

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

Université 20 Août 1955 Skikda

Faculté des Sciences

Département des Sciences Agronomiques

Filière : Sciences Agronomiques

Option : Aménagement Hydro-Agricole



Mémoire de fin d'étude :

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Sciences Agronomiques

Thème :

*Optimisation de la gestion de l'eau d'irrigation à l'aide de
l'Internet des Objets (IoT): application au périmètre irrigué de
Zit El Emba (Skikda, N-E Algérien).*

Présenté par :

- BOUBAISSA Houaida
- BOUZABIA Rayene
- KHENANEF Aya

Membres de Jury :

KHELFAOUI Hakim	(MCA)	Président	Université du 20 Août 1955 – Skikda
BOUCENNA Nawel	(MAA)	Examinatrice	Université du 20 Août 1955 – Skikda
KHELFAOUI Fayçal	(MCA)	Promoteur	Ecole Supérieure ENSET – Skikda

Année universitaire : 2024-2025



Remerciements

Nous rendons grâce à Dieu Tout-Puissant qui nous a accordé la force, la patience et la détermination nécessaires pour mener à bien ce travail. Sans Sa volonté et Son aide, rien n'aurait été possible.

Nous exprimons notre profonde reconnaissance à notre honorable encadrant **Dr. KHELFAOUI Fayçal**, pour son accompagnement bienveillant, ses orientations précieuses et ses conseils éclairés tout au long de l'élaboration de ce mémoire. Nous le remercions sincèrement pour sa patience, sa générosité, son écoute attentive et la confiance qu'il nous a toujours témoignée.

Nous exprimons notre profonde gratitude à l'ensemble des enseignants du Département des Sciences Agronomiques pour la qualité de leur encadrement et leur contribution précieuse à notre formation scientifique, ainsi qu'au personnel administratif pour leur soutien tout au long de notre parcours.

Nos remerciements les plus sincères vont au Dr. REHAB Abderrazak pour son aide précieuse et son accompagnement lors de la réalisation de la partie expérimentale et du prototype IoT.

Nos sincères remerciements vont également au personnel de l'ONID de Skikda (El Harrouch) et à celui du barrage de Zit El Emba (Bakkouche Lakhdar) pour leur disponibilité et leur aide précieuse dans la réalisation de ce travail.

Nous adressons nos plus vifs remerciements aux membres du jury Dr. KHELFAOUI Hakim et Mme BOUCENNA Nawel pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'évaluer ce mémoire. Leur présence représente pour nous une marque de considération et un encouragement précieux.

Enfin, nous remercions chaleureusement toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce modeste travail.

Boubaissa, Bouzabia et Khenanef

Dédicace

À mes chers parents,

Votre amour inépuisable, votre soutien sans relâche et vos conseils avisés ont illuminé mon chemin. Vous avez été mes premiers repères, mes soutiens indéfectibles, et les artisans silencieux de chaque étape franchie. Ce mémoire est l'écho de votre patience et de vos sacrifices.

À mes frères et sœurs, Siradj, Abdelmoumen, Rahma et Nour,

Merci pour votre affection, votre solidarité et votre présence rassurante. Vous avez été, chacun à votre manière, une source d'équilibre, de force et d'encouragement dans cette aventure.

À mes grands-parents,

Une pensée particulière à mon grand-père Hamlaoui, que Dieu ait son âme. Votre souvenir reste vivant dans mon cœur. Vos valeurs et votre sagesse continuent de me guider et d'inspirer mes choix.

À mes amies,

Merci pour votre amitié sincère, vos paroles réconfortantes et votre présence dans les moments de doute comme dans ceux de joie. Votre soutien a été un moteur précieux tout au long de ce parcours.

Ce mémoire vous est dédié à tous, avec tout l'amour, le respect et la gratitude que je vous porte.

Boubaissa Houaida

Dédicace

À mes parents bien-aimés,

Merci pour votre amour sans limite, votre patience infinie et votre accompagnement de chaque instant. Vous êtes le socle de mon parcours, les racines de ma force, et les premières lumières qui ont éclairé mon chemin. Ce mémoire est avant tout le fruit de votre dévouement silencieux.

À mon frère unique, Abdelraouf,

Ta présence, ton écoute et tes encouragements ont été d'un grand réconfort. Tu as su, par ta bienveillance et ton soutien discret, m'aider à garder le cap dans les moments les plus exigeants.

À mon époux, Youssef,

Ta patience, ta confiance et ton amour constant ont été mon ancrage. Grâce à toi, j'ai trouvé la sérénité nécessaire pour avancer, même quand les défis semblaient insurmontables. Tu as cru en moi, parfois plus que moi-même.

À mes amis,

Merci pour vos mots d'encouragement, votre fidélité et votre présence précieuse. Vous avez été des sources d'énergie, de motivation et de sourires dans les moments les plus chargés.

Ce mémoire vous est dédié, à vous qui avez été lumière, soutien et inspiration. Avec tout mon amour, mon respect et ma gratitude.

Bouzabia Rayane

Dédicace

À mes chers parents,

Votre amour inconditionnel, votre soutien constant et votre confiance silencieuse m'ont guidée tout au long de ce chemin. Vous êtes la base solide sur laquelle s'est construit mon parcours. Ce mémoire vous revient, comme un modeste témoignage de gratitude pour tout ce que vous avez donné sans jamais compter.

À mes frères,

Merci pour votre présence rassurante, vos encouragements et votre soutien dans les moments de doute. Votre affection discrète et vos gestes simples ont été pour moi un véritable moteur.

À mon fiancé,

Ta patience, ta bienveillance et ta foi en moi ont été d'un grand réconfort. Tu m'as portée dans les moments les plus difficiles, m'offrant ton écoute et ton amour sans faille. Grâce à toi, j'ai trouvé la force de persévérer et de croire en moi.

À mes amies,

Votre amitié sincère, votre écoute et votre énergie positive ont illuminé ce parcours. Merci d'avoir été là, dans les instants de doute comme dans les moments de joie.

Ce travail est dédié à vous tous, qui avez su, chacun à votre manière, me soutenir, m'inspirer et me motiver. Avec toute ma reconnaissance, mon affection et mon profond respect.

Khenanef Aya

Résumé

Face à la raréfaction croissante des ressources hydriques dans les régions à climat méditerranéen, accentuée par les effets du changement climatique et l'augmentation soutenue des besoins agricoles, la recherche d'une gestion efficiente et durable de l'eau d'irrigation s'impose aujourd'hui comme un enjeu stratégique majeur. Ce mémoire s'inscrit dans cette problématique en se concentrant sur le périmètre irrigué de Zit El Emba (Skikda), avec pour objectif principal d'évaluer l'apport des technologies de l'Internet des Objets (IoT) à l'optimisation de la gestion de l'irrigation.

L'étude s'appuie sur une analyse des caractéristiques hydro-climatiques du bassin versant de l'oued Kébir Ouest, un diagnostic du système d'irrigation existant, et la proposition d'un modèle d'implémentation de solutions IoT adaptées au contexte local. Les résultats montrent que l'IoT permet une gestion plus précise et réactive des apports hydriques, réduisant les pertes en eau tout en améliorant les rendements agricoles.

Pour assurer le succès de cette transition vers une irrigation connectée et durable, l'étude recommande notamment le renforcement des infrastructures numériques, la formation des agriculteurs, le soutien institutionnel et financier, ainsi que le suivi continu des performances. Ce travail vise ainsi à offrir un cadre opérationnel pour la modernisation de la gestion de l'irrigation dans les zones agricoles semi-arides, en valorisant le potentiel des technologies intelligentes.

Mots clés : *Irrigation, Internet des Objets, Zit El Emba, gestion de l'eau, agriculture de précision, durabilité, climat méditerranéen.*

Abstract

In the face of increasing water scarcity in Mediterranean climate regions, exacerbated by climate variability and the growing demands of the agricultural sector, the pursuit of efficient and sustainable irrigation water management has become a key strategic priority. This work addresses this challenge by focusing on the irrigated area of Zit El Emba (Skikda), with the main objective of evaluating the contribution of Internet of Things (IoT) technologies to irrigation management optimization.

The study is based on an analysis of the hydro-climatic characteristics of the Oued Kébir Ouest watershed, an assessment of the current irrigation system, and the proposal of an IoT-based implementation model tailored to local conditions. The results demonstrate that IoT enables more precise and responsive water management, reducing water losses while improving agricultural productivity.

To support this transition toward smart and sustainable irrigation, the study recommends strengthening digital infrastructure, training farmers, providing institutional and financial support, and ensuring continuous performance monitoring.

This work aims to provide an operational framework for modernizing irrigation management in semi-arid agricultural zones by harnessing the potential of smart technologies.

Keywords: *Irrigation, Internet of Things, Zit El Emba, water management, precision agriculture, sustainability, Mediterranean climate.*

الملخص

مع التناقص المستمر للموارد المائية بالمناطق ذات المناخ المتوسطي، والذي تفاقم بفعل التغيرات المناخية وتزايد الطلب الزراعي، أصبحت الحاجة إلى إدارة فعالة ومستدامة لمياه الري تمثل أولوية استراتيجية ملحة. يندرج هذا البحث ضمن هذا الإطار، حيث يركز على محيط السقي بزيت العنبة (سكيكدة)، بهدف رئيسي هو تقييم مساهمة تقنيات إنترنت الأشياء (IoT) في تحسين تسيير وإدارة مياه الري الزراعي.

تعتمد الدراسة على تحليل الخصائص الهيدرو-مناخية لحوض وادي الكبير الغربي، وتشخيص نظام الري الحالي، واقتراح نموذج تطبيقي لحلول ذكية تتماشى مع الخصوصيات المحلية. وقد أظهرت النتائج أن استخدام تقنيات إنترنت الأشياء يسمح بتحكم أكثر دقة ومرونة في توزيع المياه، مما يساهم في تقليص الهدر وتحسين الإنتاجية الزراعية.

ومن أجل إنجاح هذا التحول نحو ري ذكي ومستدام، توصي الدراسة بتعزيز البنى التحتية الرقمية، وتكوين الفلاحين، وتوفير الدعم المؤسسي والمالي، إضافة إلى تتبع الأداء بشكل مستمر.

ويطمح هذا العمل إلى تقديم إطار عملي لتحديث إدارة مياه الري في المناطق الزراعية شبه الجافة، عبر استغلال الإمكانيات التي تتيحها التقنيات الذكية.

الكلمات المفتاحية: الري، إنترنت الأشياء، زيت العنبة، إدارة المياه، الزراعة الدقيقة، الاستدامة، المناخ المتوسطي.

Liste des figures

Figure I.1. Irrigation par gravité (Irrigation de surface).....	2
Figure I.2. Irrigation par Aspersion.....	3
Figure I.2. Irrigation localisée (goutte à goutte).....	4
Figure I.4. Température moyenne mondiale 1880-2020.....	9
Figure I.5. Evolution des émissions mondiales de gaz à effet de serre.....	10
Figure II.1. Composants d'un système IOT.....	15
Figure II.2. Architecture de l'agriculture intelligente.	17
Figure II.3. Les Drones agricoles.....	18
Figure II.4. Utilisation des Agribots en agriculture intelligente.....	19
Figure II.5. Les tracteurs intelligents sans conducteur.....	19
Figure III.1. Localisation géographique de la zone d'étude.....	27
Figure III.2. Distribution des précipitations mensuelles dans la zone d'étude (96 /97-16/17)...	30
Figure III.3. Distribution des précipitations saisonnières dans la zone d'étude (96 /97-17/18)..	31
Figure III.4. Températures moyennes mensuelles dans la zone d'étude (96 /97-17/18).....	33
Figure III.5. Diagramme ombro-thermique dans la station de Skikda. (96 /97-17/18).....	34
Figure III.6. Carte du réseau hydrographique dans le bassin de l'oued Kébir Ouest.....	36
Figure III.7. Bassin versant, barrage et périmètre d'irrigation de Zit Emba.....	38
Figure III.8. Variation interannuelle de la réserve d'eau et des lâchers d'eau du barrage de Zit El Emba (2002 -2016).....	41

Figure III.9. Évolution interannuelle des volumes d'eau au profit du périmètre de Zit El Emba (2007 -2016).	44
Figure IV.1. Schéma de block de system étudiant.....	54
Figure IV.2. Schéma du Carte ESP32.....	55
Figure IV.3. Capteurs d'humidité du sol.....	56
Figure IV.4. Capteur de température DHT22 et capteur d'humidité de l'air.....	57
Figure IV.5. Relais.....	57
Figure IV.6. Vanne d'irrigation.....	58
Figure IV.7. Interface Graphique avec Remotexy réalisé.....	60
Figure IV.8. Interface Graphique avec Remotexy réalisé.....	62
Figure IV.9. Résultat cas (A) excès d'eau; [(a) prototype , (b) application Remotexy].....	62
Figure IV.10. Résultat cas (B) humidité moyenne ; [(a) prototype , (b) application remotexy].....	63
Figure IV.11. Résultat cas (C) manque d'eau; [(a) dans le prototype , (b) sur l'application remotexy].....	64

Liste des tableaux

Tableau III.1. Caractéristiques de la station utilisées dans l'étude.....	29
Tableau III.2. Précipitations moyennes mensuelles à la station de Skikda.(97/98-17/18).....	30
Tableau III.3. Précipitations moyennes saisonnières à la station de Skikda.(96/97-18/19).....	31
Tableau III.4. Températures moyennes mensuelles à la station de Skikda. 96 /97-18/19).....	32
Tableau III.5. Le système de cultures en irrigué dans le périmètre de Zit El Emba.....	39
Tableau III.6 : Caractéristiques hydrauliques du barrage Zit-Emba.....	42
Tableau IV.1. Caractéristiques climatiques dans la région d'étude.....	47
Tableau IV.2. Calcul des pluies efficaces pour chaque mois.....	47
Tableau IV.3. Cycle végétatif des cultures.....	51
Tableau IV.4. Volume des besoins en eau pour notre périmètre.....	53

Liste des abréviations

AEA : Alimentation en Eau d'Agriculture

AEI : Alimentation en Eau Industrielle

AEP : Alimentation en Eau Potable

ANBT : Agence Nationale des Barrages et des Transferts

ANT : Advanced and Adaptive Network Technology

DRE : Direction des Ressources en Eau

DSA : Direction des Services Agricoles

FAO : Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture

GIRE : Gestion intégrée des ressources en eau

GPS : Global Positioning System (Système de positionnement global)

GSM : Global System for Mobile (Système mondial de communication mobile)

Ha : Hectare

IA : Intelligence Artificielle

IoT : Internet des Objets

Irrig : Irrigation

LTE : Long Term Evolution (Évolution à long terme, technologie 4G)

LoRa : Long Range

NFC : Near Field Communication (Communication en champ proche)

ONID : Office National d'Irrigation et de Drainage

RFID : Radio Frequency Identification (Identification par radiofréquence)

UMTS : Universal Mobile Telecommunications System

WAN : Wide Area Network (Réseau étendu)

Wi-Fi : Wireless Fidelity (Fidélité sans fil)

Table des matières

Remerciement	
Dédicace	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Liste des abréviations	
Introduction générale	

