. 610–625, 2009.
- [148] M. Li, Z. Li, and A. V. Vasilakos, 'A survey on topology control in wireless sensor networks: Taxonomy, comparative study, and open issues', *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, no. 12, pp. 2538–2557, 2013.
- [149] S. Zhao and D. Raychaudhuri, 'Scalability and performance evaluation of hierarchical hybrid wireless networks', *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 17, no. 5, pp. 1536–1549, 2009.
- [150] M. Younis, I. F. Senturk, K. Akkaya, S. Lee, and F. Senel, 'Topology management techniques for tolerating node failures in wireless sensor networks: A survey', *Computer Networks*, vol. 58, pp. 254–283, 2014.

- [151] G. Kakamanshadi, S. Gupta, and S. Singh, 'A survey on fault tolerance techniques in wireless sensor networks', in *2015 international conference on green computing and internet of things (ICGCIoT)*, 2015, pp. 168–173.
- [152] K. Martinez, R. Ong, and J. Hart, 'Glacsweb: a sensor network for hostile environments', in *2004 First Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, 2004. IEEE SECON 2004.*, 2004, pp. 81–87.
- [153] P. Nicopolitidis, G. I. Papadimitriou, A. S. Pomportsis, P. Sarigiannidis, and M. S. Obaidat, 'Adaptive wireless networks using learning automata', *IEEE Wireless Communications*, vol. 18, no. 2, pp. 75–81, 2011.
- [154] D. Wu, Y. Cai, L. Zhou, and J. Wang, 'A cooperative communication scheme based on coalition formation game in clustered wireless sensor networks', *IEEE Transactions on wireless communications*, vol. 11, no. 3, pp. 1190–1200, 2012.
- [155] Y. Yao, Q. Cao, and A. V. Vasilakos, 'EDAL: An energy-efficient, delay-aware, and lifetime-balancing data collection protocol for wireless sensor networks', in *2013 IEEE 10th international conference on mobile ad-hoc and sensor systems*, 2013, pp. 182–190.
- [156] S. Misra, P. V. Krishna, V. Saritha, H. Agarwal, L. Shu, and M. S. Obaidat, 'Efficient medium access control for cyber-physical systems with heterogeneous networks', *IEEE Systems Journal*, vol. 9, no. 1, pp. 22–30, 2015, doi: 10.1109/JSYST.2013.2253421.
- [157] S. Misra and A. Jain, 'Policy controlled self-configuration in unattended wireless sensor networks', *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 34, no. 5, pp. 1530–1544, 2011.
- [158] H. Karl and A. Willig, 'A short survey of wireless sensor networks', *Telecommunication Networks Group, Technische Universitat Berlin, Hasso-Plattner Institute, Potsdam*, 2003.
- [159] C. Perkins, *Ad hoc networks*. Reading: Addison-Wesley, 2000.
- [160] V. Mhatre and C. Rosenberg, 'Design guidelines for wireless sensor networks: communication, clustering and aggregation', *Ad hoc networks*, vol. 2, no. 1, pp. 45–63, 2004.
- [161] N. Xu, 'A survey of sensor network applications', *IEEE communications magazine*, vol. 40, no. 8, pp. 102–114, 2002.
- [162] M. Sunita, J. Malik, and S. Mor, 'Comprehensive study of applications of wireless sensor network', *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, vol. 2, no. 11, pp. 56–60, 2012.
- [163] M. F. Othman and K. Shazali, 'Wireless sensor network applications: A study in environment monitoring system', *Procedia Engineering*, vol. 41, pp. 1204–1210, 2012.
- [164] M. Prist, 'Wireless Sensor Networks: Enhancements and Applications', Doctorat, Università Politecnica delle Marche, 2015.
- [165] D. P. Agrawal, 'Applications of sensor networks', in *Embedded Sensor Systems*, Springer, 2017, pp. 35–63.
- [166] D. Li, K. D. Wong, Y. H. Hu, and A. M. Sayeed, 'Detection, classification, and tracking of targets', *IEEE signal processing magazine*, vol. 19, no. 2, pp. 17–29, 2002.
- [167] I. Ahmad, K. Shah, and S. Ullah, 'Military applications using wireless sensor networks: A survey', *Int. J. Eng. Sci*, vol. 6, no. 6, p. 7039, 2016.
- [168] V. Shnayder, B. Chen, K. Lorincz, T. R. Fulford-Jones, and M. Welsh, 'Sensor networks for medical care', 2005.
- [169] J. Ko, C. Lu, M. B. Srivastava, J. A. Stankovic, A. Terzis, and M. Welsh, 'Wireless sensor networks for healthcare', *Proceedings of the IEEE*, vol. 98, no. 11, pp. 1947–1960, 2010.
- [170] S. Movassaghi, M. Abolhasan, J. Lipman, D. Smith, and A. Jamalipour, 'Wireless body area networks: A survey', *IEEE Communications surveys & tutorials*, vol. 16, no. 3, pp. 1658–1686, 2014.
- [171] S. Abdullah, S. Bertalan, S. Masar, A. Coskun, and I. Kale, 'A wireless sensor network for early forest fire detection and monitoring as a decision factor in the context of a complex integrated emergency response system', in *2017 IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems (EESMS)*, 2017, pp. 1–5.

- [172] E. A. Basha, S. Ravela, and D. Rus, ‘Model-based monitoring for early warning flood detection’, in *Proceedings of the 6th ACM conference on Embedded network sensor systems*, 2008, pp. 295–308.
- [173] G. Liu, R. Tan, R. Zhou, G. Xing, W.-Z. Song, and J. M. Lees, ‘Volcanic earthquake timing using wireless sensor networks’, in *2013 ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*, 2013, pp. 91–102.
- [174] W. Y. Yi, K. M. Lo, T. Mak, K. S. Leung, Y. Leung, and M. L. Meng, ‘A survey of wireless sensor network based air pollution monitoring systems’, *Sensors*, vol. 15, no. 12, pp. 31392–31427, 2015.
- [175] A. Davis and H. Chang, ‘Underwater wireless sensor networks’, in *2012 Oceans*, 2012, pp. 1–5.
- [176] I. F. Akyildiz and E. P. Stuntebeck, ‘Wireless underground sensor networks: Research challenges’, *Ad Hoc Networks*, vol. 4, no. 6, pp. 669–686, 2006.
- [177] L. Li, M. C. Vuran, and I. F. Akyildiz, ‘Characteristics of underground channel for wireless underground sensor networks’, in *Proc. Med-Hoc-Net*, 2007, vol. 7, pp. 13–15.
- [178] X. Yu, P. Wu, W. Han, and Z. Zhang, ‘A survey on wireless sensor network infrastructure for agriculture’, *Computer Standards & Interfaces*, vol. 35, no. 1, pp. 59–64, 2013.
- [179] X. Yu, W. Han, and Z. Zhang, ‘Path loss estimation for wireless underground sensor network in agricultural application’, *Agricultural Research*, vol. 6, no. 1, pp. 97–102, 2017.
- [180] L. Lanbo, Z. Shengli, and C. Jun-Hong, ‘Prospects and problems of wireless communication for underwater sensor networks’, *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 8, no. 8, pp. 977–994, 2008.
- [181] J. Heidemann, W. Ye, J. Wills, A. Syed, and Y. Li, ‘Research challenges and applications for underwater sensor networking’, in *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2006. WCNC 2006.*, 2006, vol. 1, pp. 228–235.
- [182] A. Khasawneh, M. S. B. Abd Latiff, O. Kaiwartya, and H. Chizari, ‘A reliable energy-efficient pressure-based routing protocol for underwater wireless sensor network’, *Wireless Networks*, vol. 24, no. 6, pp. 2061–2075, 2018.
- [183] J. Rezazadeh, ‘Mobile wireless sensor networks overview’, *International Journal of Computer Communications and Networks (IJCCN)*, vol. 2, no. 1, 2012.
- [184] S. M. Mohamed, H. S. Hamza, and I. A. Saroit, ‘Coverage in mobile wireless sensor networks (M-WSN): A survey’, *Computer Communications*, vol. 110, pp. 133–150, 2017.
- [185] M. A. Matin, *Wireless sensor networks: Technology and protocols*. BoD–Books on Demand, 2012.
- [186] D. Goyal and M. R. Tripathy, ‘Routing protocols in wireless sensor networks: A survey’, in *2012 Second International Conference on Advanced Computing & Communication Technologies*, 2012, pp. 474–480.
- [187] S. M. Zin, N. B. Anuar, M. L. M. Kiah, and A.-S. K. Pathan, ‘Routing protocol design for secure WSN: Review and open research issues’, *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 41, pp. 517–530, 2014.
- [188] G. Asch, ‘Les capteurs en instrumentation industrielle’, *Dunod, Paris*, pp. 319–394, 1998.
- [189] N. Noury, ‘Du signal à l’information: le capteur intelligent: exemples industriels et en médecine’, PhD Thesis, 2002.
- [190] G. Asch and B. Poussery, *Les capteurs en instrumentation industrielle-8e éd.* Dunod, 2017.
- [191] D. Bhattacharyya, T. Kim, and S. Pal, ‘A comparative study of wireless sensor networks and their routing protocols’, *Sensors*, vol. 10, no. 12, pp. 10506–10523, 2010.
- [192] ‘Defense Advanced Research Projects Agency’. <https://www.darpa.mil/> (accessed May 30, 2021).
- [193] ‘SMART DUST’. <https://people.eecs.berkeley.edu/~pister/SmartDust/> (accessed Jan. 03, 2021).