Première Partie : Synthèse Bibliographique

Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes d'irrigation

Introduction	1
1. L'importance de l'irrigation en agriculture.....	1
1.1. Histoire de l'irrigation.....	1
1.2. Rôle de l'irrigation dans la sécurité alimentaire.....	1
2. Divers types de systèmes d'irrigation.....	1
2.1. Irrigation par gravité (Irrigation de surface).....	2
2.2. Irrigation par aspersion.....	2
2.3. Irrigation localisée (goutte à goutte).....	3
3. Facteurs influençant le choix des systèmes d'irrigation.....	4
3.1. Quantité d'eau disponible.....	4
3.2. Qualité de l'eau	4
3.3. Topographie du terrain.....	5
3.4. Coût et rendement des systèmes	5
3.4.1. Le Coût.....	5
3.4.2. Rendement des systèmes.....	6
4. Contraintes et défis des systèmes traditionnels d'irrigation.....	7

4.1. Pertes d'eau et inefficacité dans les systèmes d'irrigation traditionnels.....	7
4.1.1. Fuites dans les canaux	7
4.1.2. Évaporation de surface	7
4.2. Utilisation excessive de l'eau	7
4.2.1. Inefficacité dans la distribution de l'eau.....	8
4.2.2. Impact sur la qualité des sols et des cultures.....	8
4.3. Solutions possibles.....	8
5. L'irrigation et les changements climatiques	8
5.1. Impacts des changements climatiques sur l'irrigation.....	8
5.1.1. Variabilité des précipitations et sécheresses accrues.....	9
5.1.2. Hausse des températures et évaporation accrue.....	9
5.1.3. Modification des cycles hydrologiques.....	9
5.1.4. Salinisation des sols et des ressources en eau.....	10
5.2. Rôle de l'irrigation dans les changements climatiques.....	10
5.2.1. Émissions de gaz à effet de serre.....	10
5.2.2. Surexploitation des ressources en eau.....	11
5.2.3. Modification des microclimats	11
5.3. Stratégies d'adaptation et d'atténuation.....	11
5.3.1. Adoption de technologies d'irrigation efficaces.....	11
5.3.2. Gestion intégrée des ressources en eau	11
5.3.3. Pratiques agricoles résilientes.....	11
5.3.4. Renforcement des capacités et sensibilisation.....	11
Conclusion.....	12

Chapitre 2 : Notions sur l’Internet des Objets (IoT) et leurs applications en irrigation

Introduction.....	13
1. Fondements de l’Internet des Objets (IoT).....	13
2. Caractéristiques principales d’un système IoT	13
3. Architecture de l’agriculture intelligente.....	15
3.1. La couche de perception.....	15
3.2. La couche réseau.....	16
3.3. La couche application.....	16
4. Applications de l’agriculture intelligente.....	17
4.1. Les drones.....	17
4.2. Les agribots.....	18
4.3. Les tracteurs intelligents.....	19
5. Les processus clés de l’Internet des objets (IoT).....	20
5.1. Principaux processus.....	20
5.2. Traitement des données.....	20
5.3. Transmission des données.....	20
6. Composants fondamentaux d’un système IoT.....	21
6.1. Les capteurs.....	21
6.2. La connectivité.....	21
7. Enjeux et perspectives de l’Internet des Objets (IoT) en Algérie.....	22
7.1. Défis majeurs à l’adoption de l’IoT en Algérie.....	22
7.1.1. Infrastructures numériques limitées.....	22
7.1.2. Coûts élevés des équipements.....	22
7.1.3. Manque de formation et sensibilisation.....	22
7.2. Plateformes de gestion et d’analyse des données.....	22

7.2.1. Fonctionnalités clés.....	22
7.3. Bénéfices de l’IoT en irrigation agricole.....	23
7.3.1. Optimisation de l’utilisation de l’eau.....	23
7.3.2. Automatisation des processus agricoles.....	23
7.3.3. Surveillance environnementale et gain de temps.....	23
7.4. Contraintes techniques et économiques.....	23
7.4.1. Investissements lourds.....	23
7.4.2. Couverture réseau limitée.....	23
7.4.3. Maintenance et suivi technique.....	24
7.5. Expériences internationales en irrigation intelligente.....	24
7.6. Cas d’étude en Algérie et dans la Méditerranée.....	24
7.6.1. Algérie.....	24
7.6.2. Tunisie et Maroc.....	24
7.7. Perspectives de développement.....	24
Conclusion.....	25

Deuxième Partie : Partie pratique

Chapitre 3 : Analyse territoriale et fonctionnelle du périmètre irrigué de Zit El Emba

Introduction.....	26
1. Présentation de la région d’étude.....	26
1.1. Localisation géographique.....	26
1.2. Géomorphologie de la zone.....	27
2. Caractéristiques hydro-climatiques.....	28
2.1. Station de mesure.....	29
2.2. Les paramètres météorologiques déterminants.....	29
2.2.1. Les précipitations.....	29

a. Les précipitations mensuelles.....	29
b. Les précipitations saisonnières.....	31
2.2.2. Les températures.....	32
2.3. La relation entre les précipitations et la température : (Courbe de Gaussen).....	33
2.4. Caractéristiques du réseau hydrographique.....	35
3. Présentation du périmètre irrigué de Zit El Emba.....	36
3.1. Situation géographique et système de culture.....	36
3.2. Caractéristiques du périmètre irrigué de Zit El Emba.....	38
3.2.1. Superficie et cultures pratiquées.....	39
3.2.2. Phases d'aménagement du périmètre irrigué.....	40
a. Première phase d'aménagement (Zone sud).....	40
b. Deuxième phase d'aménagement (Zone nord).....	40
4. Ressources en eau dans la région d'étude.....	40
4.1. Alimentation en eau de surface : Barrage de Zit Emba.....	40
4.2. Caractéristiques principales du Barrage Zit El Emba.....	41
4.2.1. Fonctions et destination.....	41
4.2.2. Caractéristiques techniques.....	42
4.3. Les eaux souterraines.....	42
5. Évolution interannuelle des volumes d'eau au profit de l'irrigation du périmètre irrigué de Zit El Emba (2007 -2016).....	43
Conclusion.....	44

Chapitre 4 : Intégration de l' IoT pour l'optimisation de l'irrigation à Zit El Emba

Introduction.....	45
1. Analyse des données climatiques et leur apport à l'intégration de l' IoT dans la gestion de l'irrigation	45
1.1. Analyse climatique de la région.....	46

1.2. Détermination de la pluie efficace.....	47
a. Répartition saisonnière.....	48
b. Bilan hydrique et implications.....	48
1.3. Apports des données climatiques à la mise en œuvre de solutions IoT pour l’irrigation....	49
2. Cycle végétatif des cultures.....	50
3. Estimation des volumes d’eau d’irrigation.....	52
4. Système d'Irrigation Intelligent pour la Culture de Tomates.....	54
4.1. Objectifs du Système.....	54
4.1.1. Optimisation de l'irrigation.....	54
4.1.2. Automatisation.....	55
4.1.3. Surveillance et contrôle.....	55
4.2. Composants du Système.....	55
4.2.1. ESP32.....	55
4.2.2. Capteur d'humidité du sol.....	56
4.2.3. Capteur DHT22.....	56
4.2.4. Relais.....	57
4.2.5. Vanne d'irrigation.....	57
3. Fonctionnement de prototype réalisé.....	58
3.1. Installation des Composants.....	58
3.2. Mesure de l'Humidité.....	58
3.3. Prise de Décision.....	59
3.4. Activation de l'irrigation.....	59
4. Interface Graphique avec Remotexy.....	59
4.1. Élaboration de l'Interface.....	59
4.2. Fonctionnalités de l'Interface.....	60
5. Résultats du Système.....	60
5.1. Données Collectées.....	60

5.2. Efficacité de l'Irrigation.....	61
5.3 Comparaison avec les Méthodes Traditionnelles.....	61
6. Partie expérimentale : étude de cas.....	61
6.1. Cas d'excès d'eau.....	62
6.2. Cas d'humidité moyenne.....	63
6.3. Cas de manque d'eau.....	63
Conclusion des cas d'étude.....	64
7. Vers une généralisation du système IoT à l'échelle du périmètre de Zit El Emba : cas de la tomate industrielle.....	65
7.1. Choix de la tomate industrielle comme culture cible.....	65
7.2. Stratégie de déploiement progressif du système IoT.....	65
7.3. Aspects techniques et logistiques de la généralisation.....	66
7.4. Bénéfices attendus d'une généralisation.....	66
8. Suivi et amélioration continue de la performance hydrique : fondement d'une irrigation intelligente à Zit El Emba.....	67
Conclusion.....	68
Conclusion générale et recommandations	
Références bibliographiques.	

Introduction Générale

Introduction générale

La gestion de l'eau en agriculture, en particulier dans les régions arides et semi-arides, représente un défi majeur ayant un impact sur la sécurité alimentaire et le développement durable (Nini F., et al, 2020). Dans ce contexte, les systèmes d'irrigation jouent un rôle essentiel dans l'amélioration de la production agricole. Cependant, l'utilisation de méthodes traditionnelles entraîne souvent un gaspillage important de l'eau et des problèmes environnementaux tels que la salinisation des sols et l'exploitation non durable des ressources hydriques (Bouarfa S., et al, 2021). C'est dans cette optique que les technologies de l'Internet des Objets (IoT) émergent comme des solutions innovantes permettant d'optimiser l'efficacité de l'irrigation grâce à l'utilisation de capteurs intelligents et de réseaux de communication avancés, offrant ainsi une analyse des données en temps réel et une prise de décision plus précise (Bessaoud O., 2019). Cette étude vise à évaluer l'application des technologies IoT pour améliorer la gestion de l'eau d'irrigation dans le périmètre irrigué de Zit El Emba, situé dans la wilaya de Skikda, au nord-est de l'Algérie. L'objectif est d'analyser l'état actuel des systèmes d'irrigation dans cette région, d'évaluer le potentiel des nouvelles technologies pour réduire le gaspillage et améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau, et de proposer un modèle d'application qui pourrait servir de référence pour une adoption plus large de ces technologies. La méthodologie adoptée repose sur une étude approfondie, incluant une revue de la littérature scientifique, l'analyse des données climatiques et hydrologiques de la région, ainsi qu'une évaluation pratique de l'intégration des solutions IoT dans le système d'irrigation existant. Ce travail est structuré en quatre chapitres principaux : le premier traite des concepts généraux des systèmes d'irrigation, de leurs types et de leur importance dans la sécurité alimentaire ; le deuxième explore le concept de l'Internet des Objets, les technologies utilisées dans l'agriculture intelligente et leurs principales applications en irrigation ; le troisième chapitre est consacré à l'étude du périmètre irrigué de Zit El Emba, en abordant ses caractéristiques géographiques et climatiques, son infrastructure hydrique et les défis liés à la gestion de l'eau ; enfin, le quatrième chapitre propose une méthodologie pour l'implémentation des solutions IoT dans la région, en intégrant des capteurs intelligents, en analysant les données collectées et en suggérant des stratégies d'optimisation de l'irrigation afin de garantir une gestion durable des ressources en eau. Cette étude ambitionne d'apporter des solutions concrètes pour améliorer la gestion de l'eau d'irrigation en exploitant les technologies modernes, ouvrant ainsi la voie à un développement agricole plus durable en Algérie.

1^{ère} Partie :

Synthèse Bibliographique

Chapitre I :

Généralités sur les systèmes d'irrigation

Introduction

L'irrigation, un enjeu majeur pour l'agriculture moderne L'eau, ressource vitale pour toute forme de vie, joue un rôle primordial dans le développement des cultures. L'irrigation, qui consiste à apporter de l'eau aux plantes de manière artificielle, est devenue une pratique indispensable dans de nombreuses régions du monde. Ce document a pour objectif d'explorer l'importance de l'irrigation dans l'agriculture moderne, ainsi que les différents systèmes d'irrigation existants.

1. L'importance de l'irrigation en agriculture

L'irrigation est le processus d'apport d'eau au sol pour favoriser la croissance des plantes. Elle joue un rôle vital en agriculture.

Voici pourquoi l'irrigation est importante :

1.1. Histoire de l'irrigation

L'irrigation remonte à des milliers d'années. Les anciennes civilisations utilisaient des systèmes d'irrigation rudimentaires pour cultiver leurs terres. Les systèmes d'irrigation ont évolué au fil des siècles, passant de systèmes simples basés sur la gravité à des systèmes complexes utilisant les technologies modernes.

1.2. Rôle de l'irrigation dans la sécurité alimentaire

L'irrigation contribue grandement à assurer la sécurité alimentaire mondiale. Dans les régions sèches et semi-arides, l'irrigation est le principal moyen de cultiver et de produire des aliments.

L'irrigation permet également d'augmenter la productivité agricole et d'améliorer la qualité des cultures, contribuant ainsi à répondre aux besoins alimentaires croissants de la population. (Boulahia A., 2016).

2. Divers types de systèmes d'irrigation

Il existe de nombreux systèmes d'irrigation, chacun ayant ses avantages, ses inconvénients et ses utilisations spécifiques.

Voici les principaux types :

2.1. Irrigation par gravité (Irrigation de surface)

L'irrigation de surface : L'irrigation de surface est l'une des méthodes les plus anciennes d'irrigation. Elle consiste à répartir l'eau directement à la surface du sol, où elle s'écoule librement sous l'effet de la gravité afin d'humidifier la parcelle et de s'infiltrer progressivement dans le sol. Cette technique peut se décliner sous différentes formes, en fonction de plusieurs facteurs tels que la pente du terrain, la perméabilité du sol et le type de culture en place. (Kouadria M., 2021).



Figure I.1. Irrigation par gravité (Irrigation de surface).

<https://irrigazette.com/fr/articles/les-techniques-dirrigation-agricole>
<https://wikifarmer.com/library/fr/article/types-de-systemes-dirrigation-que-choisir-en-fonction-de-ses-besoins>

2.2. Irrigation par aspersion

L'irrigation par aspersion est une technique d'irrigation qui consiste à projeter de l'eau dans l'air afin qu'elle retombe sur le sol sous forme de fines gouttelettes, simulant ainsi une pluie artificielle. Ce système repose sur un réseau de conduites fonctionnant sous pression, équipé d'asperseurs ou de buses, dont le rôle est de diffuser l'eau de manière homogène à la surface du sol. Cette méthode permet un arrosage contrôlé et adapté à divers types de cultures et de terrains. (Kouadria M., 2022).



Figure I.2. Irrigation par Aspersion.

(https://wiki.tripleperformance.fr/wiki/Irrigation_en_maraîchage)

(<https://ramcorpwire.com/fr/wire-cable-information/what-is-sprinkler-irrigation-cable/>)

2.3. Irrigation localisée (goutte à goutte)

L'irrigation localisée, notamment par goutte à goutte, est une technique d'arrosage qui consiste à apporter de petites quantités d'eau aux cultures, mais de manière fréquente. L'eau est distribuée soit en surface, soit directement dans la zone des racines, notamment dans le cas de l'irrigation souterraine. (Boulahia A., 2016).

Ce système repose sur le principe d'un apport optimal d'eau, précisément là où les plantes en ont le plus besoin : dans leur zone racinaire. Il permet également de concilier l'arrosage avec les opérations de maintenance et de récolte, sans perturber le cycle de production. Les dispositifs d'irrigation localisée sont conçus pour fonctionner quotidiennement, presque en continu sur 24 heures, en n'humidifiant que le volume de sol exploité par les racines. (Aichouche S., & Amroune L., 2020).