- [194] 'mica2.pdf'. Accessed: Jan. 03, 2021. [Online]. Available: <http://trl.iba.edu.pk/News/mica2.pdf>
- [195] 'TinyOS Home Page'. <http://www.tinyos.net/> (accessed Jan. 13, 2021).
- [196] H. Laurila, 'Sondes de température Pt100: ce qu'il faut savoir'. <https://blog.beamex.com/fr/sondes-de-temperature-pt100-ce-quil-faut-savoir> (accessed Jan. 14, 2021).
- [197] 'LM35 data sheet, product information and support | TI.com'. <https://www.ti.com/product/LM35?CMP=conv-poasamples#parametrics> (accessed Jan. 08, 2021).
- [198] 'pj-691.pdf'. Accessed: Jan. 14, 2021. [Online]. Available: <https://www.gotronic.fr/pj-691.pdf>
- [199] 'Type K Thermocouple - Type K Thermocouples - K Type Thermocouples - K Type Thermocouple'. <https://www.thermocoupleinfo.com/type-k-thermocouple.htm> (accessed Jan. 14, 2021).
- [200] 'hb303f.pdf'. Accessed: Jan. 14, 2021. [Online]. Available: http://www.wimesure.fr/cbx/_ftp/hb303f.pdf
- [201] 'Diviner 2000'. <http://www.farmingit.com.au/Diviner.php> (accessed Jan. 14, 2021).
- [202] 'enviroscan.pdf'. Accessed: Jan. 14, 2021. [Online]. Available: <https://s.campbellsci.com/documents/fr/manuals/enviroscan.pdf>
- [203] J. Haule and K. Michael, 'Deployment of wireless sensor networks (WSN) in automated irrigation management and scheduling systems: a review', in *Proceedings of the 2nd Pan African international conference on science, computing and telecommunications (PACT 2014)*, 2014, pp. 86–91.
- [204] W. Difallah, K. Benahmed, B. Draoui, and F. Bounaama, 'Implementing wireless sensor networks for smart irrigation', *Taiwan water conservancy*, vol. 65, no. 3, 2017.
- [205] S. Kaur and Deepali, 'A SURVEY ON AUTOMATIC IRRIGATION SYSTEM USING WIRELESS SENSOR NETWORK', vol. 4, no. 8, p. 13, 2017.
- [206] P. Munoth, R. Goyal, and K. Tiwari, 'Sensor based irrigation system: A review', *NCACE. USA*, 2016.
- [207] X. Zhu, P. Chikangaise, W. Shi, W.-H. Chen, and S. Yuan, 'Review of intelligent sprinkler irrigation technologies for remote autonomous system.', *International Journal of Agricultural & Biological Engineering*, vol. 11, no. 1, 2018.
- [208] D. C. Mariano, C. Leite, L. H. Santos, R. E. Rocha, and R. C. de Melo-Minardi, 'A guide to performing systematic literature reviews in bioinformatics', *arXiv preprint arXiv:1707.05813*, 2017.
- [209] A. Nightingale, 'A guide to systematic literature reviews', *Surgery (Oxford)*, vol. 27, no. 9, pp. 381–384, 2009.
- [210] S. Keele, 'Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering', Citeseer, 2007.
- [211] J. P. Higgins *et al.*, *Cochrane handbook for systematic reviews of interventions*. John Wiley & Sons, 2008.
- [212] M. Bearman *et al.*, 'Systematic review methodology in higher education', *Higher Education Research & Development*, vol. 31, no. 5, pp. 625–640, 2012.
- [213] 'ScienceDirect'. <https://www.sciencedirect.com/> (accessed Jan. 29, 2021).
- [214] 'Scopus preview - Scopus - Welcome to Scopus'. <https://www.scopus.com/> (accessed Jan. 29, 2021).
- [215] 'Web of Science'. <https://webofknowledge.com>
- [216] 'Springer - International Publisher Science, Technology, Medicine', www.springer.com. <https://www.springer.com/gp> (accessed Jan. 29, 2021).
- [217] 'IEEE Xplore'. <https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>
- [218] 'MDPI'. <https://www.mdpi.com/>
- [219] 'ACM Digital Library'. <https://dl.acm.org/>
- [220] 'Google Scholar'. <https://scholar.google.com/> (accessed Jan. 29, 2021).

- [221] D. Tranfield, D. Denyer, and P. Smart, 'Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review', *British Journal of Management*, vol. 14, no. 3, pp. 207–222, 2003, doi: <https://doi.org/10.1111/1467-8551.00375>.
- [222] 'Publications impact indexes', *Mondragon Unibertsitatea*. <https://www.mondragon.edu/en/web/biblioteca/publications-impact-indexes> (accessed Feb. 08, 2021).
- [223] D. Moher, A. Liberati, J. Tetzlaff, D. G. Altman, and P. Group, 'Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement', *PLoS medicine*, vol. 6, no. 7, p. e1000097, 2009.
- [224] M. Damas, A. M. Prados, F. Gómez, and G. Olivares, 'HidroBus® system: fieldbus for integrated management of extensive areas of irrigated land', *Microprocessors and Microsystems*, vol. 25, no. 3, pp. 177–184, 2001.
- [225] R. Morais, A. Valente, and C. Serôdio, 'A wireless sensor network for smart irrigation and environmental monitoring: A position article', in *5th European federation for information technology in agriculture, food and environment and 3rd world congress on computers in agriculture and natural resources (EFITA/WCCA)*, 2005, pp. 845–850.
- [226] B. Kitchenham, 'Procedures for performing systematic reviews', *Keele, UK, Keele University*, vol. 33, no. 2004, pp. 1–26, 2004.
- [227] S. S. Avatade and S. P. Dhanure, 'Irrigation system using a wireless sensor network and GPRS', *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, vol. 4, no. 5, pp. 521–524, 2015.
- [228] Y. Kim and R. G. Evans, 'Software design for wireless sensor-based site-specific irrigation', *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 66, no. 2, pp. 159–165, 2009.
- [229] H. Navarro-Hellín, R. Torres-Sánchez, F. Soto-Valles, C. Albaladejo-Pérez, J. A. López-Riquelme, and R. Domingo-Miguel, 'A wireless sensors architecture for efficient irrigation water management', *Agricultural Water Management*, vol. 151, pp. 64–74, 2015.
- [230] S. A. Nikolidakis, D. Kandris, D. D. Vergados, and C. Douligeris, 'Energy efficient automated control of irrigation in agriculture by using wireless sensor networks', *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 113, pp. 154–163, 2015, doi: 10.1016/j.compag.2015.02.004.
- [231] Y. Kim, R. G. Evans, and W. M. Iversen, 'Remote sensing and control of an irrigation system using a distributed wireless sensor network', *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, vol. 57, no. 7, pp. 1379–1387, 2008.
- [232] C. B. Hedley, P. Roudier, I. J. Yule, J. Ekanayake, and S. Bradbury, 'Soil water status and water table depth modelling using electromagnetic surveys for precision irrigation scheduling', *Geoderma*, vol. 199, pp. 22–29, 2013.
- [233] J. Gutierrez, J. F. Villa-Medina, A. Nieto-Garibay, and M. A. Porta-Gandara, 'Automated Irrigation System Using a Wireless Sensor Network and GPRS Module', *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 1, no. 63, pp. 166–176, 2014.
- [234] D. I. Afolabi, L. Daniyan, K. Mpofu, and R. Boitumelu, 'Development and Performance Evaluation of Automated Irrigation System', in *2019 Southern African Universities Power Engineering Conference/Robotics and Mechatronics/Pattern Recognition Association of South Africa (SAUPEC/RobMech/PRASA)*, 2019, pp. 12–16.
- [235] S. Sawant, S. S. Durbha, and A. Jagarlapudi, 'Interoperable agro-meteorological observation and analysis platform for precision agriculture: A case study in citrus crop water requirement estimation', *Computers and electronics in agriculture*, vol. 138, pp. 175–187, 2017.
- [236] F. Viani, M. Bertolli, M. Salucci, and A. Polo, 'Low-cost wireless monitoring and decision support for water saving in agriculture', *IEEE sensors journal*, vol. 17, no. 13, pp. 4299–4309, 2017.
- [237] R. Khan, I. Ali, M. Zakarya, M. Ahmad, M. Imran, and M. Shoaib, 'Technology-assisted decision support system for efficient water utilization: A real-time testbed for irrigation using wireless sensor networks', *IEEE Access*, vol. 6, pp. 25686–25697, 2018.
- [238] C. Cambra, S. Sendra, J. Lloret, and R. Lacuesta, 'Smart system for bicarbonate control in irrigation for hydroponic precision farming', *Sensors*, vol. 18, no. 5, p. 1333, 2018.