Figure I.2. Irrigation localisée (goutte à goutte).

<https://depositphotos.com/fr/photos/irrigation-goutte-à-goutte.html?qview=578960640>

3. Facteurs influençant le choix des systèmes d'irrigation

Le choix du système d'irrigation optimal repose sur une analyse approfondie de plusieurs facteurs clés, chacun jouant un rôle déterminant dans l'efficacité et la durabilité de la méthode retenue. Parmi ces facteurs, on retrouve :

3.1. Quantité d'eau disponible

Si l'eau est abondante, un système d'irrigation de surface, comme les canaux ou les bassins, peut être suffisant pour répondre aux besoins des cultures. En revanche, dans des régions où l'eau est rare, des systèmes plus économes, comme l'irrigation goutte-à-goutte ou l'aspersion basse pression, sont préférés, car ils permettent une gestion plus précise et une meilleure conservation de l'eau.

3.2. Qualité de l'eau

La présence de sels ou d'autres impuretés dans l'eau peut aussi affecter le choix du système. Par exemple, l'irrigation goutte-à-goutte peut-être plus efficace dans des zones où l'eau est de qualité variable, car elle minimise le risque de salinisation du sol en réduisant l'évaporation.

3.3. Topographie du terrain

- *Terrain plat* : Dans des zones où le terrain est uniforme et plat, des systèmes comme l'irrigation de surface (flooding ou furrows) sont souvent utilisés, car l'eau peut facilement se répandre et se distribuer de manière naturelle. Ces systèmes sont simples et peu coûteux, mais moins efficaces en termes d'économie d'eau.

- *Terrain vallonné ou en pente*

Pour des terrains inclinés, des systèmes tels que l'irrigation par aspersion ou goutte-à-goutte sont plus adaptés. L'irrigation par aspersion peut couvrir de grandes surfaces, tandis que le goutte-à-goutte permet une distribution précise et localisée de l'eau, limitant ainsi l'érosion et le gaspillage d'eau. Ces systèmes sont particulièrement efficaces pour les terrains difficiles à niveler ou lorsque l'on souhaite éviter la perte d'eau par ruissellement.

- *Hétérogénéité du terrain*

Sur des terrains irréguliers, des systèmes plus complexes comme l'irrigation par micro-aspersion ou goutte-à-goutte permettent d'adapter l'irrigation aux besoins spécifiques de chaque zone du champ.

En résumé, dans les zones avec une forte disponibilité en eau, des systèmes plus

3.4. Coût et rendement des systèmes

Le coût et le rendement des systèmes d'irrigation jouent un rôle clé dans le choix de la méthode la plus appropriée. Voici comment ces deux facteurs influencent cette décision :

3.4.1. Le Coût

- *Coût d'installation*

Les systèmes d'irrigation varient selon leur coût initial. Par exemple, l'irrigation de surface (inondation, rigoles) présente un coût d'installation relativement bas, car elle nécessite peu d'équipement. En revanche, des systèmes plus complexes comme l'irrigation goutte-à-goutte ou l'irrigation par aspersion nécessitent un investissement plus élevé en raison des équipements supplémentaires (tuyaux, pompes, filtres, etc.).

- ***Coût d'entretien***

Les systèmes sophistiqués, comme l'irrigation goutte-à-goutte ou l'aspersion, peuvent entraîner des frais d'entretien plus élevés, nécessitant des réparations, des remplacements de pièces et un entretien technique. À l'inverse, les systèmes simples comme l'irrigation de surface requièrent peu de maintenance, mais ils peuvent être moins efficaces sur le long terme.

- ***Coût de l'eau***

Le prix de l'eau peut également influencer le choix du système. Dans les régions où l'eau est coûteuse ou difficile d'accès, il est préférable d'opter pour des systèmes plus efficaces, tels que le goutte-à-goutte ou l'aspersion basse pression, qui permettent de réduire le gaspillage et de mieux gérer la consommation d'eau.

3.4.2. Rendement des systèmes

- ***Efficacité en termes de consommation d'eau***

Les systèmes tels que l'irrigation goutte-à-goutte sont particulièrement efficaces pour économiser de l'eau, en l'appliquant directement aux racines des plantes et en réduisant l'évaporation et le ruissellement. Cela permet d'optimiser l'utilisation de l'eau, surtout dans les zones arides, et favorise de meilleurs rendements.

- ***Rendement en termes de productivité***

Un bon système d'irrigation peut accroître la productivité des cultures en assurant une distribution régulière de l'eau. Les systèmes comme l'irrigation par aspersion ou goutte-à-goutte permettent de mieux gérer l'humidité du sol, contribuant ainsi à un meilleur rendement, notamment pour les cultures sensibles à l'irrigation.

- ***Rendement à long terme***

Même si des systèmes comme l'irrigation goutte-à-goutte requièrent un investissement initial plus élevé, ils peuvent offrir un rendement supérieur sur le long terme en réduisant la consommation d'eau, les coûts énergétiques et en améliorant la gestion des ressources. Cela peut se traduire par des économies globales, même si l'investissement de départ est plus conséquent.

4. Contraintes et défis des systèmes traditionnels d'irrigation

Les systèmes d'irrigation traditionnels, bien que largement utilisés et souvent économiques à mettre en place, présentent plusieurs limites et défis majeurs. Ces méthodes, telles que l'irrigation par gravité ou par canaux ouverts, souffrent de problèmes récurrents comme une gestion inefficace de l'eau, des pertes importantes dues à l'évaporation et à l'infiltration, et une difficulté à s'adapter aux besoins précis des cultures. Par ailleurs, ces systèmes peuvent accentuer l'érosion des sols, perturber les écosystèmes locaux et se révéler inadaptés face aux variations climatiques croissantes. Ces contraintes soulignent la nécessité de repenser les pratiques d'irrigation pour une agriculture plus durable et résiliente. (Bessaoud O., 2019).

4.1. Pertes d'eau et inefficacité dans les systèmes d'irrigation traditionnels

Les pertes d'eau et l'inefficacité représentent des inconvénients majeurs des systèmes d'irrigation traditionnels, avec des impacts négatifs sur la productivité agricole et la gestion des ressources en eau. Voici un résumé des principaux points :

Pertes d'eau dues aux fuites et à l'évaporation :

4.1.1. Fuites dans les canaux

Les canaux d'irrigation traditionnels, souvent non étanches ou construits en terre, entraînent des fuites importantes d'eau dans le sol environnant.

4.1.2. Évaporation de surface

Les canaux à ciel ouvert exposent l'eau à des températures élevées, augmentant ainsi les taux d'évaporation, en particulier dans les régions arides et chaudes.

4.2. Utilisation excessive de l'eau

L'absence de systèmes de contrôle conduit à une utilisation excessive de l'eau, dépassant souvent les besoins réels des cultures, ce qui entraîne un gaspillage important.

Une irrigation non régulée peut provoquer des inondations des terres agricoles, affectant négativement la qualité des sols.

4.2.1. Inefficacité dans la distribution de l'eau

Dans les systèmes traditionnels, l'eau n'est pas distribuée de manière uniforme entre les champs, ce qui crée un déséquilibre dans l'irrigation.

Les champs situés à proximité de la source d'eau reçoivent des quantités excessives, tandis que ceux situés plus loin souffrent d'un manque d'approvisionnement.

4.2.2. Impact sur la qualité des sols et des cultures

La perte continue d'eau réduit l'humidité du sol, essentielle pour la croissance des cultures.

Les sols exposés à la sécheresse ou à un excès d'eau deviennent moins fertiles avec le temps, ce qui affecte la productivité agricole.

4.3. Solutions possibles

Pour répondre aux défis des systèmes d'irrigation traditionnels, plusieurs solutions peuvent être mises en œuvre :

- Revêtir les canaux traditionnels pour limiter les pertes d'eau dues aux fuites.

Adopter des systèmes d'irrigation modernes (comme l'irrigation goutte-à-goutte) pour - réduire l'évaporation et améliorer l'efficacité de la distribution.

- Former les agriculteurs aux techniques de gestion de l'eau afin d'optimiser l'utilisation des ressources disponibles.

5. L'irrigation et les changements climatiques

Les changements climatiques représentent l'un des défis majeurs de notre 21^{ème} siècle, affectant gravement les ressources en eau et les systèmes agricoles à travers le monde. L'irrigation, en tant que pratique essentielle pour soutenir la production alimentaire, est directement impactée par ces bouleversements climatiques. (Bessaoud O., 2019).

5.1. Impacts des changements climatiques sur l'irrigation

Les changements climatiques perturbent la disponibilité de l'eau en modifiant les régimes pluviométriques et en augmentant l'évaporation, réduisant ainsi l'efficacité des systèmes d'irrigation. Ces bouleversements accentuent les pénuries d'eau et menacent la productivité agricole, en particulier dans les régions arides et semi-arides.

5.1.1. Variabilité des précipitations et sécheresses accrues

Les changements climatiques perturbent les régimes pluviométriques, entraînant une augmentation de la fréquence et de l'intensité des sécheresses dans de nombreuses régions. Cette réduction des précipitations affecte directement la disponibilité de l'eau pour l'irrigation, en particulier dans les zones arides et semi-arides. Les agriculteurs dépendant des eaux de surface ou des nappes phréatiques sont confrontés à des pénuries d'eau croissantes, menaçant leur capacité à maintenir leurs cultures.

5.1.2. Hausse des températures et évaporation accrue

Le réchauffement climatique entraîne une augmentation des températures moyennes, ce qui accélère l'évaporation de l'eau des sols et des réservoirs. Cette évaporation accrue réduit l'efficacité des systèmes d'irrigation traditionnels, augmentant les besoins en eau des cultures. Par exemple, dans les régions où l'irrigation par canaux ouverts est pratiquée, les pertes d'eau dues à l'évaporation peuvent atteindre des niveaux critiques, exacerbant la pression sur les ressources hydriques.

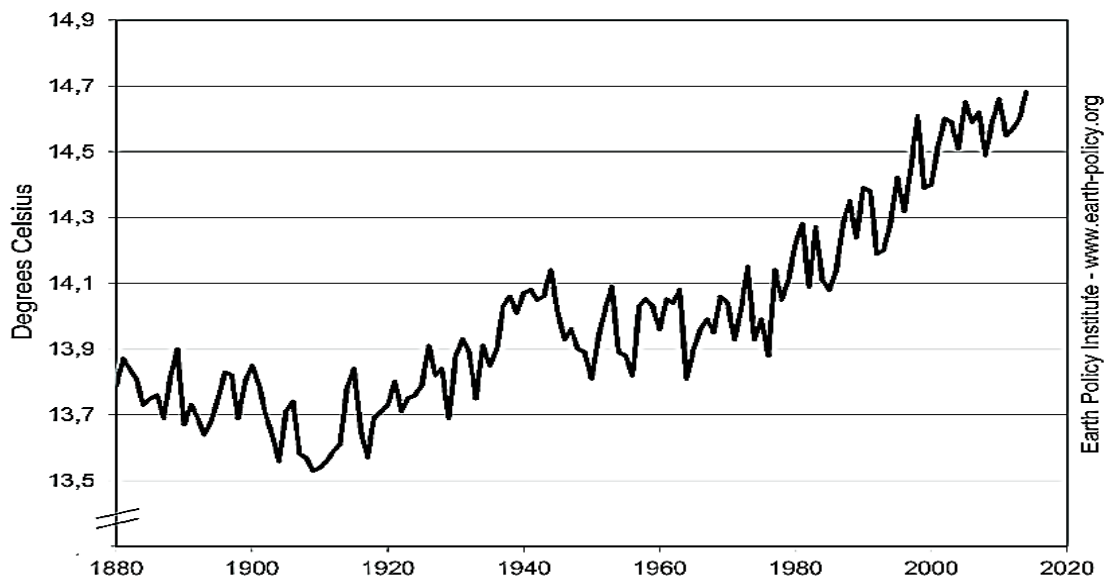


Figure I.4. Température moyenne mondiale 1880-2020. (Earth Policy Institute, 2015)

www.earth-policy.org

5.1.3. Modification des cycles hydrologiques

Les changements climatiques perturbent les cycles hydrologiques, affectant le débit des rivières, la recharge des nappes phréatiques et la disponibilité de l'eau en général. Dans certaines régions, la fonte accélérée des glaciers réduit les réserves d'eau douce à long terme,

tandis que dans d'autres, l'intensification des précipitations entraîne des inondations qui rendent l'eau difficile à capter et à stocker pour l'irrigation.

5.1.4. Salinisation des sols et des ressources en eau

L'élévation du niveau de la mer, causée par le réchauffement climatique, entraîne une intrusion d'eau salée dans les aquifères côtiers, rendant l'eau impropre à l'irrigation. De plus, dans les régions arides, l'évaporation accrue due à la hausse des températures peut concentrer les sels dans les sols et les eaux d'irrigation, réduisant la fertilité des terres et la productivité agricole.

5.2. Rôle de l'irrigation dans les changements climatiques

5.2.1. Émissions de gaz à effet de serre

Les systèmes d'irrigation, en particulier ceux qui reposent sur des pompes alimentées par des énergies fossiles, contribuent aux émissions de gaz à effet de serre. Par exemple, en Inde et en Chine, l'utilisation massive de pompes à diesel pour l'irrigation est une source importante d'émissions de CO₂. De plus, certaines pratiques d'irrigation, comme l'inondation des rizières, favorisent la production de méthane, un gaz à effet de serre puissant.

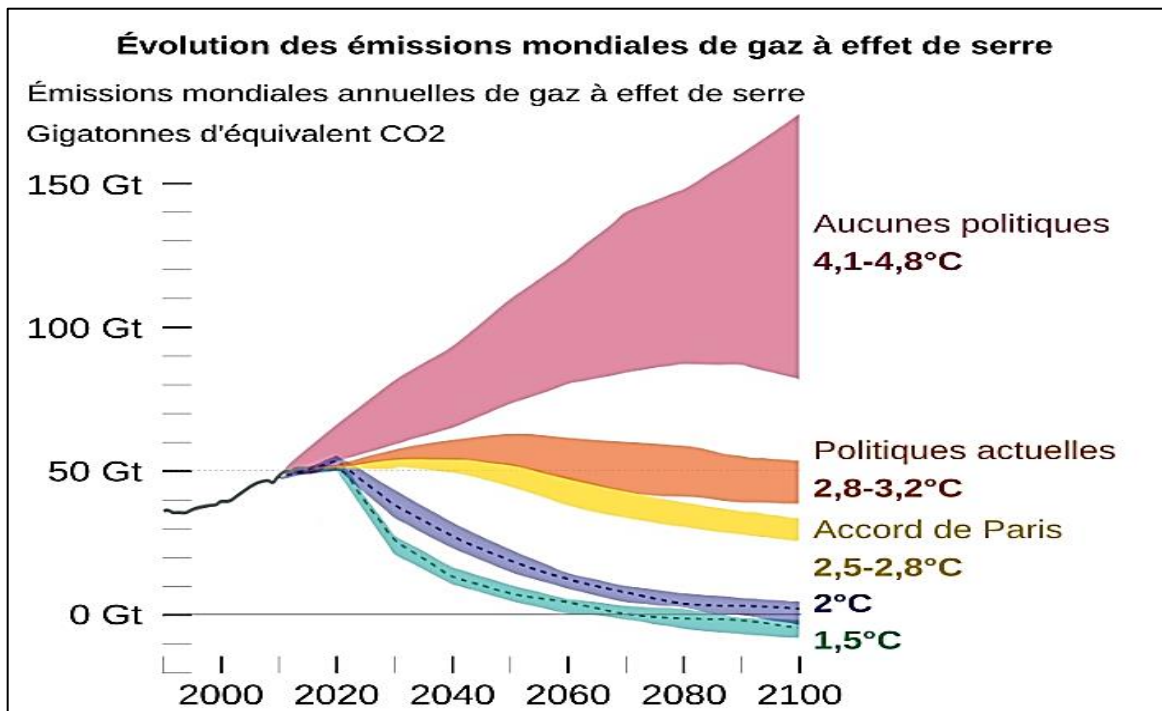


Figure I.5. Evolution des émissions mondiales de gaz à effet de serre.