- [239] W. Zhao, J. Li, R. Yang, and Y. Li, 'Determining placement criteria of moisture sensors through temporal stability analysis of soil water contents for a variable rate irrigation system', *Precision agriculture*, vol. 19, no. 4, pp. 648–665, 2018.
- [240] A. Imteaj, T. Rahman, M. K. Hossain, and S. Zaman, 'IoT based autonomous percipient irrigation system using raspberry Pi', in *2016 19th International Conference on Computer and Information Technology (ICCIIT)*, 2016, pp. 563–568.
- [241] W. Difallah, K. Benahmed, B. Draoui, and F. Bounaama, 'Linear Optimization Model for Efficient Use of Irrigation Water', *International Journal of Agronomy*, vol. 2017, p. 5353648, 2017, doi: 10.1155/2017/5353648.
- [242] G. Nagarajan and R. I. Minu, 'Wireless Soil Monitoring Sensor for Sprinkler Irrigation Automation System', *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 98, no. 2, pp. 1835–1851, 2018, doi: 10.1007/s11277-017-4948-y.
- [243] Y. Zhou, X. Yang, L. Wang, and Y. Ying, 'A wireless design of low-cost irrigation system using ZigBee technology', in *2009 International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing*, 2009, vol. 1, pp. 572–575.
- [244] S. Katyara, M. A. Shah, S. Zardari, B. S. Chowdhry, and W. Kumar, 'WSN Based Smart Control and Remote Field Monitoring of Pakistan's Irrigation System Using SCADA Applications', *Wireless Pers Commun*, vol. 95, no. 2, pp. 491–504, 2017, doi: 10.1007/s11277-016-3905-5.
- [245] M. Işık, Y. Sönmez, C. Yılmaz, V. Özdemir, and E. Yılmaz, 'Precision Irrigation System (PIS) Using Sensor Network Technology Integrated with IOS/Android Application', *Applied Sciences*, vol. 7, no. 9, p. 891, 2017, doi: 10.3390/app7090891.
- [246] M. Dursun and S. Ozden, 'A wireless application of drip irrigation automation supported by soil moisture sensors', *Scientific Research and Essays*, vol. 6, no. 7, pp. 1573–1582, 2011.
- [247] M. Shaker and A. Imran, 'Greenhouse Micro Climate Monitoring Based On WSN with Smart Irrigation Technique', *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 7, no. 12, pp. 1566–1571, 2013.
- [248] A. González-Briones, J. A. Castellanos-Garzón, Y. Mezquita Martín, J. Prieto, and J. M. Corchado, 'A framework for knowledge discovery from wireless sensor networks in rural environments: a crop irrigation systems case study', *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2018, 2018.
- [249] A. González-Briones, Y. Mezquita, J. A. Castellanos-Garzón, J. Prieto, and J. M. Corchado, 'Intelligent multi-agent system for water reduction in automotive irrigation processes', *Procedia Computer Science*, vol. 151, pp. 971–976, 2019, doi: 10.1016/j.procs.2019.04.136.
- [250] G. Villarrubia, J. F. D. Paz, D. H. Iglesia, and J. Bajo, 'Combining multi-agent systems and wireless sensor networks for monitoring crop irrigation', *Sensors*, vol. 17, no. 8, p. 1775, 2017.
- [251] I. A. Rahim Khan, M. A. Suryani, M. Ahmad, and M. Zakarya, 'Wireless sensor network based irrigation management system for container grown crops in Pakistan', *World Applied Sciences Journal*, vol. 24, no. 8, pp. 1111–1118, 2013.
- [252] P. B. Chikankar, D. Mehetre, and S. Das, 'An automatic irrigation system using ZigBee in wireless sensor network', in *2015 International Conference on Pervasive Computing (ICPC)*, 2015, pp. 1–5.
- [253] C. M. Angelopoulos, S. Nikolettseas, and G. C. Theofanopoulos, 'A smart system for garden watering using wireless sensor networks', in *Proceedings of the 9th ACM international symposium on Mobility management and wireless access*, 2011, pp. 167–170.
- [254] T. H. F. Khan and D. S. Kumar, 'Ambient crop field monitoring for improving context based agricultural by mobile sink in WSN', *J Ambient Intell Human Comput*, vol. 11, no. 4, pp. 1431–1439, 2020, doi: 10.1007/s12652-019-01177-6.
- [255] A. C. Bartlett, A. A. Andales, M. Arabi, and T. A. Bauder, 'A smartphone app to extend use of a cloud-based irrigation scheduling tool', *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 111, pp. 127–130, 2015.

- [256] J. G. Jagüey, J. F. Villa-Medina, A. López-Guzmán, and M. Á. Porta-Gándara, ‘Smartphone irrigation sensor’, *IEEE Sensors journal*, vol. 15, no. 9, pp. 5122–5127, 2015.
- [257] S. L. SU, D. N. Singh, and M. S. Baghini, ‘A critical review of soil moisture measurement’, *Measurement*, vol. 54, pp. 92–105, 2014.
- [258] S. A. Kumar and P. Ilango, ‘The impact of wireless sensor network in the field of precision agriculture: A review’, *Wireless Personal Communications*, vol. 98, no. 1, pp. 685–698, 2018.
- [259] J. D. Lea-Cox, ‘Using wireless sensor networks for precision irrigation scheduling’, *Problems, perspectives and challenges of agricultural water management*. InTech Press, Rijeka, Croatia, pp. 233–258, 2012.
- [260] ‘Digital Humidity Sensor SHT85 (RH/T) | Sensirion’. <https://www.sensirion.com/en/environmental-sensors/humidity-sensors/sht85-pin-type-humidity-sensor-enabling-easy-replaceability/> (accessed Jan. 08, 2021).
- [261] ‘DS18B20 - Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer’, p. 20.
- [262] ‘EE181-L: Air Temperature and Relative Humidity Sensor’. <https://www.campbellsci.com/ee181-l> (accessed Jan. 08, 2021).
- [263] ‘R. M. Young Company :: Products :: Wind Monitor - Model 05103’. <http://www.youngusa.com/products/7/5.html> (accessed Jan. 08, 2021).
- [264] ‘cm-100datasheet.pdf’. Accessed: Jan. 08, 2021. [Online]. Available: <http://www.overtechsolucoes.com.br/storage/datasheets/cm-100datasheet.pdf>
- [265] ‘LI200X-L - Silicone Pyranometer with Fixed Daylight Calibration’. <https://www.campbellsci.com/li200x-l> (accessed Jan. 08, 2021).
- [266] ‘hmp35c.pdf’. Accessed: Jan. 08, 2021. [Online]. Available: <https://s.campbellsci.com/documents/br/manuals/hmp35c.pdf>
- [267] ‘STS3x - Temperature Sensor | Sensirion’. <https://www.sensirion.com/en/environmental-sensors/temperature-sensors/> (accessed Jan. 08, 2021).
- [268] ‘Compact Weather Sensors - WS500-UMB Smart Weather Sensor’. <https://www.lufft.com/products/compact-weather-sensors-293/ws500-umb-smart-weather-sensor-1842> (accessed Jan. 08, 2021).
- [269] ‘CS320 - Digital Thermopile Pyranometer’. <https://www.campbellsci.com/cs320> (accessed Jan. 08, 2021).
- [270] ‘SHT7x (RH/T) - Digital Humidity Sensor | Sensirion’. <https://www.sensirion.com/en/environmental-sensors/humidity-sensors/pintype-digital-humidity-sensors/> (accessed Jan. 08, 2021).
- [271] ‘13876_EC-5_Web.pdf’. Accessed: Jan. 08, 2021. [Online]. Available: http://manuals.decagon.com/Manuals/13876_EC-5_Web.pdf
- [272] ‘Soil Moisture Sensor - VH400’. <https://vegetronix.com/Products/VH400/> (accessed Jan. 08, 2021).
- [273] ‘Specifications of EC 250’, 2020. www.stevenswater.com/catalog/products/
- [274] ‘Home | ICT International | ICT International Select Region’. <http://www.ictinternational.com/> (accessed Jan. 08, 2021).
- [275] ‘HydraProbe | Stevens Water’. <https://stevenswater.com/products/hydraprobe/> (accessed Jan. 08, 2021).
- [276] ‘DS1822.pdf’. Accessed: Jan. 08, 2021. [Online]. Available: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS1822.pdf>
- [277] ‘SpecsS8000.pdf’. Accessed: Jan. 08, 2021. [Online]. Available: <https://www.sensorex.com/docs/specs/SpecsS8000.pdf>
- [278] ‘MP406 Moisture Sensor | ICT International’. <http://www.ictinternational.com/products/mp406/mp406-moisture-sensor> (accessed Jan. 08, 2021).