(https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Greenhouse_gas_emission_scenarios_01-cs.svg)

5.2.2. Surexploitation des ressources en eau

L'irrigation intensive peut entraîner une surexploitation des nappes phréatiques et des cours d'eau, réduisant la disponibilité de l'eau pour les écosystèmes naturels et les générations futures. Cette surexploitation aggrave les stress hydriques déjà exacerbés par les changements climatiques, créant un cercle vicieux de dégradation environnementale.

5.2.1. Modification des microclimats

L'irrigation à grande échelle peut modifier les microclimats locaux en augmentant l'humidité de l'air et en réduisant les températures locales. Bien que ces effets puissent être bénéfiques pour les cultures, ils peuvent également perturber les écosystèmes locaux et influencer les régimes climatiques régionaux.

5.3. Stratégies d'adaptation et d'atténuation

5.3.1. Adoption de technologies d'irrigation efficaces

Pour faire face aux défis posés par les changements climatiques, il est essentiel d'adopter des systèmes d'irrigation plus efficaces, tels que le goutte-à-goutte ou l'aspersion. Ces technologies réduisent les pertes d'eau par évaporation et infiltration, tout en optimisant l'utilisation des ressources disponibles. Par exemple, en Israël, l'adoption massive de l'irrigation goutte-à-goutte a permis de réduire la consommation d'eau tout en augmentant les rendements agricoles. (Bhourri Khila, et al.,2015).

5.3.2. Gestion intégrée des ressources en eau

Une gestion durable de l'eau, prenant en compte les besoins de l'agriculture, des écosystèmes et des populations, est cruciale pour s'adapter aux changements climatiques. Cela inclut la recharge artificielle des nappes phréatiques, la réutilisation des eaux usées traitées et la mise en place de politiques de gestion concertée des bassins versants.

5.3.3. Pratiques agricoles résilientes

Les agriculteurs peuvent adopter des pratiques résilientes face aux changements climatiques, telles que la diversification des cultures, l'agroforesterie et l'utilisation de variétés résistantes à la sécheresse (Bhourri Khila, et al.,2015). Ces pratiques améliorent la capacité des systèmes agricoles à s'adapter aux variations climatiques tout en réduisant leur dépendance à l'irrigation.

5.3.4. Renforcement des capacités et sensibilisation

La formation des agriculteurs aux techniques d'irrigation durable et à la gestion adaptative de l'eau est essentielle pour renforcer leur résilience face aux changements climatiques. Les

programmes de sensibilisation peuvent également encourager l'adoption de pratiques respectueuses de l'environnement et promouvoir une utilisation plus équitable des ressources en eau.

Conclusion

Les changements climatiques posent des défis majeurs pour l'irrigation, menaçant la disponibilité de l'eau et la productivité agricole. Cependant, l'irrigation peut également contribuer à atténuer ces changements si elle est gérée de manière durable et efficace. En adoptant des technologies innovantes, en renforçant les pratiques agricoles résilientes et en promouvant une gestion intégrée des ressources en eau, il est possible de s'adapter aux impacts des changements climatiques tout en réduisant l'empreinte environnementale de l'irrigation. Une approche proactive et collaborative est essentielle pour assurer la sécurité alimentaire et hydrique dans un contexte climatique en évolution rapide.

Chapitre II :

Notions sur l'Internet des Objets (IoT) et leurs applications en irrigation

Introduction

L'Internet des Objets (IoT) est une innovation technologique majeure qui transforme la gestion de l'irrigation en agriculture. Ce chapitre explore les concepts fondamentaux de l'IoT, son architecture et ses principaux composants. Il met en évidence les technologies IoT spécifiques à l'irrigation, telles que les capteurs intelligents (mesurant l'humidité du sol, la température et le débit d'eau), les réseaux de communication adaptés (LoRa, NB-IoT, ZigBee) et les plateformes de gestion et d'analyse des données.

1. Fondements de l'Internet des Objets (IoT)

L'Internet des objets (IoT) représente une révolution technologique qui transforme profondément l'informatique et les communications. Son développement repose sur des innovations techniques dans plusieurs domaines clés. L'IoT désigne un réseau d'objets physiques interconnectés, allant au-delà d'un simple réseau d'ordinateurs pour inclure une large gamme d'appareils, tels que des voitures intelligentes, des téléphones, des appareils électroménagers, des jouets, des caméras, des instruments médicaux, ainsi que des objets industriels, des animaux, des personnes et des bâtiments. L'objectif de l'IoT est d'assurer une connexion continue entre ces objets, à tout moment, en tout lieu, à travers n'importe quel réseau et service, en suivant des protocoles standardisés pour garantir une communication fluide et une gestion intelligente des données. (Tahraoui Z., 2022).

2. Caractéristiques principales d'un système IoT

Les systèmes IoT se distinguent par un ensemble de caractéristiques techniques et fonctionnelles qui assurent leur efficacité, leur flexibilité et leur adaptabilité à différents domaines d'application. Ces propriétés fondamentales permettent d'assurer une communication fluide, une gestion intelligente des objets connectés et une évolution constante du réseau :

- **Interconnectivité** : Tous les objets sont reliés à l'infrastructure mondiale des technologies de l'information et des communications.
- **Services associés aux objets** : L'IoT fournit des services spécifiques aux objets, garantissant la protection de la vie privée et une cohérence sémantique entre les objets physiques et virtuels.
- **Hétérogénéité** : Les dispositifs IoT sont diversifiés et reposent sur des plateformes matérielles et des réseaux variés.

- **Changements dynamiques** : L'état des objets connectés évolue de manière dynamique, tout comme leur nombre.
- **Échelle massive** : Le nombre d'objets communicants dans un réseau IoT est bien plus élevé que celui des appareils actuellement connectés à Internet.
- **Sécurité** : La sécurité des données échangées entre les appareils est essentielle pour assurer la confidentialité et la protection des informations.
- **Connectivité** : La connectivité permet une accessibilité continue et une compatibilité entre différents réseaux, facilitant l'échange et la production de données. (Tahraoui Z., 2022).

L'usage de l'Internet des objets (IoT) en agriculture offre de nombreux avantages. Parmi les principaux, on peut citer :

- **Gestion optimisée de l'eau** : L'IoT permet une meilleure conservation des ressources en eau, en ajustant l'irrigation en fonction des besoins réels des cultures.
- **Augmentation des rendements** : Grâce à la collecte et à l'analyse des données, les agriculteurs peuvent maximiser les rendements de leurs cultures.
- **Amélioration de la qualité des produits** : L'IoT aide à suivre et contrôler les conditions environnementales, garantissant une qualité supérieure des récoltes.
- **Réduction des coûts opérationnels** : L'automatisation et la gestion optimisée des ressources permettent de diminuer les dépenses liées aux opérations agricoles.
- **Optimisation de l'élevage** : Les capteurs IoT surveillent en temps réel la santé et les besoins des animaux, contribuant à un élevage plus performant.
- **Collecte de données en temps réel** : L'IoT permet d'obtenir des informations précises sur les conditions de culture, offrant ainsi une meilleure vision de la production.
- **Surveillance et gestion à distance** : Les agriculteurs peuvent contrôler et surveiller leurs installations à distance, ce qui améliore l'efficacité et réduit la nécessité d'interventions physiques fréquentes. (Khaldi M., 2021).

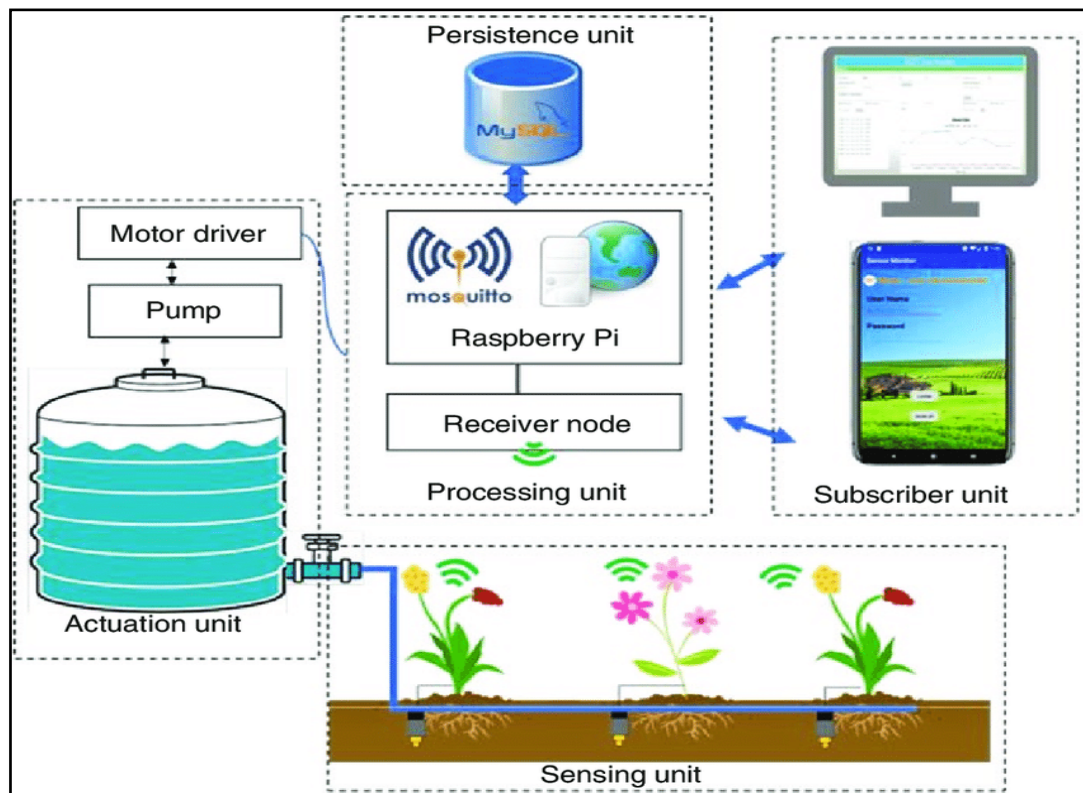


Figure II.1. Composants d'un système IOT.

(https://www.researchgate.net/figure/Proposed-smart-irrigation-system-architecture_fig3_343776611).

3. Architecture de l'agriculture intelligente

Sur le plan architectural, l'agriculture intelligente repose sur une organisation en trois couches principales : la couche de perception, la couche réseau et la couche application. Cette structure hiérarchique permet une gestion efficace des données et une automatisation des processus agricoles. (Kambouche S., & Attou I., 2018).

3.1. La couche de perception

Positionnée à la base de l'architecture, la couche de perception est chargée de la collecte des données et de leur identification dans l'environnement physique. (Kambouche S., & Attou I., 2018). Elle regroupe l'ensemble des dispositifs matériels nécessaires à l'acquisition des informations contextuelles, notamment :

- Capteurs (température, humidité, etc.)
- Étiquettes RFID
- Caméras
- GPS (systèmes de positionnement global).

3.2. La couche réseau

Cette couche assure la transmission sécurisée et fiable des données générées par la couche de perception. Elle permet la connectivité entre les objets intelligents ainsi que leur communication avec l'Internet. (Chebihi L., 2012).

Compte tenu du volume important des données générées par la multiplication des objets connectés, cette couche s'appuie sur des technologies de stockage et de traitement à grande échelle, en particulier via le cloud computing.

Le cloud permet une gestion dynamique des ressources et s'appuie sur des centres de données puissants capables d'absorber cette charge.

Un élément clé de cette couche est l'utilisation du réseau défini par logiciel (SDN - Software Defined Networking), qui sépare la prise de décision des fonctions opérationnelles du réseau. Cette abstraction permet une automatisation, une réduction de la latence et une optimisation du contrôle réseau. (Kambouche S., & Attou I., 2018).

Les technologies de communication sont utilisées en fonction des contraintes géographiques et des besoins en énergie :

- **LoRa (Long Range)** : Très efficace pour la transmission des données sur de longues distances avec une faible consommation d'énergie, particulièrement adapté aux zones agricoles en Algérie.
- **NB-IoT (Narrowband IoT)** : Utilisé pour les communications à faible coût et faible consommation énergétique.
- **ZigBee et Wi-Fi** : Plus adaptés aux petits réseaux à courte portée

3.3. La couche application

Cette couche définit les services intelligents proposés aux utilisateurs finaux, en fonction des données collectées et analysées. Elle prend en charge le traitement, la gestion et la visualisation des données issues de diverses sources.

Parfois, une quatrième couche dite « middleware » est introduite entre les couches matérielles et la couche application. Elle joue un rôle d'interface en facilitant :

- La gestion des dispositifs
- L'agrégation, l'analyse et le filtrage des données

Le contrôle d'accès aux services. Elle masque la complexité sous-jacente du réseau et simplifie le développement des applications agricoles. (Kambouche S., & Attou I., 2018).

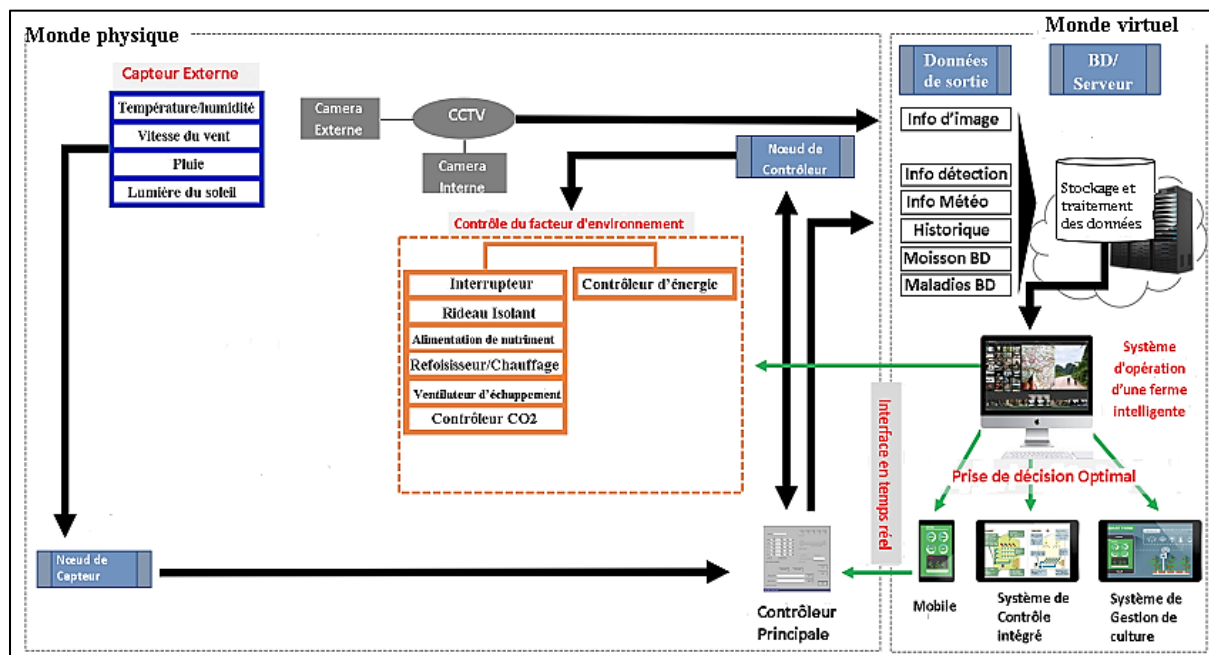


Figure II.2. Architecture de l'agriculture intelligente. (Kambouche S., & Attou I., 2018).