- [279] '403 WATERMARK Sensor-WEB.pdf'. Accessed: Jan. 08, 2021. [Online]. Available: <https://www.irrometer.com/pdf/sensors/403%20WATERMARK%20Sensor-WEB.pdf>
- [280] '107: Temperature Probe'. <https://www.campbellsci.com/107> (accessed Jan. 08, 2021).
- [281] 'AquaTrak 5000', 2020. <https://www.stevenswater.com/>
- [282] 'PogoDataSheet-.pdf'. Accessed: Jan. 08, 2021. [Online]. Available: <https://www.bwallen.com/PogoDataSheet-.pdf>
- [283] 'Specifications of pH 3000', 2020. https://www.stepsystems.de/147-1-pH-meter-3000.html?article_id=147&clang=1
- [284] 'CS625 - Water Content Reflectometer for CR200(X)-Series and CR300-Series'. <https://www.campbellsci.com/cs625> (accessed Jan. 08, 2021).
- [285] '109 - Temperature Probe'. <https://www.campbellsci.com/109> (accessed Jan. 08, 2021).
- [286] 'SEN10972 pH Sensor kit', 2020. www.generationrobots.com
- [287] 'DB_LMK331_E.pdf'. Accessed: Jan. 08, 2021. [Online]. Available: https://www.bdsensors.de/fileadmin/user_upload/Download/Datenblaetter_datasheets/DB_LMK331_E.pdf
- [288] C. Goumopoulos, B. O'Flynn, and A. Kameas, 'Automated zone-specific irrigation with wireless sensor/actuator network and adaptable decision support', *Computers and electronics in agriculture*, vol. 105, pp. 20–33, 2014.
- [289] D. Masseroni, A. Facchi, E. V. Depoli, F. M. Renga, and C. Gandolfi, 'Irrig-OH: An Open-Hardware Device for Soil Water Potential Monitoring and Irrigation Management', *Irrigation and Drainage*, vol. 65, no. 5, pp. 750–761, 2016.
- [290] Z. A. Shaikh, H. Yousuf, F. Nawaz, M. Kirmani, and S. Kiran, 'Crop irrigation control using wireless sensor and actuator network (WSAN)', in *2010 International Conference on Information and Emerging Technologies*, 2010, pp. 1–5.
- [291] N. Kabilan and M. S. Selvi, 'Surveillance and steering of irrigation system in cloud using Wireless Sensor Network and Wi-Fi module', in *2016 International Conference on Recent Trends in Information Technology (ICRTIT)*, 2016, pp. 1–5.
- [292] T. Savić and M. Radonjić, 'WSN architecture for smart irrigation system', in *2018 23rd International Scientific-Professional Conference on Information Technology (IT)*, 2018, pp. 1–4.
- [293] B. H. Kumar and D. Sunehra, 'WSN based Automatic Irrigation and Security System using Raspberry Pi Board', in *2017 International Conference on Current Trends in Computer, Electrical, Electronics and Communication (CTCEEC)*, 2017, pp. 1097–1103.
- [294] M. Moghaddam *et al.*, 'A wireless soil moisture smart sensor web using physics-based optimal control: Concept and initial demonstrations', *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 3, no. 4, pp. 522–535, 2010.
- [295] L. Ndaro and W. Liqiang, 'Zig Bee Technology and Sensor Network in Irrigation Control Monitoring System', vol. 2, no. 10, p. 6, 2013.
- [296] R. N. Kumari, 'Microcontroller based irrigation using sensor [a smart way for irrigation]', *International Journal of Research in Engineering & Advanced Technology*, vol. 2, no. 2, pp. 1–3, 2014.
- [297] P. Wa, 'GS3', p. 27.
- [298] R. Saha, N. Raghuwanshi, S. Upadhyaya, W. Wallender, and D. Slaughter, 'Water sensors with cellular system eliminate tail water drainage in alfalfa irrigation', *California Agriculture*, vol. 65, no. 4, pp. 202–207, 2011.
- [299] Y. Erdem *et al.*, 'Crop water stress index for assessing irrigation scheduling of drip irrigated broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *italica*)', *Agricultural Water Management*, vol. 98, no. 1, pp. 148–156, 2010.
- [300] T. C. Meyer and G. P. Hancke, 'Design of a smart sprinkler system', in *TENCON 2015-2015 IEEE Region 10 Conference*, 2015, pp. 1–6.

- [301] M. E. Obota and H. C. Inyama, 'Soil moisture based irrigation control system for rice cropping using wireless sensor network', *The International Journal Of Engineering And Science (Ijes)*, vol. 2, no. 3, pp. 37–43, 2013.
- [302] P. Baronti, P. Pillai, V. W. Chook, S. Chessa, A. Gotta, and Y. F. Hu, 'Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15. 4 and ZigBee standards', *Computer communications*, vol. 30, no. 7, pp. 1655–1695, 2007.
- [303] C. Wang, T. Jiang, and Q. Zhang, 'Zigbee And Ieee 802.15. 4 Standards', in *ZigBee Network Protocols and Applications*, Auerbach Publications, 2016, pp. 55–76.
- [304] T. Obaid, H. Rashed, A. Abou-Elnour, M. Rehan, M. M. Saleh, and M. Tarique, 'ZigBee Technology and its application in Wireless Home Automation systems: a survey', *International Journal of Computer Networks & Communications*, vol. 6, no. 4, p. 115, 2014.
- [305] 'ZigBee Specifications', *Zigbee Alliance*. <https://zigbeealliance.org/> (accessed Jan. 09, 2021).
- [306] 'IEEE 802.15.4-2006 - IEEE Standard for Information technology-- Local and metropolitan area networks-- Specific requirements-- Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)'. https://standards.ieee.org/standard/802_15_4-2006.html (accessed Jan. 09, 2021).
- [307] 'IEEE Standard for Local and metropolitan area networks--Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)', *IEEE Std 802.15.4-2011 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2006)*, pp. 1–314, Sep. 2011, doi: 10.1109/IEEESTD.2011.6012487.
- [308] 'IEEE 802.15.4-2015 - IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks'. https://standards.ieee.org/standard/802_15_4-2015.html (accessed Jan. 09, 2021).
- [309] J.-S. Lee, 'Performance evaluation of IEEE 802.15. 4 for low-rate wireless personal area networks', *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 52, no. 3, pp. 742–749, 2006.
- [310] J.-S. Lee and Y.-C. Huang, 'ITRI ZBnode: A ZigBee/IEEE 802.15. 4 platform for wireless sensor networks', in *2006 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 2006, vol. 2, pp. 1462–1467.
- [311] F. D. Ohrtman, K. Roeder, and W.-F. Handbook, 'Building 802.11 b Wireless Networks', *New York*, 2003.
- [312] S. Kaushik, 'An overview of technical aspect for WiFi networks technology', *International Journal of Electronics and Computer Science Engineering (IJECSSE, ISSN: 2277-1956)*, vol. 1, no. 01, pp. 28–34, 2012.
- [313] 'Wi-Fi Alliance'. <https://www.wi-fi.org/> (accessed Jan. 09, 2021).
- [314] 'IEEE 802.11-2012 - IEEE Standard for Information technology--Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks--Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications'. https://standards.ieee.org/standard/802_11-2012.html (accessed Jan. 09, 2021).
- [315] M. Kaushik and S. Kaushik, 'An overview of Technical aspect for Wireless Fidelity (Wi-Fi-Wireless Network Technology)', *International Journal of Advances in Electrical and Electronics Engineering (IJAEEE, ISSN: 2319-1112)*, vol. 1, no. 02, pp. 173–178, 2012.
- [316] C. Bisdikian, 'An overview of the Bluetooth wireless technology', *IEEE Communications magazine*, vol. 39, no. 12, pp. 86–94, 2001.
- [317] 'Bluetooth® Technology Website'. <https://www.bluetooth.com/> (accessed Jan. 09, 2021).
- [318] 'IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. - P802.15.1/D6 - Approved IEEE Draft Standard for Information Technology-- Telecommunications and Information Exchange Between Systems-- Local and Metropolitan Area Networks-- Specific Requirements Part 15.1Reva: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Wireless Personal Area Networks (WPANs) (Replaced by IEEE 802.15.1-2005) | Engineering360'. <https://reference.global-spec.com/standard/3794150/p802-15-1-d6> (accessed Jan. 09, 2021).
- [319] S. I. G. Bluetooth, 'Specification of the Bluetooth System-Covered Core Package version: 4.0', *Bluetooth SIG*, 2010.