4. Applications de l'agriculture intelligente

La numérisation de l'agriculture repose sur l'intégration de multiples technologies connectées, organisées selon les couches présentées précédemment. Parmi ces technologies, on trouve :

4.1. Les drones

La transformation numérique de l'agriculture repose sur l'intégration de technologies connectées, structurées selon les couches technologiques précédemment décrites. Les drones, en particulier, jouent un rôle clé dans la surveillance des cultures. Ils permettent la collecte d'images aériennes et la réalisation de cartographies précises des parcelles, facilitant la détection des mauvaises herbes, des hétérogénéités de rendement et de l'état du sol. (Kambouche S., & Attou I., 2018).



Figure II.3. Les Drones agricoles.

(<https://www.dronexperts.com/article/agriculture-durable-drones/>).

4.2. Les agribots

Les agribots représentent une avancée majeure dans l'automatisation des pratiques agricoles. Ces petits robots intelligents sont conçus pour accomplir des tâches spécifiques avec une grande précision, contribuant ainsi à une agriculture plus efficace et durable. Parmi leurs principales fonctions, on retrouve :

- L'injection localisée d'engrais,
- L'arrosage ciblé en fonction des besoins hydriques,
- Le désherbage par laser, réduisant l'usage de produits chimiques,
- La pulvérisation précise de traitements phytosanitaires,
- La traite automatisée des bovins,
- Le nettoyage autonome des étables,
- La récolte robotisée des légumes.



Figure II.4. Utilisation des Agribots en agriculture intelligente. (<https://www.ouest-france.fr/economie/agriculture/innovation-les-robots-agricoles-l-assaut-des-mauvaises-herbes-5437549>).

4.3. Les tracteurs intelligents

Les tracteurs connectés permettent une optimisation des opérations agricoles à grande échelle. Grâce à leur intégration GPS et à des cartes numériques, ils peuvent :

- Réaliser un apport d'engrais automatique et personnalisé

Optimiser les trajets dans les champs, réduisant les pertes et les coûts. (Kambouche S., & Attou I.,2018).



Figure II.5. Les tracteurs intelligents sans conducteur. (<https://www.google.com/imgres?q=tracteur%20futuriste&imgurl>).

5. Les processus clés de l'Internet des objets (IoT)

L'Internet des objets repose sur une série de processus interconnectés qui assurent la circulation, le traitement et la valorisation des données issues du monde physique. (Haniche M., & Tabrait N., 2021).

5.1. Principaux processus

- **Capter** : Ce processus consiste à convertir une grandeur physique analogique (comme la température, l'humidité, etc.) en un signal numérique exploitable par des systèmes informatiques.
- **Concentrer** : Il s'agit d'interfacer un réseau d'objets connectés, souvent spécialisé, avec un réseau IP standard, comme le Wi-Fi ou d'autres technologies utilisées dans les dispositifs grand public.
- **Stocker** : Les données collectées sont agrégées et conservées, souvent en temps réel, avec des métadonnées associées. Ces informations, arrivant de façon imprévisible, doivent être organisées pour permettre des analyses ultérieures.
- **Présenter** : Ce processus a pour but de restituer les informations de manière compréhensible pour l'utilisateur humain, tout en lui permettant d'agir ou d'interagir avec le système via des interfaces adaptées. (Haniche M., & Tabrait N., 2021).

5.2. Traitement des données

Le traitement des données est transversal et peut intervenir à n'importe quel niveau de la chaîne IoT, depuis la captation jusqu'à la restitution. (Ait Mouhoub Y., & Bouchebbah F., 2015).

Une stratégie couramment adoptée consiste à collecter l'ensemble des données sous forme brute, dans une logique « big data », sans déterminer à l'avance les traitements à effectuer. Grâce à des architectures de bases de données distribuées de type NoSQL, cette méthode permet de stocker d'importants volumes d'informations et d'exécuter des analyses complexes de manière efficace. (Haniche M., & Tabrait M., 2021).

5.3. Transmission des données

Comme pour le traitement, la transmission intervient à tous les niveaux. On distingue généralement deux types de réseaux :

- **Réseau local de concentration** : Il utilise des technologies comme ANT, ZigBee, Z-Wave, NFC, Bluetooth Low Energy, qui assurent une communication à courte portée entre objets.
- **Réseau longue portée (WAN)** : Il sert à connecter les objets au cloud ou à d'autres systèmes à distance, via des moyens comme le Wi-Fi, les réseaux cellulaires (GSM, UMTS, LTE) ou les connexions filaires (Ethernet, fibre optique).

Le choix de la technologie de transmission dépend du contexte d'utilisation, notamment des besoins en bande passante, en consommation énergétique, ou en délai de transmission. Les canaux de communication peuvent être bidirectionnels, permettant une interaction en temps réel, ou unidirectionnels dans les systèmes plus simples. (Haniche M., & Tabrait N., 2021).

6. Composants fondamentaux d'un système IoT

Un système IoT complet repose sur quatre éléments essentiels qui assurent son fonctionnement global :

6.1. Les capteurs

Les capteurs sont responsables de la collecte d'informations issues de l'environnement physique. Cela peut aller d'une simple mesure de température ou de bruit à des flux complexes comme des images ou des vidéos.

Un même dispositif peut intégrer plusieurs capteurs (comme un smartphone : caméra, accéléromètre, GPS, etc.).

Que le capteur soit autonome ou intégré à un appareil, la première étape reste la détection de l'environnement. (Haniche M., & Tabrait N., 2021).

6.2. La connectivité

Une fois les données collectées, elles doivent être transmises vers Internet. Cette étape nécessite une connexion réseau, qui peut se faire via :

- Réseau cellulaire
- Satellites
- Wi-Fi
- Bluetooth
- Réseaux LPWAN (Low Power Wide Area Network)

Connexion filaire directe (Ethernet).

7. Enjeux et perspectives de l'Internet des Objets (IoT) en Algérie

L'Internet des Objets (IoT) représente une opportunité majeure pour moderniser l'agriculture en Algérie, notamment en matière d'irrigation intelligente. Toutefois, sa mise en œuvre reste confrontée à plusieurs défis structurels, techniques et socio-économiques. Ce chapitre analyse ces enjeux, illustre les réussites à l'échelle nationale et internationale, et explore les perspectives de développement. (Abdi, M. S., & Boumakel, O. D., 2020).

7.1. Défis majeurs à l'adoption de l'IoT en Algérie

7.1.1. Infrastructures numériques limitées

Dans de nombreuses zones rurales, la couverture Internet est encore faible ou instable, entravant la transmission en temps réel des données issues des capteurs IoT. Cette faiblesse est un frein majeur à la généralisation des solutions connectées. (Bouarfa et al., 2021).

7.1.2. Coûts élevés des équipements

L'investissement initial requis pour l'installation des capteurs, systèmes de communication, plateformes de gestion des données et dispositifs d'automatisation est souvent trop élevé pour les petits exploitants agricoles. (Haniche & Tabrait, 2021).

7.1.3. Manque de formation et sensibilisation

Une grande partie des agriculteurs algériens n'est pas formée à l'utilisation des technologies numériques. Il existe donc un besoin pressant en programmes de formation, accompagnement technique et vulgarisation. (Khaldi, 2021, Ben Salah et al., 2022).

7.2. Plateformes de gestion et d'analyse des données

Les plateformes IoT permettent de centraliser, stocker, analyser et visualiser les données collectées par les capteurs déployés sur le terrain. Ces données facilitent la prise de décision pour une irrigation de précision.

7.2.1. Fonctionnalités clés

- **Surveillance en temps réel** de l'état hydrique du sol, de la température, de l'humidité de l'air, etc.
- **Automatisation de l'irrigation**, basée sur des seuils définis par l'utilisateur ou générés automatiquement par IA.

- **Prédictions agronomiques** grâce à l'intelligence artificielle et à l'apprentissage automatique.
- **Système d'alertes** en cas d'anomalies (pannes de capteurs, baisse de pression, déficit hydrique).

7.3. Bénéfices de l'IoT en irrigation agricole

7.3.1. Optimisation de l'utilisation de l'eau

Grâce aux capteurs d'humidité du sol et aux algorithmes d'analyse, les agriculteurs peuvent ajuster avec précision les apports hydriques, évitant le gaspillage et les déficits en irrigation. (Haniche & Tabrait, 2021).

Exemple international : Le système IRRISAT en Espagne combine des capteurs au sol et des images satellitaires pour réduire de 25 % la consommation d'eau tout en maintenant la productivité. (Khaldi, 2021).

7.3.2. Automatisation des processus agricoles

L'IoT permet d'automatiser l'irrigation, la fertilisation, la détection des maladies et même certaines tâches mécaniques grâce à l'utilisation de robots agricoles. Cette automatisation réduit les besoins en main-d'œuvre et améliore la rentabilité. (Haniche & Tabrait, 2021).

7.3.3. Surveillance environnementale et gain de temps

Les agriculteurs peuvent suivre leurs parcelles à distance et détecter précocement des fuites ou anomalies. Cette capacité améliore la gestion des intrants et réduit les pertes.

7.4. Contraintes techniques et économiques

7.4.1. Investissements lourds

L'achat de capteurs, la connectivité, les plateformes cloud et leur maintenance nécessitent des ressources financières importantes. (Khaldi, 2021).

7.4.2. Couverture réseau limitée

L'absence d'une connectivité haut débit dans les zones agricoles est un obstacle majeur. Cependant, des technologies telles que **LoRaWAN** ou **NB-IoT** offrent des solutions à faible consommation énergétique et longue portée.

7.4.3. Maintenance et suivi technique

Les équipements IoT nécessitent une maintenance régulière. Un défaut de suivi peut compromettre tout le système.

7.5. Expériences internationales en irrigation intelligente

- **États-Unis (Californie)** : Les agriculteurs utilisent des capteurs couplés à des prévisions météorologiques pour optimiser les cycles d'irrigation en période de sécheresse. (FAO, 2022).
- **Inde** : Des programmes publics ont permis d'équiper des agriculteurs de capteurs IoT à faible coût connectés à des applications mobiles. (World Bank, 2021).
- **Espagne** : Le système IRRISAT permet une irrigation ciblée à partir de données satellites et capteurs in situ. (Khaldi, 2021).

7.6. Cas d'étude en Algérie et dans la Méditerranée

7.6.1. Algérie

- **Biskra** : Utilisation de capteurs d'humidité a permis une économie d'eau de 40 % et une augmentation de la productivité maraîchère.
- **Zit El Emba (Skikda)** : Des essais ont montré l'efficacité des capteurs d'humidité pour ajuster l'irrigation.
- **Oran & Mostaganem** : Des chercheurs ont développé un système IoT permettant un pilotage de l'irrigation via smartphone. (Haniche & Tabrait, 2019).

7.6.2. Tunisie et Maroc

- **Tunisie** : Des projets pilotes intègrent des capteurs et des plateformes mobiles pour un suivi en temps réel des conditions du sol. (Ben Salah et al., 2022).
- **Maroc** : Des coopératives agricoles adoptent des systèmes IoT pour l'irrigation de précision, avec un soutien étatique et des subventions ciblées. (Bouazza et al., 2023).

7.7. Perspectives de développement

- Renforcement des infrastructures numériques (réseaux 4G/5G, LoRa, NB-IoT).
- Soutien public à l'adoption des technologies (subventions, partenariats public-privé).
- Création de centres de formation pour accompagner les agriculteurs dans la transition numérique.

- Intégration avec l'intelligence artificielle et les SIG pour une gestion encore plus fine de l'irrigation.

Conclusion

L'Internet des Objets (IoT) constitue une innovation majeure qui transforme profondément la gestion de l'eau dans le secteur agricole. En facilitant la collecte, l'analyse et le transfert de données en temps réel, l'IoT permet une gestion plus précise, efficiente et durable des systèmes d'irrigation. L'intégration de capteurs intelligents, de réseaux de communication avancés et de plateformes d'analyse de données rend possible un suivi continu de paramètres essentiels tels que l'humidité du sol, la température ambiante ou encore les besoins hydriques spécifiques des cultures.

Cette approche technologique favorise une utilisation rationnelle de la ressource en eau, réduisant considérablement les pertes, les coûts énergétiques et les interventions humaines superflues, tout en améliorant les rendements agricoles. Bien que des défis subsistent, notamment en termes de coûts initiaux, de maintenance des équipements et de compatibilité technologique, l'IoT s'impose déjà comme un levier indispensable pour répondre aux enjeux croissants de la gestion durable de l'eau en agriculture.

À l'avenir, la convergence de l'IoT avec d'autres technologies émergentes telles que l'intelligence artificielle et le big data ouvre des perspectives prometteuses pour une agriculture encore plus intelligente, résiliente et respectueuse de l'environnement.

2^{ème} Partie :

Partie Pratique

Chapitre III :

*Analyse territoriale et fonctionnelle
du périmètre irrigué de Zit El Emba*

Introduction

L'optimisation de la gestion de l'eau d'irrigation repose sur une compréhension approfondie des caractéristiques du périmètre irrigué concerné. Ce chapitre est consacré à l'étude du périmètre irrigué de Zit El Emba, situé dans la wilaya de Skikda, en Algérie. Il vise à présenter les spécificités géographiques, climatiques et hydrologiques de la région, ainsi que les infrastructures et les pratiques agricoles qui y sont mises en œuvre.

Dans un premier temps, une description détaillée de la région sera fournie, incluant sa localisation, son climat et ses ressources hydriques. Ensuite, les caractéristiques du périmètre irrigué seront examinées en termes de superficie, de cultures pratiquées et de réseaux d'irrigation existants. Par ailleurs, les principaux défis auxquels ce périmètre est confronté seront identifiés, notamment l'inefficacité de la distribution de l'eau et les problèmes environnementaux tels que la salinité et les pertes hydriques. Enfin, les données de base essentielles à l'analyse, incluant les paramètres climatiques, hydrologiques et les infrastructures en place, seront présentées afin de poser les bases d'une gestion optimisée de l'irrigation à l'aide de l'Internet des Objets (IoT).