- [320] A. Kurawar, A. Koul, and V. T. Patil, 'Survey of bluetooth and applications', *Int. Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET)*, vol. 3, no. 8, pp. 2832–2837, 2014.
- [321] R. Heydon and N. Hunn, 'Bluetooth low energy', *CSR Presentation, Bluetooth SIG* <https://www.bluetooth.org/DocMan/handlers/DownloadDoc.ashx>, 2012.
- [322] B. Ghribi and L. Logrippo, 'Understanding GPRS: the GSM packet radio service', *Computer Networks*, vol. 34, no. 5, pp. 763–779, 2000.
- [323] '3GPP'. <https://www.3gpp.org/> (accessed Jan. 09, 2021).
- [324] R. Aquino-Santos, A. González-Potes, A. Edwards-Block, and R. A. Virgen-Ortiz, 'Developing a new wireless sensor network platform and its application in precision agriculture', *Sensors*, vol. 11, no. 1, pp. 1192–1211, 2011.
- [325] E. Georgakakis, S. A. Nikolidakis, D. D. Vergados, and C. Douligeris, 'An analysis of bluetooth, zigbee and bluetooth low energy and their use in wbans', in *International Conference on Wireless Mobile Communication and Healthcare*, 2010, pp. 168–175.
- [326] J. Haase, 'Wireless network standards for building automation', in *Embedded Systems for Smart Appliances and Energy Management*, Springer, 2013, pp. 53–65.
- [327] A. Ali, G. A. Shah, M. O. Farooq, and U. Ghani, 'Technologies and challenges in developing machine-to-machine applications: A survey', *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 83, pp. 124–139, 2017.
- [328] H. Jawad, R. Nordin, S. Gharghan, A. Jawad, and M. Ismail, 'Energy-Efficient Wireless Sensor Networks for Precision Agriculture: A Review', *Sensors*, vol. 17, no. 8, p. 1781, 2017, doi: 10.3390/s17081781.
- [329] V. C. Gungor *et al.*, 'Smart grid technologies: Communication technologies and standards', *IEEE transactions on Industrial informatics*, vol. 7, no. 4, pp. 529–539, 2011.
- [330] T. Rault, A. Bouabdallah, and Y. Challal, 'Energy efficiency in wireless sensor networks: A top-down survey', *Computer Networks*, vol. 67, pp. 104–122, 2014.
- [331] S. K. Gharghan, R. Nordin, and M. Ismail, 'A survey on energy efficient wireless sensor networks for bicycle performance monitoring application', *Journal of Sensors*, vol. 2014, 2014.
- [332] H. J. Zhou, C. X. Guo, and J. Qin, 'Efficient application of GPRS and CDMA networks in SCADA system', in *IEEE PES General Meeting*, 2010, pp. 1–6.
- [333] B. Mihajlov and M. Bogdanoski, 'Overview and analysis of the performances of ZigBee-based wireless sensor networks', *International Journal of Computer Applications*, vol. 29, no. 12, pp. 28–35, 2011.
- [334] J.-S. Lee, Y.-W. Su, and C.-C. Shen, 'A comparative study of wireless protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi', in *IECON 2007-33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2007, pp. 46–51.
- [335] K. Pothuganti and A. Chitneni, 'A comparative study of wireless protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi', *Advance in Electronic and Electric Engineering*, vol. 4, no. 6, pp. 655–662, 2014.
- [336] R. W. Coates, M. J. Delwiche, A. Broad, and M. Holler, 'Wireless sensor network with irrigation valve control', *Computers and electronics in agriculture*, vol. 96, pp. 13–22, 2013.
- [337] J. L. Chávez, F. J. Pierce, T. V. Elliott, R. G. Evans, Y. Kim, and W. M. Iversen, 'A remote irrigation monitoring and control system (RIMCS) for continuous move systems. Part B: Field testing and results', *Precision agriculture*, vol. 11, no. 1, pp. 11–26, 2010.
- [338] M. R. M. Kassim, I. Mat, and A. N. Harun, 'Wireless Sensor Network in precision agriculture application', in *2014 International Conference on Computer, Information and Telecommunication Systems (CITS)*, 2014, pp. 1–5.
- [339] C. B. Hedley and I. J. Yule, 'Soil water status mapping and two variable-rate irrigation scenarios', *Precision Agriculture*, vol. 10, no. 4, pp. 342–355, 2009.

- [340] S. Khriji, D. El Houssaini, M. W. Jmal, C. Viehweger, M. Abid, and O. Kanoun, 'Precision irrigation based on wireless sensor network', *IET Science, Measurement & Technology*, vol. 8, no. 3, pp. 98–106, 2014.
- [341] A. B. Jirapure, A. Pal, D. Majumder, G. Patil, S. Shrivastava, and B. E. Scholar, 'Automatic smart irrigation using wireless sensor network and raspberry Pi', *Int. J. Eng. Sci. Comput*, vol. 8, pp. 16762–16763, 2018.
- [342] Meeradevi, M. A. Supreetha, M. R. Mundada, and J. N. Pooja, 'Design of a Smart Water-Saving Irrigation System for Agriculture Based on a Wireless Sensor Network for Better Crop Yield', in *ICCCE 2018*, Singapore, 2019, pp. 93–104. doi: 10.1007/978-981-13-0212-1_11.
- [343] G. Vellidis, M. Tucker, C. Perry, C. Kvien, and C. Bednarz, 'A real-time wireless smart sensor array for scheduling irrigation', *Computers and electronics in agriculture*, vol. 61, no. 1, pp. 44–50, 2008.
- [344] S. M. Abd El-kader and B. M. M. El-Basioni, 'Precision farming solution in Egypt using the wireless sensor network technology', *Egyptian Informatics Journal*, vol. 14, no. 3, pp. 221–233, 2013.
- [345] D. Popescu, F. Stoican, G. Stamatescu, O. Chenaru, and L. Ichim, 'A survey of collaborative UAV–WSN systems for efficient monitoring', *Sensors*, vol. 19, no. 21, p. 4690, 2019.
- [346] H. Subir, G. Amrita, S. Sanjib, D. Avishek, and D. Sipra, 'A lifetime enhancing node deployment strategy in WSN', in *International Conference on Future Generation Information Technology*, 2009, pp. 295–307.
- [347] S. Mini, S. K. Udgata, and S. L. Sabat, 'Sensor deployment and scheduling for target coverage problem in wireless sensor networks', *IEEE sensors journal*, vol. 14, no. 3, pp. 636–644, 2013.
- [348] S. Meguerdichian, F. Koushanfar, M. Potkonjak, and M. B. Srivastava, 'Coverage problems in wireless ad-hoc sensor networks', in *Proceedings IEEE INFOCOM 2001. Conference on computer communications. Twentieth annual joint conference of the IEEE computer and communications society (Cat. No. 01CH37213)*, 2001, vol. 3, pp. 1380–1387.
- [349] L. De Souza, H. Vogt, and M. Beigl, 'A survey on fault tolerance in wireless sensor networks, Interner Bericht', *Fakultät für Informatik, Universität Karlsruhe: Karlsruhe, Germany*, 2007.
- [350] G. Hoblos, M. Staroswiecki, and A. Aitouche, 'Optimal design of fault tolerant sensor networks', in *Proceedings of the 2000. IEEE International Conference on Control Applications. Conference Proceedings (Cat. No. 00CH37162)*, 2000, pp. 467–472.
- [351] H. Alwan and A. Agarwal, 'A survey on fault tolerant routing techniques in wireless sensor networks', in *2009 Third International Conference on Sensor Technologies and Applications*, 2009, pp. 366–371.
- [352] I. Dietrich and F. Dressler, 'On the lifetime of wireless sensor networks', *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, vol. 5, no. 1, pp. 1–39, 2009.
- [353] D. M. Blough and P. Santi, 'Investigating upper bounds on network lifetime extension for cell-based energy conservation techniques in stationary ad hoc networks', in *Proceedings of the 8th annual international conference on Mobile computing and networking*, 2002, pp. 183–192.
- [354] K. Kalpakis, K. Dasgupta, and P. Namjoshi, 'Efficient algorithms for maximum lifetime data gathering and aggregation in wireless sensor networks', *Computer Networks*, vol. 42, no. 6, pp. 697–716, 2003.
- [355] H. D. Tarigh and M. Sabaei, 'A new clustering method to prolong the lifetime of WSN', in *2011 3rd International Conference on Computer Research and Development*, 2011, vol. 1, pp. 143–148.
- [356] C.-W. Tsai, T.-P. Hong, and G.-N. Shiu, 'Metaheuristics for the Lifetime of WSN: A Review', *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. 9, pp. 2812–2831, 2016.
- [357] 'Global Consulting | Roland Berger', Jul. 2019. <https://www.rolandberger.com/en/?country=FR>
- [358] G. Tuna, T. V. Mumcu, K. Gulez, V. C. Gungor, and H. Erturk, 'Unmanned aerial vehicle-aided wireless sensor network deployment system for post-disaster monitoring', in *International Conference on Intelligent Computing*, 2012, pp. 298–305.