1. Présentation de la région d'étude

1.1. Localisation géographique

Le périmètre irrigué de Zit El Emba est situé dans la wilaya de Skikda, une région agricole importante du nord-est de l'Algérie. Il bénéficie d'une position stratégique à proximité de la mer Méditerranée, ce qui influence son climat et ses ressources en eau. La région est délimitée au nord par la mer Méditerranée, au sud par des zones montagneuses, et à l'est et à l'ouest par de vastes terres agricoles qui reposent sur l'irrigation traditionnelle et moderne. (Ministère de l'Agriculture, Algérie, 2022).

La wilaya de Skikda se caractérise par une diversité topographique comprenant des plaines fertiles, des plateaux vallonnés et des vallées, offrant ainsi un cadre propice aux activités agricoles. La plaine de Zit El Emba est l'une des plus importantes de la région, grâce à la fertilité de ses sols et à la disponibilité de diverses sources d'eau pour l'irrigation. De plus, la proximité de la région avec le réseau routier national et local facilite le transport des produits agricoles, favorisant ainsi le dynamisme du secteur agricole. (Daiffalah T., 2017).

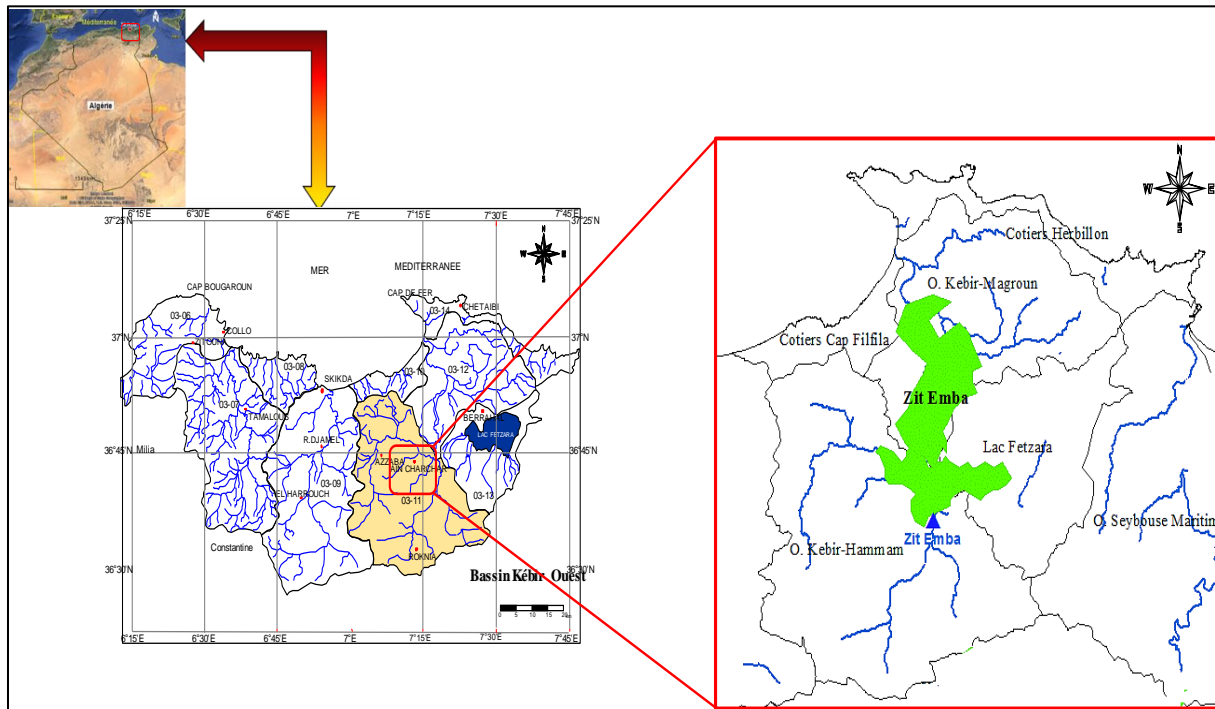


Figure III.1. Localisation géographique de la zone d'étude. (Nini F., 2021, modifiée).

1.1. Géomorphologie de la zone

Le périmètre d'irrigation a été défini dans les parties plates de la contrée, entourées de coteaux et de collines à relief plus ou moins accentué. La plaine alluviale de l'Oued Kébir, sur lequel se trouve le barrage, est relativement étroite à l'aval immédiat du barrage – elle ne présente ici qu'une largeur d'un kilomètre environ. En aval du confluent avec l'oued Emchekel, elle s'ouvre progressivement pour aboutir dans une plaine côtoyant les plaines des alentours du lac salé de Fetzara. La plaine alluviale du cours inférieur de l'Oued Kébir a également été incluse dans le périmètre. Dans sa plus grande partie, le périmètre à équiper est délimité par les pieds des collines environnantes. Sa limite Est, dans la direction du lac Fetzara, est constituée par des terres à sol chargé de sel qui, pour cette raison, ont été éliminées de la mise en exploitation.

Au Nord, le périmètre s'arrête à la limite de la bande des dunes de sable qui se prolonge jusqu'à la côte méditerranéenne. La limite du périmètre à aménager y est constituée par le canal d'assainissement et le lit de l'Oued Kébir, près de Ben Azzouz. La surface totale équipée est de 6475 ha. Le périmètre se subdivise en deux parties : Sud et Nord, la limite entre ces deux zones étant constituée par le tracé prévu de l'autoroute Constantine-Annaba. La zone Sud couvre une superficie de 2516 ha et la zone Nord 3959 ha. (Daiffalah T., 2017).

Le périmètre est traversé par la voie ferrée, la route Constantine-Annaba et par un réseau de voies de communication d'importance locale. La plupart des villages périphériques se trouvent

en dehors du périmètre, seuls quelques hameaux au Sud de Ben Azzouz sont situés à son intérieur. La zone aménagée est traversée aussi par des conduites de gaz et d'eau, ainsi que par des lignes électriques et téléphoniques.

Le territoire étudié comprend plusieurs zones montagneuses composées de divers massifs. Parmi les djebels les plus importants, on distingue :

- Djebel Sidi Driss (1364 m d'altitude), situé au sud.
- Djebel Hadjar Chouat (1220 m d'altitude), situé à la limite des vallées du Guebli et du Saf-Saf.
- Djebel Staiha (572 m d'altitude).
- Djebel Abdelhadj (564 m d'altitude), à la frontière entre le Saf-Saf et El-Kebir.
- Djebel Fil-Fila (586 m d'altitude), situé au nord.
- Cap Bougaroun et Cap de Fer, formant les reliefs côtiers.

Le territoire comprend également plusieurs plaines importantes :

- La plaine de la vallée du Saf-Saf, qui s'étend d'El-Harrouch à Skikda en suivant le cours du Saf-Saf.
- La plaine de la vallée de l'Oued El-Guebli, débutant à Oum-Toub, s'élargissant au niveau de Tamalous, se rétrécissant jusqu'à Collo avant de s'ouvrir à nouveau.
- La plaine de la vallée de l'Oued El-Kebir.
- La plaine d'Azzaba, irriguée par l'Oued El-Kebir, qui s'étend d'Es-Sebt à Azzaba jusqu'à Djendel, où elle se rétrécit avant de s'ouvrir à Ain Charchar et Bekkouche Lakhdar. Une partie de cette plaine constitue une zone de transition entre la plaine et la dépression débutant au lac Tanga, près d'El-Kebir. (Abdeladim Y., 2021).

2. Caractéristiques hydro-climatiques

Les facteurs climatiques, notamment les précipitations, la température, l'évapotranspiration et l'humidité, influencent de manière déterminante le fonctionnement hydrologique des bassins versants. Les fluctuations de température et d'humidité entraînent des phénomènes d'expansion et de contraction des roches, provoqués par l'alternance gel/dégel ou les variations de leur teneur en eau. Cette étude hydro-climatique a pour objectif principal d'analyser les paramètres suivants : les précipitations, l'évaporation, l'infiltration et le ruissellement. En s'appuyant sur

les données météorologiques disponibles et en appliquant des méthodes adaptées aux spécificités de la région étudiée, elle vise à établir un bilan hydrique fiable et représentatif. (Ghomrani NH et Medjrab N., 2021).

2.1. Station de mesure

L'analyse climatologique repose sur les données enregistrées à la station météorologique de Belkhir (wilaya de Guelma). Cette étude hydro climatique couvre une période de 21 cycle hydrologique (Abdeladim Y., 2021), s'étalant de (1997/98-2017/18). Les coordonnées géographiques de cette station sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau III.1. Caractéristiques de la station utilisées dans l'étude.

Station	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Période d'observation
Belkhir (Guelma)	7°28' E	36°28' N	227	(1997/98-2017/18)

(Abdeladim Y., 2021)

2.2. Les paramètres météorologiques déterminants

2.2.1. Les précipitations

La pluviométrie désigne l'ensemble des précipitations reçues sur un bassin versant, incluant pluie, neige, grêle et autres formes de condensation. Cet élément est fondamental pour établir le bilan hydrologique d'une région. Selon un rapport de la Direction de l'Environnement, la wilaya de Skikda est parmi les régions les plus arrosées d'Algérie, avec des précipitations annuelles très abondantes, principalement sous forme de pluies torrentielles concentrées durant les mois d'hiver, de novembre à février.

La distribution géographique des précipitations dans la région montre une diminution générale du nord vers le sud et de l'est vers l'ouest. Cette variation implique que les quantités de pluie diminuent progressivement à mesure que l'on s'éloigne des zones côtières et orientales.

a. Les précipitations mensuelles

Le graphique présente la moyenne mensuelle des précipitations sur une période de 20 ans. Il révèle une forte variabilité inter-mensuelle. Les précipitations enregistrées au cours de l'année montrent une variation mensuelle significative. Le mois de janvier se distingue comme étant le plus arrosé, avec une moyenne de 134,4 mm, représentant le maximum annuel. Cette abondance en début d'année est typique des climats méditerranéens, où les précipitations hivernales jouent un rôle crucial dans la recharge des ressources hydriques.

En revanche, le minimum est atteint en juillet, avec seulement 6,6 mm, ce qui témoigne d'une quasi-absence de précipitations pendant l'été. Cette sécheresse estivale marque une rupture nette avec les mois précédents et rend la disponibilité en eau extrêmement dépendante de l'irrigation artificielle durant cette période. (Abdeladim Y., 2021).

Entre ces deux extrêmes, on observe une montée progressive des précipitations de septembre (46,9 mm) à décembre (118,3 mm), traduisant l'entrée dans la saison humide. Ensuite, après le pic de janvier, les pluies déclinent graduellement à partir de février (86,2 mm) pour atteindre un niveau modéré au printemps (mars : 66,9 mm, avril : 55 mm), puis plus faible en mai (45,2 mm).

Tableau III.2. Précipitations moyennes mensuelles à la station de Skikda.
(1997/98-2017/18).

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Moyenne annuelle
P (mm)	48,0	49,8	104,4	116,0	134,4	77,4	45,3	56,0	34,5	8,1	6,6	8,0	688,5

(Abdeladim Y., 2021)

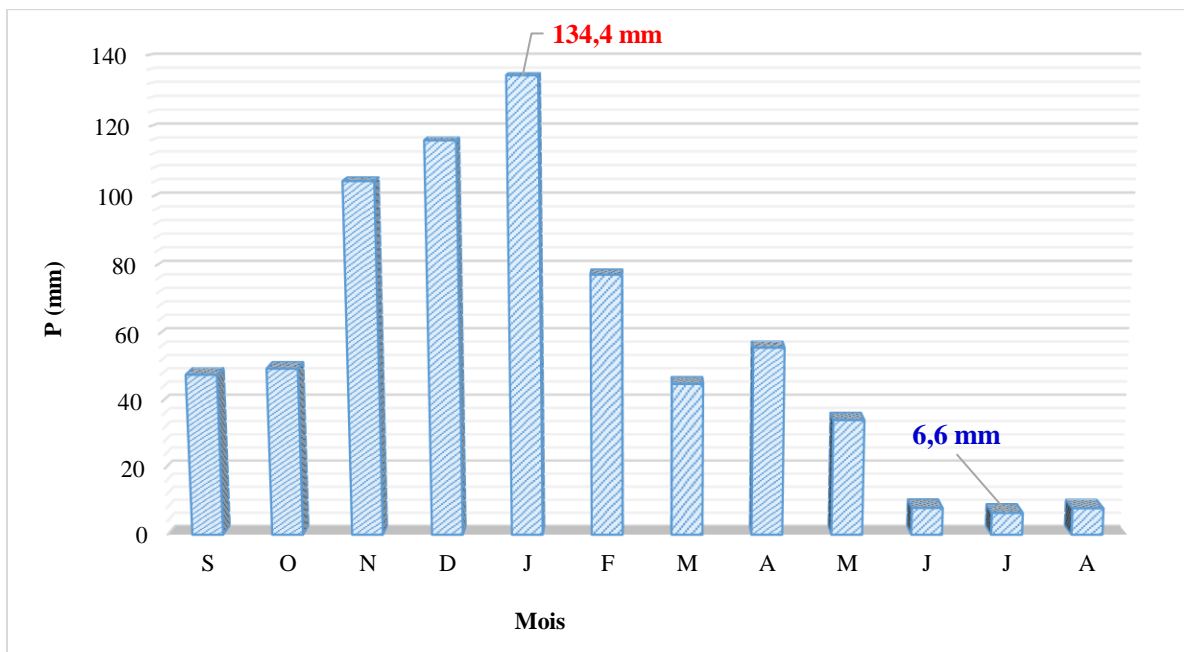


Figure III.2. Distribution des précipitations mensuelles dans la zone d'étude.
(1996 /97-2016/17).

b. Les précipitations saisonnières

L'analyse des précipitations saisonnières permet d'étudier la répartition annuelle des précipitations selon les quatre saisons : automne, hiver, printemps et été. Cette analyse est essentielle pour identifier les périodes de forte pluviosité ainsi que les saisons plus sèches, ce qui revêt une importance capitale pour la gestion des ressources en eau et la planification agricole.

Les moyennes de précipitations pour chaque saison sont synthétisées dans le tableau, offrant ainsi une vue d'ensemble claire de la variabilité des précipitations tout au long de l'année.

Tableau III.3. Précipitations moyennes saisonnières à la station de Skikda (1996 /97-2018/19).

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Moyenne annuelle
	Automne			Hiver			Printemps			Eté			
P (mm)	202,2			327,8			135,8			22,7			688,5
P (%)	29,36			47,62			19,72			3,30			100%

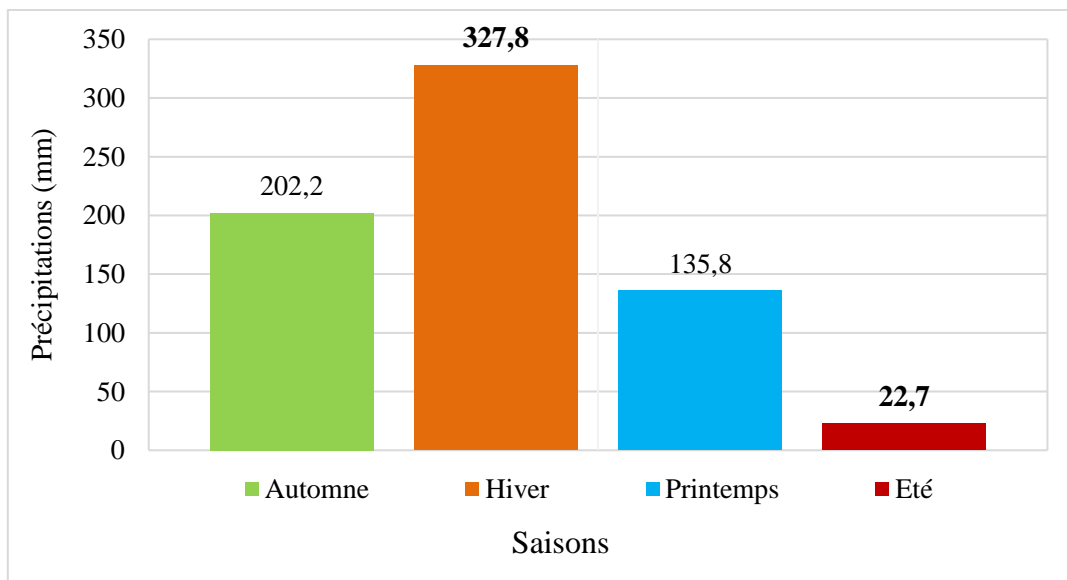


Figure III.3. Distribution des précipitations saisonnières dans la zone d'étude (1996 /97-2017/18).

Les données de précipitations saisonnières de la série chronologique (1996/97-2017/18) révèlent que l'hiver se distingue comme la saison la plus pluvieuse, avec une moyenne de précipitation de 327,8 mm, ce qui représente 47,62 % de la précipitation totale annuelle. Cette période assure la majeure partie de l'apport hydrique annuel, favorable à la recharge des nappes, des barrages et à l'humidification des sols agricoles. À l'inverse, l'été est la saison la plus sèche, avec une moyenne de seulement 22,7 mm de précipitations, soit 3,30 % de la précipitation totale annuelle. Cette période est caractérisée par un déficit hydrique important, ce qui rend la gestion de l'irrigation cruciale pour garantir la survie des cultures. L'absence quasi totale de pluie renforce la nécessité de recourir à des systèmes d'irrigation performants.

Ces données revêtent une importance cruciale pour comprendre les tendances climatiques de la région. Elles influencent significativement la gestion des ressources en eau et la planification des activités agricoles, en mettant en évidence les périodes de forte pluviosité et les périodes plus sèches de l'année.

2.2.2. Les températures

La température est un élément clé du bilan hydrique, influençant directement le déficit de ruissellement. Ce déficit représente la différence entre les précipitations et l'eau qui s'écoule effectivement sur le sol sous forme de ruissellement. Une température élevée favorise l'évapotranspiration, augmentant ainsi le déficit de ruissellement et réduisant la quantité d'eau disponible pour les rivières et les nappes phréatiques.

Tableau III.4. Températures moyennes mensuelles à la station de Skikda. (1996 /97-2018/19)

Mois	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars.	Avr.	Mai.	Jun.	Juil.	Aout.	Moy-
T (°C)	24,35	21,6	16,8	14,1	12,4	13,0	14,6	17,0	19,5	23,1	25,0	26,8	19,02

(Ghomrani NH, et Medjrab N., 2021)

Les températures enregistrées illustrent parfaitement le climat méditerranéen de la région, avec une moyenne annuelle de 19,02 °C.

En janvier, la température moyenne mensuelle atteint son minimum à 12,4 °C. En revanche, c'est en août que la température moyenne mensuelle est la plus élevée, culminant à 26,81 °C, ce qui en fait le mois le plus chaud de l'année.

L'évolution des températures montre une diminution progressive de septembre à janvier, suivie d'une augmentation continue qui atteint son maximum en août.

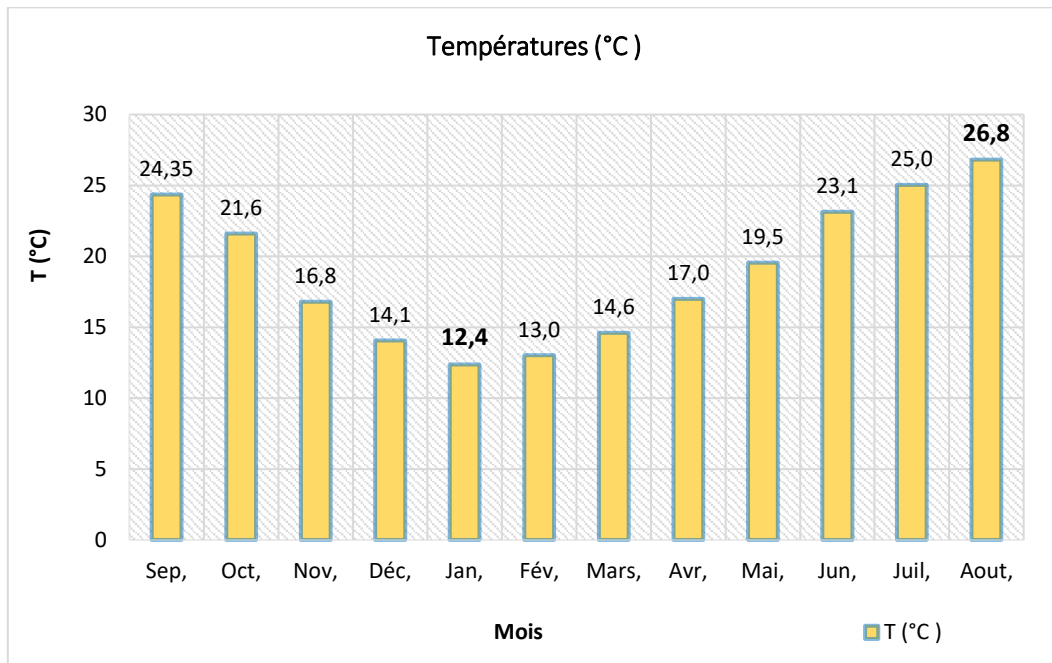


Figure III.4. Températures moyennes mensuelles dans la zone d'étude.
(1996 /97-2018/19).

2.3. La relation entre les précipitations et la température : (Courbe de Gaussen)

La courbe de Gaussen est utilisée pour déterminer les périodes humides et sèches. Le mois sec, selon Gaussen, est défini par une somme de précipitations égale ou inférieure au double de la température ($P \leq 2T$), tandis que le mois humide a une somme de précipitations égale au double de la température ($P = 2T$).

La courbe de Gaussen est un outil utilisé pour identifier les périodes humides et sèches en fonction des précipitations et des températures. Selon cette méthode :

- Une saison est considérée comme sèche si la somme des précipitations est égale ou inférieure au double de la température moyenne du mois ($P \leq 2T$).
- Une saison est considérée comme humide si la somme des précipitations est égale au double de la température moyenne du mois ($P = 2T$).

Cette relation permet de caractériser de manière précise les périodes de sécheresse et d'humidité au cours de l'année.

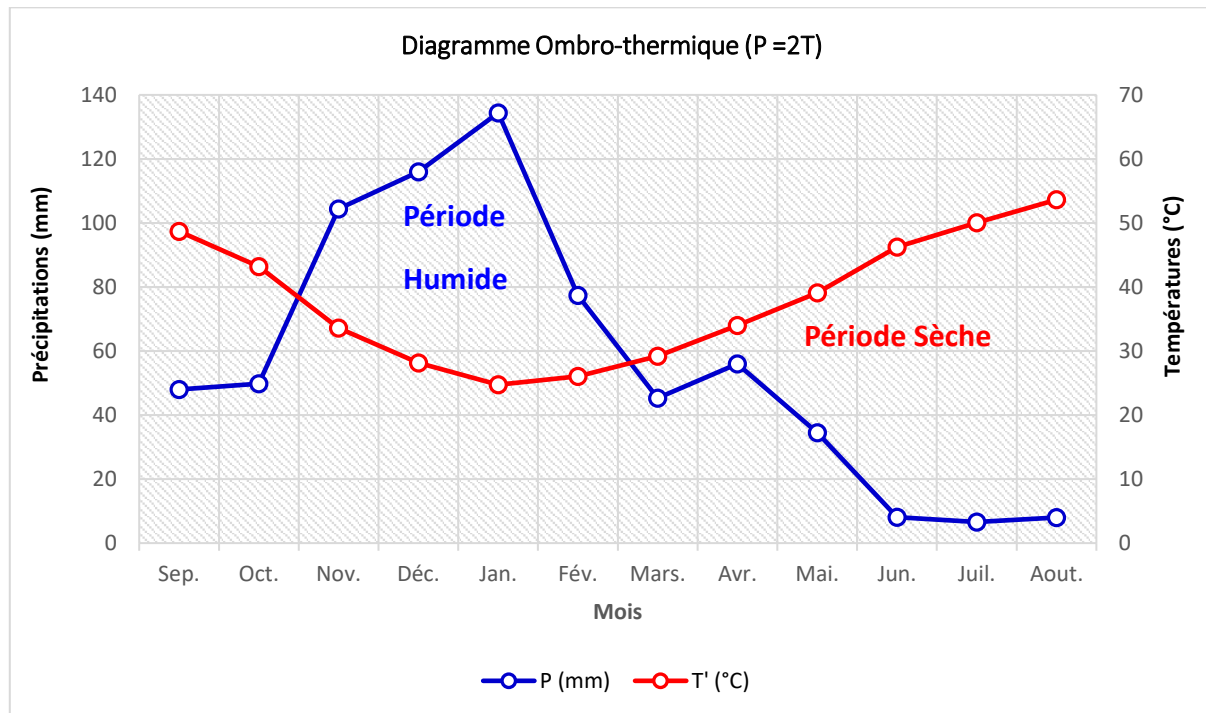


Figure III.5. Diagramme ombro-thermique dans la station de Skikda.
(1996 /97-2017/18)

Il est intéressant de noter l'inversement des tendances entre les températures et les précipitations. Lorsque les températures augmentent, les précipitations diminuent, et vice versa. Cela est typique des climats méditerranéens où les étés sont chauds et secs, et les hivers sont doux et humides.

Selon le diagramme ombro-thermique, on observe une alternance entre une saison sèche et une période humide :

- *Période sèche* : La saison sèche s'étend de mars à mi-octobre. Durant cette période, les précipitations sont relativement faibles, atteignant un minimum en juillet. Cette période correspond également à des températures élevées, culminant en août.
- *Période humide* : La période humide s'étend de mi-octobre jusqu'au fin février. Pendant ces mois, les précipitations augmentent de manière significative, avec un maximum en janvier. Les températures sont plus basses pendant cette période, surtout en janvier et février.

Un aspect notable est l'inversement des tendances entre les températures et les précipitations. Les températures augmentent lorsque les précipitations diminuent, et à l'inverse, les précipitations augmentent lorsque les températures baissent. Ce schéma est caractéristique des climats méditerranéens, avec des étés chauds et secs et des hivers doux et pluvieux.

2.4. Caractéristiques du réseau hydrographique

La topographie contrastée, l'agressivité du climat et la lithologie tendre (marnes et argiles) ont permis l'installation d'un réseau hydrographique dense.

Le bassin du Kébir Ouest résulte de la jonction de deux cours d'eau importants : l'Oued Emchekel et l'Oued El Hammam où on a réalisé le barrage des Zit Emba, Le sous bassin versant de l'Oued El Hammam, constitue l'unité principale dans l'alimentation du barrage (Daifallah T., 2007). Il prend sa source sur le versant Nord de l'atlas tellien, et suit le pli anticlinal de l'étendue sublatérale, il couvre une surface de 523,46 km² et est essentiellement drainé par quatre principaux affluents :

- Oued El Hammam qui draine la partie Est (30 km).
- Oued Roknia qui draine la partie Sud.
- Oued Messilga qui draine la partie Sud-Ouest (7.5 km).
- Oued Mouger qui draine la partie Ouest (16km).

Le réseau hydrographique du sous bassin de l'Oued Emchekel draine une superficie de l'ordre de 606,80 km², le cours d'eau amont porte le nom de l'Oued Fendek drainant la zone Sud-Ouest du sous bassin versant, et c'est après la traversée de la plaine d'AZZABA que Fendek devient Emchekel , leurs principaux affluents sont :

- L'oued Fendek (21 km) ;
- L'oued Hamimine (30 km);
- L'oued Zeer (11km).

d'un projet d'aménagement futur. L'ensemble du périmètre est alimenté par les eaux du barrage de Zit El Emba, construit sur l'oued Kébir-Hammam, relevant du bassin des Côtiers constantinois. (Nini F., 2021).

Cette zone bénéficie d'un bon niveau d'accessibilité grâce à la Route Nationale 44 (RN44), qui la traverse d'ouest en est, ainsi qu'un réseau secondaire composé de chemins de wilaya (CW) et de routes rurales. Le centre urbain le plus proche est la commune d'Azzaba, distante d'environ 10 km à l'ouest des limites du périmètre. (Abdeladim Yacine, 2021).

Administrativement, le périmètre relève de la daïra de Ben Azzouz (wilaya de Skikda), et est délimité comme suit:

- Au nord : l'autoroute reliant Constantine à Annaba ;
- Au nord-ouest : la forêt de Dem-El-Bagrat ;
- À l'est : la ville de Boumaiza et la rive occidentale du lac Fetzara ;
- Au sud : la ville de Bekkouche-Lakhdar ;
- Au sud-ouest : la commune de Ain-Charchar ;
- À l'ouest : le djebel Safia et la commune de Djendel Saadi Mohamed.

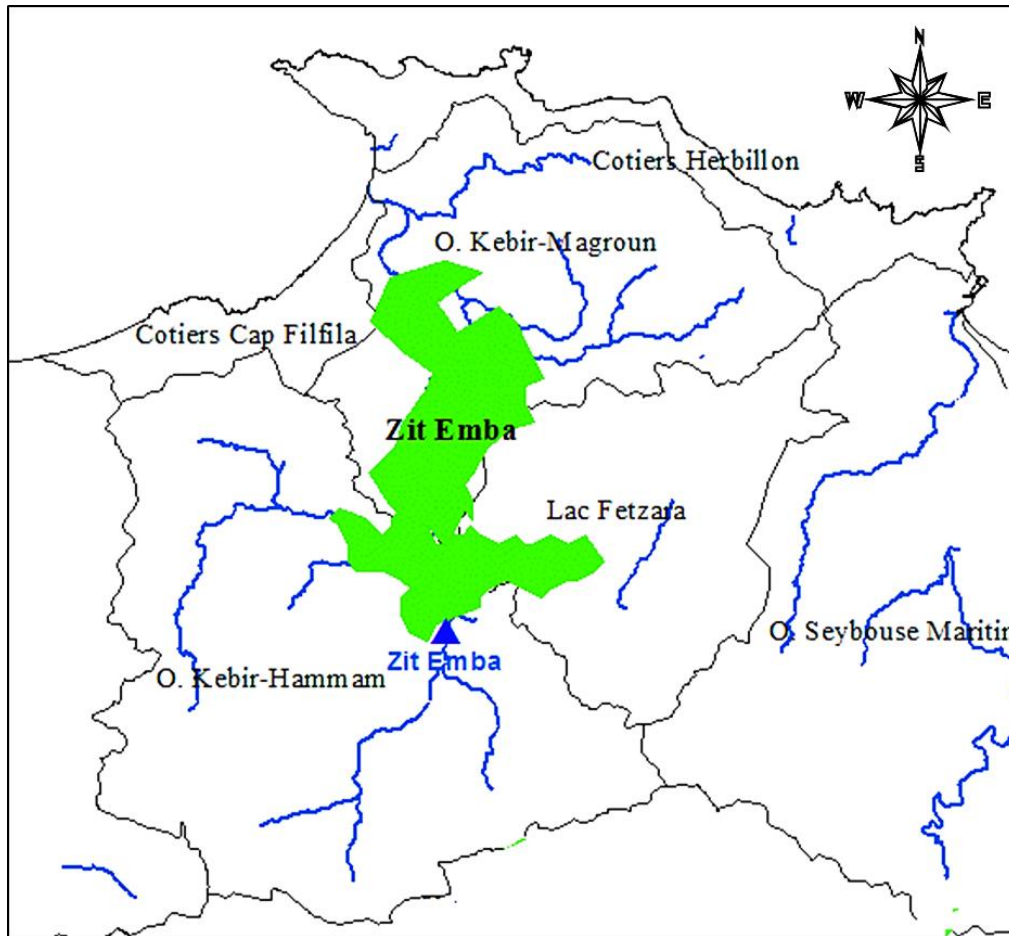


Figure III.7. Bassin versant, barrage et périmètre d'irrigation de Zit Emba. (Nini F., 2021).