- [359] S. Chouikhi, I. El Korbi, Y. Ghamri-Doudane, and L. A. Saidane, 'A survey on fault tolerance in small and large scale wireless sensor networks', *Computer Communications*, vol. 69, pp. 22–37, 2015.
- [360] V. Sadhu, X. Zhao, and D. Pompili, 'Energy-efficient analog sensing for large-scale, high-density persistent wireless monitoring', in *2017 13th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS)*, Jackson, WY, USA, 2017, pp. 61–68. doi: 10.1109/WONS.2017.7888773.
- [361] V. Sharma, R. B. Patel, H. S. Bhadauria, and D. Prasad, 'Deployment schemes in wireless sensor network to achieve blanket coverage in large-scale open area: A review', *Egyptian Informatics Journal*, vol. 17, no. 1, pp. 45–56, 2016.
- [362] V. Sadhu, X. Zhao, and D. Pompili, 'Energy-efficient Analog Sensing for Large-scale and High-density Persistent Wireless Monitoring', *IEEE Internet of Things Journal*, 2020.
- [363] Z. Xu, L. Chen, C. Chen, and X. Guan, 'Joint clustering and routing design for reliable and efficient data collection in large-scale wireless sensor networks', *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 3, no. 4, pp. 520–532, 2015.
- [364] 'TelosB_Datasheet.pdf'. Accessed: Jan. 03, 2021. [Online]. Available: http://edge.rit.edu/content/P08201/public/Computer/Wireless_Modules/TelosB_Datasheet.pdf
- [365] 'Crossbow MicaZ mote specifications', Jul. 2019. <http://www.xbow.com>
- [366] A. R. Jaladi, K. Khithani, P. Pawar, K. Malvi, and G. Sahoo, 'Environmental monitoring using wireless sensor networks (WSN) based on IOT', *Int. Res. J. Eng. Technol*, vol. 4, no. 1, pp. 1371–1378, 2017.
- [367] Q. Mamun, 'A qualitative comparison of different logical topologies for wireless sensor networks', *Sensors*, vol. 12, no. 11, pp. 14887–14913, 2012.
- [368] J. Balendonck, J. Hemming, B. A. J. Van Tuijl, L. Incrocci, A. Pardossi, and P. Marzaletti, 'Sensors and wireless sensor networks for irrigation management under deficit conditions (FLOW-AID)', 2008.
- [369] N. G. Shah, U. B. Desai, I. Das, S. N. Merchant, and S. S. Yadav, 'IN-FIELD WIRELESS SENSOR NETWORK(WSN) FOR ESTIMATING EVAPOTRANSPIRATION AND LEAF WETNESS', *International Agricultural Engineering Journal*, vol. 18, no. 3–4, pp. 43–51, 2009.
- [370] J. M. Gilbert and F. Balouchi, 'Comparison of energy harvesting systems for wireless sensor networks', *Int. J. Autom. Comput.*, vol. 5, no. 4, pp. 334–347, 2008, doi: 10.1007/s11633-008-0334-2.
- [371] F. I. Simjee and P. H. Chou, 'Efficient Charging of Supercapacitors for Extended Lifetime of Wireless Sensor Nodes', *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 23, no. 3, pp. 1526–1536, 2008, doi: 10.1109/TPEL.2008.921078.
- [372] F. K. Shaikh and S. Zeadally, 'Energy harvesting in wireless sensor networks: A comprehensive review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 55, pp. 1041–1054, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.11.010.
- [373] 'OECD.org - OECD'. <http://www.oecd.org/> (accessed Jan. 03, 2021).
- [374] D. G. Fernández-Pacheco, M. Ferrández-Villena, J. M. Molina-Martínez, and A. Ruiz-Canales, 'Performance indicators to assess the implementation of automation in water user associations: A case study in southeast Spain', *Agricultural Water Management*, vol. 151, pp. 87–92, 2015.
- [375] D. W. Pickton and S. Wright, 'What's swot in strategic analysis?', *Strategic change*, vol. 7, no. 2, pp. 101–109, 1998.
- [376] 'European Commission, official website', *European Commission - European Commission*. https://ec.europa.eu/info/index_en (accessed Mar. 05, 2021).
- [377] B. Phadermrod, R. M. Crowder, and G. B. Wills, 'Importance-performance analysis based SWOT analysis', *International Journal of Information Management*, vol. 44, pp. 194–203, 2019.

- [378] ‘Lancement des nouvelles stratégies de développement des secteurs de l’agriculture et des eaux et forêts.’ <http://www.agriculture.gov.ma/pages/actualites/sm-le-roi-preside-agadir-la-ceremonie-de-lancement-des-nouvelles-strategies-de-deve> (accessed Dec. 18, 2020).
- [379] ‘Génération Green: Nouvelle stratégie marocaine de développement agricole’, *Transfert de Technologie en Agriculture Maroc*, Feb. 15, 2020. <https://www.agrimaroc.net/2020/02/15/generation-green-nouvelle-strategie-marocaine-de-developpement-agricole/> (accessed Jan. 20, 2021).
- [380] The World Bank Group, ‘Climate Risk Profile: Morocco (2021)’, Feb. 2021.
- [381] ‘CLIMATE EXPERT: Morocco’. <https://www.climate-expert.org/en/home/business-adaptation/morocco/> (accessed Mar. 22, 2020).
- [382] ‘Direction Générale de la Météorologie’. <https://www.marocmeteo.ma/> (accessed Mar. 19, 2020).
- [383] D. Verner *et al.*, *Climate Variability, Drought, and Drought Management in Morocco’s Agricultural Sector*. World Bank, 2018.
- [384] R. K. Kodali, N. Rawat, and L. Boppana, ‘WSN sensors for precision agriculture’, in *2014 IEEE REGION 10 SYMPOSIUM*, 2014, pp. 651–656.
- [385] Institut national d’excellence en santé et en services sociaux (Québec), J. Renaud, V. Martin, and P. Dagenais, *Les normes de production des revues systématiques: guide méthodologique*. Montréal: Institut national d’excellence en santé et en services sociaux (INESSS), 2013.
- [386] V. Zaugg, V. Savoldelli, B. Sabatier, and P. Durieux, ‘Améliorer les pratiques et l’organisation des soins : méthodologie des revues systématiques’, *Sante Publique*, vol. Vol. 26, no. 5, pp. 655–667, Dec. 2014.
- [387] D. Gough, ‘Weight of evidence: a framework for the appraisal of the quality and relevance of evidence’, *Research papers in education*, vol. 22, no. 2, pp. 213–228, 2007.
- [388] D. Brooks and M. McNeely, ‘L’importance de rapports transparents des revues systématiques’, *Physiother Can*, vol. 65, no. 1, pp. 2–3, 2013, doi: 10.3138/ptc.65.1.GEF.
- [389] R. Tassinari, *Pratique de l’analyse fonctionnelle*. Dunod, 1997.
- [390] J.-L. Deladrière, F. Le Bihan, P. Mongin, and D. Rebaud, *Organisez vos idées avec le Mind Mapping-3e édition*. Dunod, 2014.

Annexes

Annexe A

Systematic literature review

Une revue systématique de la littérature (Systematic literature review (SLR)), ou revue systématique, est une approche méthodologique qui permet de repérer, d'évaluer et de synthétiser les preuves scientifiques afin de répondre à une question de recherche de façon systématique et explicite [385].

Une revue systématique consiste en une synthèse de la littérature scientifique en réponse à une question précise. Elle utilise des méthodes explicites de recherche, de sélection et d'analyse des données. Une revue systématique est donc une vraie méthode de recherche, et ne doit pas être confondue avec une revue générale dans laquelle la recherche bibliographique n'est en général pas exhaustive et qui représente plus l'opinion d'un expert ou d'un groupe d'experts [386].

Les revues systématiques résument les meilleures recherches disponibles sur une question précise en faisant la synthèse des résultats de plusieurs études. Elles ont gagné en importance pour guider les décisions en matière de soins autant que pour la communauté scientifique.

Selon la définition de la Collaboration de Cochrane [211], les revues systématiques font la synthèse de toutes les preuves empiriques afin de répondre à une question précise en matière de recherche. La méthodologie doit être explicite afin de réduire les biais. Le manuel Cochrane pour les revues systématiques d'interventions [211] présente les principales caractéristiques de toutes les méthodologies de revue systématique. Il indique qu'une revue systématique a :

- Un ensemble d'objectifs clairement énoncés avec des critères d'éligibilité prédéfinis pour les études,
- Une méthodologie explicite et reproductible,

- Une recherche systématique qui tente d'identifier toutes les études qui répondraient aux critères d'éligibilité,
- Une évaluation de la validité des conclusions des études incluses,
- Une présentation systématique, et une synthèse, des caractéristiques et des résultats des études incluses.

Les composantes importantes de toute revue systématique [223], [387] sont notamment :

- Des questions de recherche clairement formulées,
- Définition des critères d'inclusion et d'exclusion,
- Une articulation de la stratégie de recherche, y compris les sources d'information
- Un protocole pouvant être reproduit,
- Une recherche de littérature systématique et bien documentée,
- Une évaluation et un examen critique des articles pertinents,
- Une extraction des données pertinentes des études incluses,
- Une présentation et une synthèse systématiques des conclusions.

Annexe B

PRISMA

PRISMA [223] (un acronyme de Preferred Reporting Items of Systematic reviews and Meta-Analyses, soit points préférés pour les rapports de revues systématiques et de méta-analyses) est un ensemble minimal de points fondés sur des faits probants qui devraient être utilisés pour les rapports de revues systématiques et de méta-analyses ; il s'agit d'un document dynamique révisé au fur et à mesure que les faits probants changent [388]. Il est développé par Moher et al. en 2009 [223]. Le PRISMA est constitué d'une liste de contrôle de 27 points et d'un diagramme de flux en quatre phases, permettant de faciliter l'écriture tout autant que la lecture de la revue systématique.

- La liste contrôle permet aux auteurs de revues systématiques et de méta-analyses de documenter leur travail de manière transparente. Elle regroupe les composantes importantes de chaque section de la revue systématique, notamment le titre, le résumé, les méthodologies et les résultats pour simplifier la vérification des critères.
- Le diagramme de flux fournit de manière standardisée un aperçu graphique des résultats de la recherche effectuée dans le cadre d'une revue systématique. Il documente le nombre d'articles qui ont été identifiés, combien ont finalement été inclus dans la revue et toutes les étapes intermédiaires. Ce diagramme précise la façon dont l'information circule dans les diverses étapes de la revue systématique et confirme avec précision le nombre d'articles identifiés, triés, jugés admissibles et finalement retenus.

Dans cette thèse, nous n'avons utilisé que le diagramme de flux PRISMA pour modéliser la stratégie de recherche effectuée dans notre première contribution. Pour réaliser ce diagramme, nous avons suivi le modèle proposé par Moher et al. [223] (voir Figure B.1).

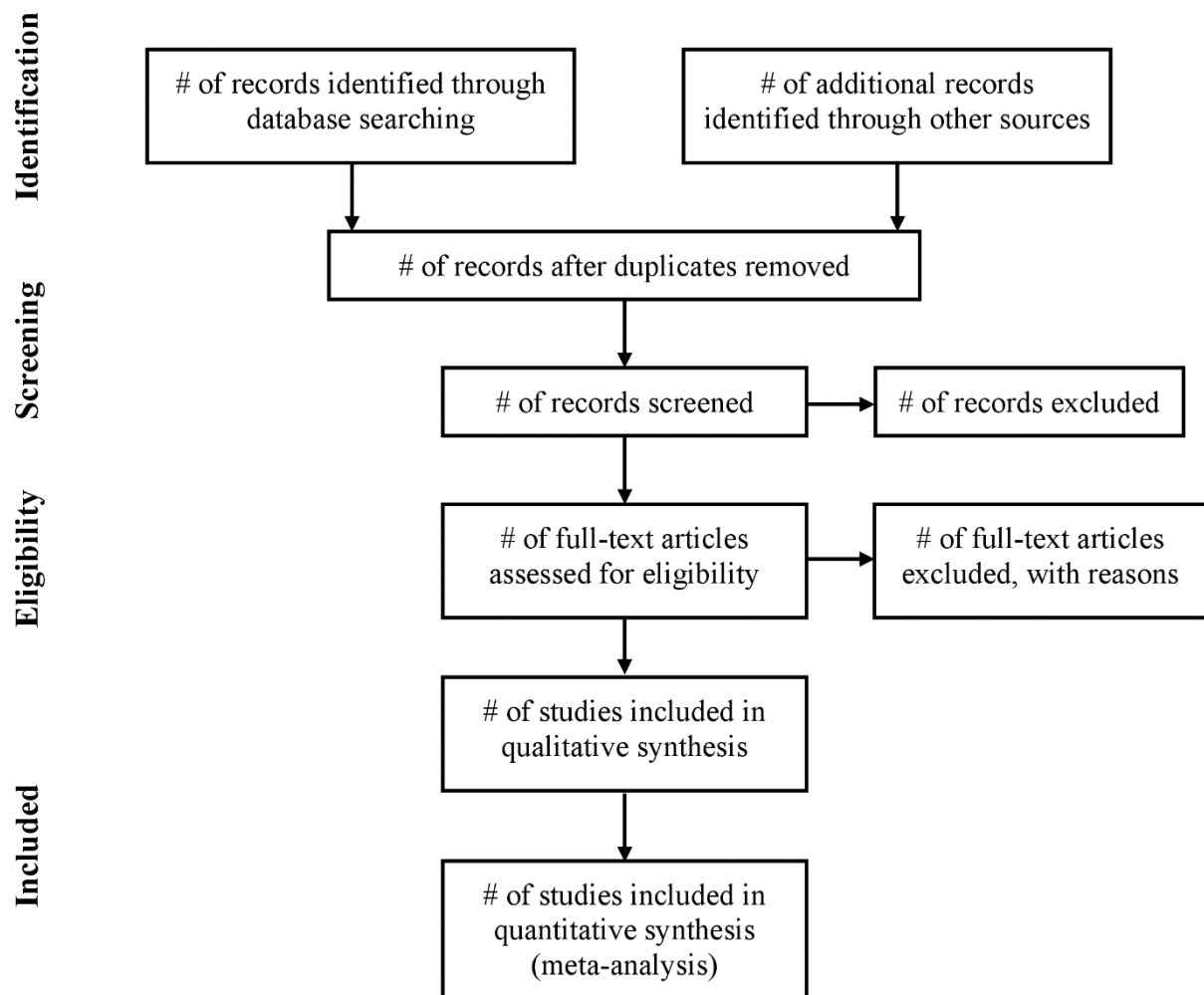


Figure B. 1 Flux d'informations à travers les différentes phases d'une revue systématique [223].

Annexe C

Questionnaire d'évaluation de la qualité

Le questionnaire d'évaluation de la qualité permet de produire un score de qualité de chacun des 110 articles sélectionnés qui sont restés après la troisième phase de l'étape « Examen des articles ». Ce questionnaire comprend huit questions d'évaluation de la qualité. Chaque question doit recevoir une réponse attentive. Dans le Tableau C.1, nous présentons le questionnaire d'évaluation de la qualité appliqué dans le SLR.

Tableau C. 1 Questionnaire d'évaluation de la qualité appliqué.

Article ID :	Source:
Article reference :	

N°.	Quality assessment	Response
QA 1.	Is the paper a research article or a review article ?	<input type="radio"/> Yes <input type="radio"/> No
QA 2.	Is the main purpose of the paper related to our field of study ?	<input type="radio"/> Yes <input type="radio"/> No
QA 3.	Does the paper answer research questions ?	<input type="radio"/> Yes <input type="radio"/> Partially <input type="radio"/> No
QA 4.	Does the paper contribute to the use of WSN in the field of irrigation ?	<input type="radio"/> Yes <input type="radio"/> No
QA 5.	Does the paper present a clear solution in the field of irrigation using WSN ?	<input type="radio"/> Yes <input type="radio"/> Partially <input type="radio"/> No
QA 6.	Does the paper provide clear and sufficient data to answer the research questions, particularly for QR3 to QR8 ?	<input type="radio"/> Yes <input type="radio"/> Partially <input type="radio"/> No
QA 7.	Has the article been published in a relevant journal or conference proceedings ?	<input type="radio"/> Very relevant <input type="radio"/> Relevant <input type="radio"/> Medium relevant

		<input type="radio"/> Not relevant
QA 8.	Has the article been cited by other articles ?	<input type="radio"/> Yes <input type="radio"/> Partially <input type="radio"/> No
Comments		

Annexe D

Procédure de notation du questionnaire d'évaluation de la qualité

Le Tableau D.1 présente la procédure de notation que nous avons proposée pour noter chacune des questions du questionnaire d'évaluation de la qualité.

Tableau D. 1 Procédure de notation du questionnaire d'évaluation de la qualité proposée.

N°.	Response	Score
QA 1.	<input type="radio"/> Yes	1
	<input type="radio"/> No	0
QA 2.	<input type="radio"/> Yes	1
	<input type="radio"/> No	0
QA 3.	<input type="radio"/> Yes	2
	<input type="radio"/> Partially	1
	<input type="radio"/> No	0
QA 4.	<input type="radio"/> Yes	1
	<input type="radio"/> No	0
QA 5.	<input type="radio"/> Yes	2
	<input type="radio"/> Partially	1
	<input type="radio"/> No	0
QA 6.	<input type="radio"/> Yes	2
	<input type="radio"/> Partially	1
	<input type="radio"/> No	0
QA 7.	<input type="radio"/> Very relevant <input type="radio"/> Relevant <input type="radio"/> Medium relevant <input type="radio"/> Not relevant	Voir l'annexe E
QA 8.	<input type="radio"/> Yes	2
	<input type="radio"/> Partially	1
	<input type="radio"/> No	0

Annexe E

Procédure de notation de la question 7 d'évaluation de la qualité

La réponse à la septième question d'évaluation de la qualité est notée en considérant l'ordre de pertinence fourni par les listes de Journal Citation Reports (JCR) et de Journal and Country Rank (SJR) et les listes de conférences indexées, comme indiqué dans le Tableau E.1.

Tableau E. 1 Procédure de notation proposée de la septième question d'évaluation de la qualité.

Sources	Response	Ranking	Score
Journal	<input type="radio"/> Very relevant	Q1	3
	<input type="radio"/> Relevant	Q2	2
	<input type="radio"/> Medium relevant	Q3 or Q4	1,75 (Q3)
			1,5 (Q4)
	<input type="radio"/> Not relevant	If article is not in a JCR or SJR ranking	0
Conference	<input checked="" type="radio"/> Relevant	Indexed conference	1
	<input type="radio"/> Not relevant	Conference not indexed	0

➤ Que sont les quartiles ?

Outre le facteur d'impact ou l'indice d'impact, les classements des revues (journaux) dans chaque catégorie de sujet sont divisés en quartiles par le JCR et le SJR. Ces quartiles classent les revues du plus haut au plus bas en fonction de leur facteur d'impact ou indice d'impact. Il existe quatre quartiles : Q1, Q2, Q3 et Q4. Selon [Publications impact indexes] :

- Q1 est occupée par les 25 % de revues les plus importantes de la liste.
- Q2 est occupé par les revues du groupe 25 à 50%.
- Q3 est occupé par les revues du groupe des 50 à 75%.
- Le Q4 est occupé par les revues du groupe 75 à 100%.

Les revues les plus prestigieuses dans un domaine donné sont celles qui occupent le premier quartile, Q1. L'importance des autres revues diminue au fur et à mesure que l'on descend dans les quartiles.

Annexe F

Extrait de l'évaluation de la qualité de certains articles

Le Tableau F.1 présente un extrait de l'évaluation de la qualité de certains articles sélectionnés à l'aide du questionnaire proposé lors de la phase d'éligibilité.

Tableau F. 1 Extrait de l'évaluation de la qualité de certains articles sélectionnés.

ID	References	Quality assessment								Quality score
		QA1	QA2	QA3	QA4	QA5	QA6	QA7	QA8	
S001	Gutiérrez, J., Villa-Medina, J.F., Nieto-Garibay, A., Ángel Porta-Gándara, M., 2014. Automated irrigation system using a wireless sensor network and GPRS module. IEEE transactions on instrumentation and measurement, 63(1), 166–176.	1	1	2	1	2	2	3	2	14
S002	Nagarajan, G., Minu, R.I., 2018. Wireless soil monitoring sensor for sprinkler irrigation automation system. Wireless Personal Communications, 98 (2), 1835-1851.	1	1	2	1	2	2	1,75	2	12,75
S003	Chikankar, P.B., Mehetre, D., Das, S., 2015. An automatic irrigation system using ZigBee in wireless sensor network. In: 2015 International Conference on Pervasive Computing (ICPC). IEEE, pp. 1-5.	1	1	2	1	2	2	1	2	12
S004	Savić, T., Radonjić, M., 2018. WSN architecture for smart irrigation system. In 2018 23rd International Scientific-Professional Conference on Information Technology (IT). IEEE, pp. 1-4.	1	1	1	1	1	2	1	2	10

Annexe G

Formulaire d'extraction de données

Dans le Tableau G.1, nous présentons le formulaire d'extraction de données que nous avons proposé pour collecter toutes les informations requises à partir de 80 articles pertinents.

Tableau G. 1 Formulaire d'extraction de données.

Data extracted	Description
1. Article identifier	Unique ID for each article
2. Source	Journal or conference
3. Full reference	Author, year, title, source
4. Type of article	Journal article or conference paper
5. Paper aim	What is the main purpose of the paper?
6. Objectives	What are the objectives of the study?
7. Tools / technologies	What are the tools and technologies used in the study?
8. Sensors and Devices used	Including specifications of the sensors and devices used
9. Monitored parameters in the study	
10. Communication technologies used	Including specifications of the technologies used and their comparison
11. Types of soils considered	
12. Types of crops considered	
13. Types of irrigation techniques considered	
14. Summary of the study	Including the main research questions and the answers
15. Findings and conclusions	What were the findings and conclusions?
16. Research hypothesis	Statement of hypotheses, if any

Annexe H

Analyse fonctionnelle

I- Définition

Analyse fonctionnelle [389] est une démarche qui consiste à rechercher et à caractériser les fonctions offertes par un produit pour satisfaire les besoins de son utilisateur.

Les besoins peuvent être de plusieurs natures et sont exprimés de façon objective ou subjective, individuelle ou collective.

Le mot produit est pris au sens large du terme. Cela peut être un logiciel, un système, un service, un matériel, un objet, ou autre.

II- Outils de l'analyse fonctionnelle

Les outils que nous avons utilisés pour répondre à la situation problème sont la bête à cornes, le diagramme pieuvre et la carte mentale.

i- Bête à cornes

Un diagramme bête à cornes est un outil pour l'analyse fonctionnelle du besoin. C'est un schéma qui démontre si le produit est utile pour l'utilisateur, s'il répond à ses besoins.

Ce diagramme s'articule autour de trois questions :

- À qui le produit rend-il service ?
- Sur quoi agit-il ?
- Dans quel but ?

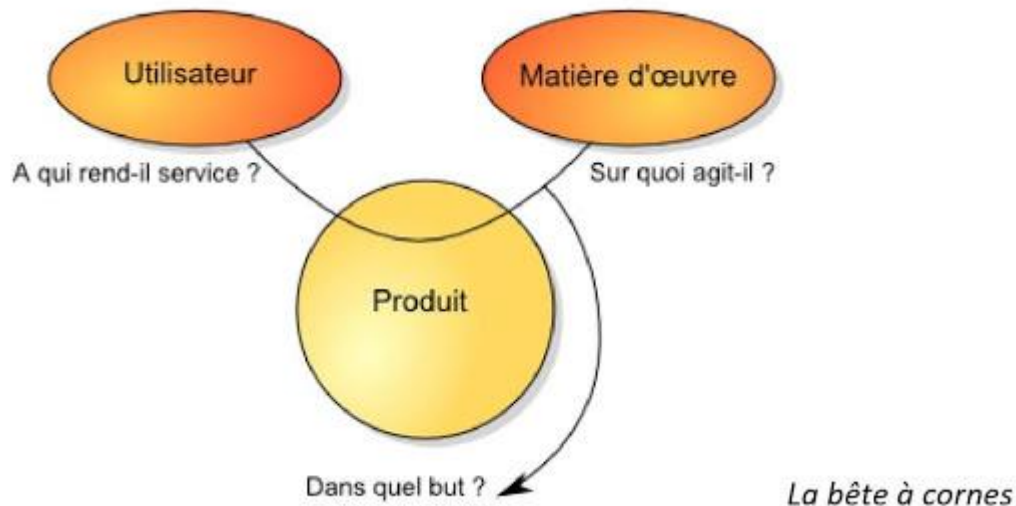


Figure G. 1 Structure du diagramme bête à cornes.

ii- Diagramme pieuvre

Un diagramme pieuvre ou diagramme des interactions est un schéma qui représente la relation entre le système (produit/service) et son environnement.

Le diagramme pieuvre est un outil de l'analyse fonctionnelle permet de représenter les fonctions de service d'un produit. C'est-à-dire qu'il permet de voir quelles sont les fonctions principales (FP) et contraintes (FC) d'un produit et comment ces fonctions réagissent avec le milieu extérieur. Ce diagramme est un excellent outil pour la représentation graphique de l'analyse fonctionnelle.

Dans ce diagramme pieuvre, le produit/service est au centre et les éléments du milieu extérieur sont autour. Des lignes relient les différents éléments en fonction de leurs rôles.

On distingue deux types de fonctions de service :

- Les fonctions principales, ce pour quoi le produit a été créé, qui expriment les relations entre deux ou plusieurs éléments par l'intermédiaire du produit. Elles expriment les services rendus par le produit pour répondre aux besoins de l'utilisateur.
- Les fonctions contraintes, ce sont les limites, qui expriment la relation entre le produit et un élément de son environnement. Elles traduisent les exigences d'adaptation du produit au milieu extérieur.

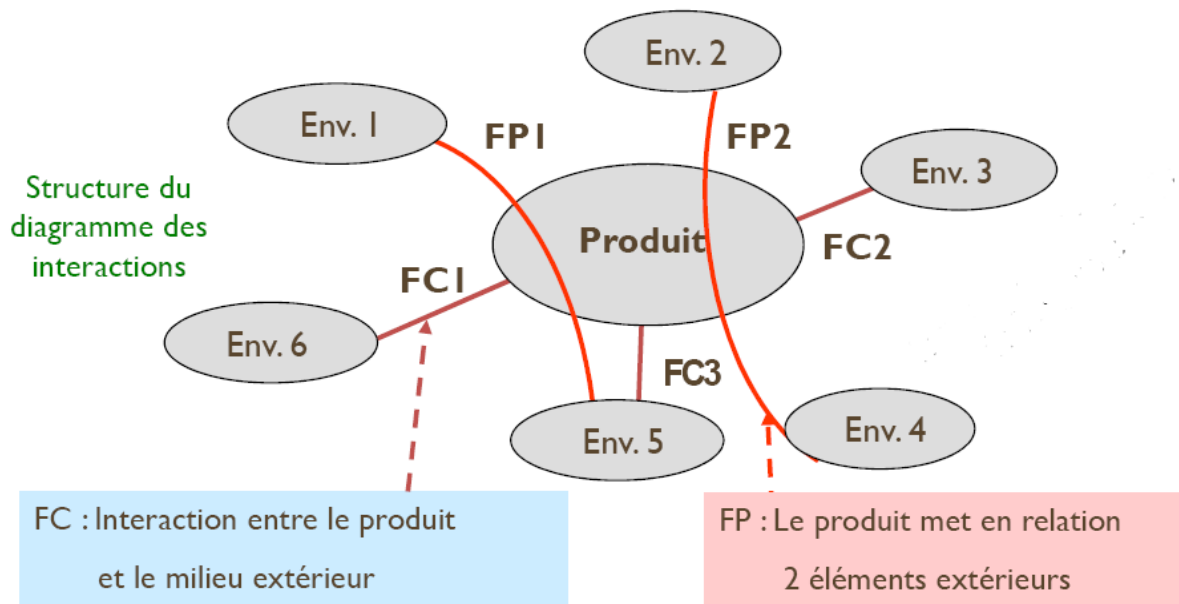


Figure G. 2 Structure du diagramme pieuvre.

iii- Carte mentale (mind map)

Une carte mentale, carte heuristique, carte cognitive, carte des idées, ou encore schéma heuristique [390], est un schéma, supposé refléter le fonctionnement de la pensée, qui permet de représenter visuellement et de suivre le cheminement associatif de la pensée. Cela permet de mettre en lumière les liens qui existent entre un concept ou une idée, et les informations qui leur sont associées.

Une carte mentale est un outil de l'analyse fonctionnelle qui permet d'exprimer les pensées en organisant des liens entre ses idées sous forme de branches. Elle permet de comprendre plus rapidement une situation.

Pour construire une carte mentale, il y a des règles à respecter :

- Etape 1 : Sujet d'étude est placé au centre.
- Etape 2 : Les idées les plus importantes sont le plus près du centre.
- Etape 3 : Les idées secondaires se propagent sur le pourtour.