Le périmètre irrigué, situé dans la région sub littorale à climat méditerranéen, bien que sujette à des températures douces et à de fortes précipitations, se caractérise par une saison sèche qui nécessite une irrigation en été.

3.2. Caractéristiques du périmètre irrigué de Zit El Emba

Le périmètre irrigué de Zit El Emba constitue une zone agricole stratégique au sein de la wilaya de Skikda, jouant un rôle majeur dans l'approvisionnement en produits agricoles au niveau local et national. Grâce à ses terres fertiles et à l'accès à différentes ressources en eau, cette région permet la culture de diverses productions agricoles, allant des céréales aux cultures maraîchères et arboricoles. Toutefois, la gestion efficace de l'eau reste un défi majeur face aux contraintes climatiques et aux besoins croissants du secteur agricole.

L'étude des caractéristiques de ce périmètre est essentielle pour mieux comprendre les superficies cultivées, les types de cultures, les infrastructures d'irrigation et les ressources hydriques disponibles.

3.2.1. Superficie et cultures pratiquées

Le périmètre irrigué de Zit El Emba s'étend sur plusieurs centaines d'hectares, ce qui en fait l'un des pôles agricoles majeurs du nord-est algérien. Grâce à la diversité de ses sols et à une disponibilité en eau relativement stable, il offre des conditions favorables à une agriculture diversifiée, associant cultures saisonnières et pérennes. (Nini F., 2021).

L'activité agricole dans la zone se concentre principalement sur la culture de la tomate industrielle, qui occupe 43 % des superficies irriguées, suivie de près par les cultures maraîchères avec 41 %. L'arboriculture, bien que moins développée, représente tout de même 16 % de la surface irriguée (tableau III.5).

Tableau III.5. Le système de cultures en irrigué dans le périmètre de Zit El Emba.

Compagne	Cultures Industrielles (ha)	Maraîchage (ha)	Arboriculture (ha)	Cultures fourragères (ha)	Céréaliculture (ha)	Total
Sup (ha)	440,25	421,75	158,5	0	0	1020,5
Sup (%)	43	41	16	0	0	100

(Nini F., 2021)

La diversité des cultures dans cette région est influencée par les conditions climatiques, la qualité des sols et la disponibilité en eau. On distingue notamment :

- Les cultures céréalières : Le blé et l'orge sont largement cultivés, jouant un rôle clé dans l'approvisionnement en produits de base. Ces cultures sont généralement irriguées en complément des précipitations naturelles, particulièrement en périodes de sécheresse prolongée.
- Les cultures maraîchères : La région est réputée pour sa production de pommes de terre, tomates, carottes, oignons, poivrons et aubergines. Ces cultures nécessitent des quantités importantes d'eau et sont souvent irriguées par aspersion ou goutte-à-goutte pour optimiser la consommation en eau. La pomme de terre, en particulier, constitue une culture stratégique en raison de son importance économique sur le marché national.
- Les cultures arboricoles : L'oléiculture est très répandue, avec la culture de l'olivier comme l'une des principales activités agricoles de la région. En plus des oliveraies, les agrumes (oranges, citrons, mandarines) sont également cultivés, bénéficiant d'un climat méditerranéen favorable. Ces cultures pérennes nécessitent une irrigation régulière, notamment en été.

- Les cultures fourragères et légumineuses : Ces cultures sont essentielles pour soutenir l'élevage local. La luzerne et le trèfle sont fréquemment cultivés pour l'alimentation du bétail, tandis que les légumineuses comme les pois chiches et les fèves permettent d'enrichir les sols en azote.

3.2.2. Phases d'aménagement du périmètre irrigué

a. Première phase d'aménagement (Zone sud)

La première phase, localisée dans la partie sud du périmètre, concerne une superficie aménagée de 2516 hectares, dont 2010 hectares sont réellement irrigables. Elle a été mise en service en juin 2007, marquant le début de l'exploitation effective de la zone.

b. Deuxième phase d'aménagement (Zone nord)

La seconde phase, correspondant à la zone nord, s'étend sur une superficie de 3984 hectares qui n'ont pas encore été équipés. En 2017, la décision n° 1132 du 21 août a modifié la résolution n° 640 du 13 mai, autorisant l'ouverture d'une enquête préalable en vue de l'établissement d'un second arrêté d'utilité publique pour le projet d'aménagement hydro-agricole de Zit El Emba. Cette tranche concerne spécifiquement 3 559 hectares, dont l'alimentation en eau est assurée par le barrage de Zit El Emba via l'oued El Kebir. (DSA de Skikda, 2018).

4. Ressources en eau dans la région d'étude

L'eau représente le premier élément nécessaire pour la végétation, il constitue pour la plante un support, une réserve d'eau et d'éléments nutritifs. L'analyse des ressources en eau sera axée sur la mobilisation des ressources en eau suffisantes et la qualité de l'eau d'irrigation ainsi la détermination de l'année de calcul ou la pluie de projet. Les eaux d'irrigation peuvent être superficielles (barrages, lacs, cours d'eau) ou souterraines (Nappes, forages, puits). Elles doivent être en outre de bonne qualité, surtout peu chargées en sels. (Nini F. & Mebarki A., 2019).

Le présent chapitre a pour objet d'examiner les ressources en eau du barrage de Zit El Emba qui permettent d'approvisionner en eau et d'irriguer le périmètre de Zit El Emba.

4.1. Alimentation en eau de surface : Barrage de Zit Emba

La capacité de stockage du barrage est de 120 hm³. Depuis la mise en service du barrage en 2002, la réserve d'eau a atteint des niveaux élevés, et se caractérise par une stabilité au fil des années, avec une moyenne annuelle de 99,426 hm³, soit 83% de la capacité du barrage.

Cependant, les lâchers annuels d'eau au profit de l'irrigation durant la période (2003 -2016) sont faibles ($4,186 \text{ hm}^3$) variant dans une fourchette de $2,2$ à $6,33 \text{ hm}^3$; ils représentent dans le meilleur des cas 8 % de la réserve (Fig. III.8))

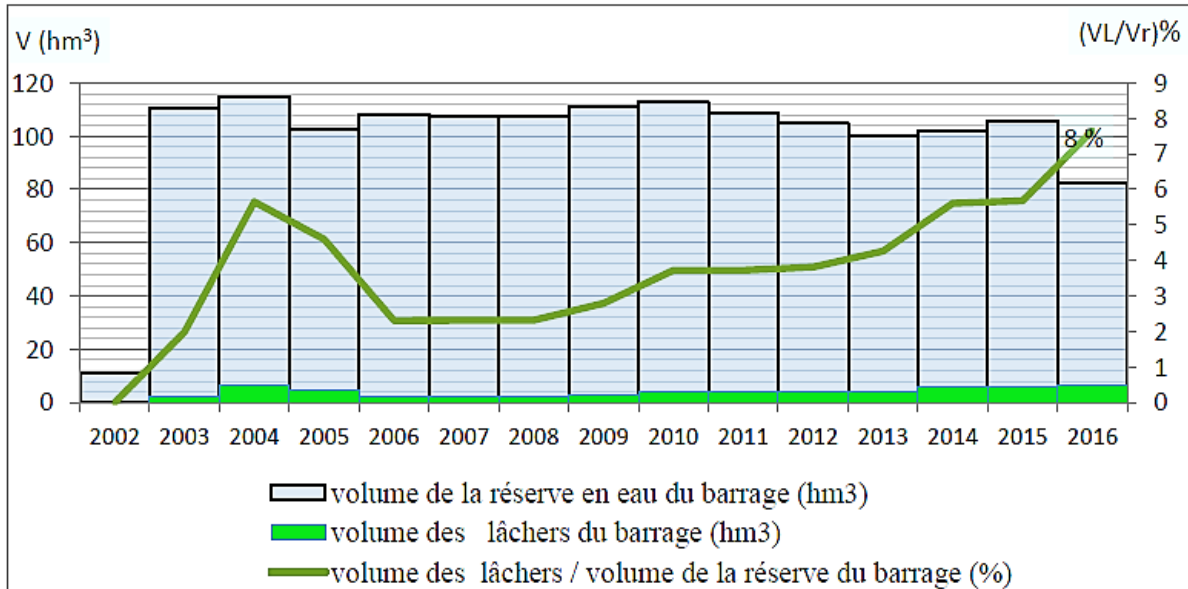


Figure III.8. Variation interannuelle de la réserve d'eau et des lâchers d'eau du barrage de Zit El Emba (2002 -2016). (Abdeladim Y., 2021) .

Dans un premier temps, le barrage de Zit El Emba était destiné à irriguer le périmètre, mais la commune d'Azzaba et à la ville de Skikda. Les prélèvements d'eau pour l'alimentation en eau potable ont atteint $9,963 \text{ hm}^3$ en 2016 soit 8,6% de la réserve du barrage.

4.2. Caractéristiques principales du Barrage Zit El Emba

Le barrage de Zit El Emba est implanté sur l'oued El Hammam, à environ deux kilomètres de la commune de Bekkouche Lakhdar. Construit en terre hétérogène avec un noyau central en argile, cet ouvrage hydraulique joue un rôle stratégique dans la régulation et la gestion des ressources en eau de la région. (Nini F. & Mebarki A., 2017).

4.2.1. Fonctions et destination

Le barrage a pour principale vocation la régularisation pluriannuelle des écoulements hydriques, permettant ainsi une gestion maîtrisée de l'eau au fil des saisons. Il assure l'alimentation en eau potable (AEP) des communes de Azzaba, Djendel, et Ain Charchar, tout en contribuant au renforcement de l'approvisionnement en eau de la ville de Skikda, avec un débit journalier de $33\ 000 \text{ m}^3$. (MRE., 2018).

En matière d'agriculture, l'ouvrage soutient l'irrigation des terres adjacentes estimées à 2500 hectares, avec un volume annuel mobilisé de 3,5 Hm³, via les réseaux gérés par l'ONID. En complément, l'irrigation par lâchers d'eau dessert également les régions de Ben Azzouz, Marsa, Oued El Kébir, Boumaiza et L'Hama, avec une dotation annuelle de 6 Hm³. (MRE., 2018).

4.2.2. Caractéristiques techniques

Sur le plan hydraulique, le barrage présente une capacité totale de retenue de 120 millions de m³ (Mm³), dont 43,4 Mm³ sont régularisés. La région bénéficie d'une pluviométrie annuelle moyenne de 700 mm, renforçant le potentiel de remplissage du barrage. La superficie du plan d'eau à la cote normale de retenue est de 810 hectares. (Abdeladim Y., 2021).

Tableau III.6 : Caractéristiques hydrauliques du barrage Zit-Emba.

Paramètre	Valeur
Type	Terre hétérogène avec noyau d'argile
Capacité de la retenue	120 Mm ³
Volume régularisé	43,4 Mm ³
Hauteur de la digue	50 m
Longueur en crête	598,5 m
Altitude de retenue normale	86 m
Altitude des plus hautes eaux	91 m
Superficie plan d'eau au N.N.R	810 ha
Pluviométrie	688,5 mm

(Abdeladim Y., 2021)

4.3. Les eaux souterraines

L'analyse des ressources en eau souterraines de la région de Zit El Emba a montré que les prélèvements d'eau à usages urbains ou industriels par forage ont déjà atteint les potentialités reconnues du sous-sol de la région.

Pour les forages à usage non agricole recensés en 1991 et ceux en cours en 1992 (destinés notamment à la wilaya de Annaba), le débit d'équipement est de 517 l/s environ, alors que le débit d'exploitation conseillé après l'étude hydrogéologique de l'oued Kebir Ouest est de 450 l/s, en incluant la zone des dunes de Guerbès.

Au-delà des réalisations recensées en 1991-1992, le programme de creusement de forges s'est poursuivi ; ainsi sept forages sont réalisés au profit de la zone Ouest de Annaba au lieu de six déjà pris en compte dans le bilan présenté (1991-1992) (un huitième improductif a été abandonné). (Mouassa S., 2017).

Sur le plan de la qualité de ces eaux, les analyses anciennes et récentes montrent que toutes les eaux sont complètement en dehors des normes acceptables pour l'irrigation (d'après la classification de Riverside), leur salinité est trop élevée (conductivité souvent mesurée entre 1 à 5 mm ho/cm pour une limite à 0.75).

Les eaux souterraines ne peuvent donc pas être envisagées pour l'irrigation dans le projet de Zit El Emba tant du fait de leur utilisation déjà engagée par les communautés urbaines que de leur mauvaise qualité. (ONID, 2020).

5. Évolution interannuelle des volumes d'eau au profit de l'irrigation du périmètre irrigué de Zit El Emba (2007 -2016)

Le volume théorique d'eau alloué au périmètre Zit El Emba a été revu à la hausse (6 hm^3) depuis 2014, après avoir été fixé initialement à 5 hm^3 (Fig. 81).

Au cours de la période d'étude (2007-2010), les volumes annuels prélevés en tête du réseau de distribution (MTR) correspondent aux volumes des lâchers d'eau par le barrage. Ceci est illustré par le chevauchement des deux courbes représentatives du volume des lâchers d'eau avec le volume mis en tête de réseau (MTR). Les deux courbes représentatives dans la figure 4 prennent une tendance évolutive de $2,5 \text{ hm}^3$ en 2006 à $6,33 \text{ hm}^3$ en 2016 dépassant le volume théorique alloué pour cette année (année sèche). Le volume d'eau distribué dans le périmètre est passé de $2,38 \text{ hm}^3$ lors de sa mise en service à $6,32 \text{ hm}^3$ en 2016. (Nini F., & Mebarki A., 2020).

En valeur moyenne interannuelle (2006-2016), le volume des lâchers d'eau est de $4,27 \text{ hm}^3$, soit le même volume mis en tête des réseaux (MTR) (zéro pertes d'adduction) et enfin, le volume moyen distribué en tête de parcelles (bornes d'irrigation) se réduit à $3,99 \text{ hm}^3$.

Les pertes totales du réseau dans le périmètre de Zit El Emba d'environ $0,279 \text{ hm}^3$ sont liées à 100 % aux pertes des réseaux de distribution (les pertes d'adduction sont faibles). (Nini F., 2021).

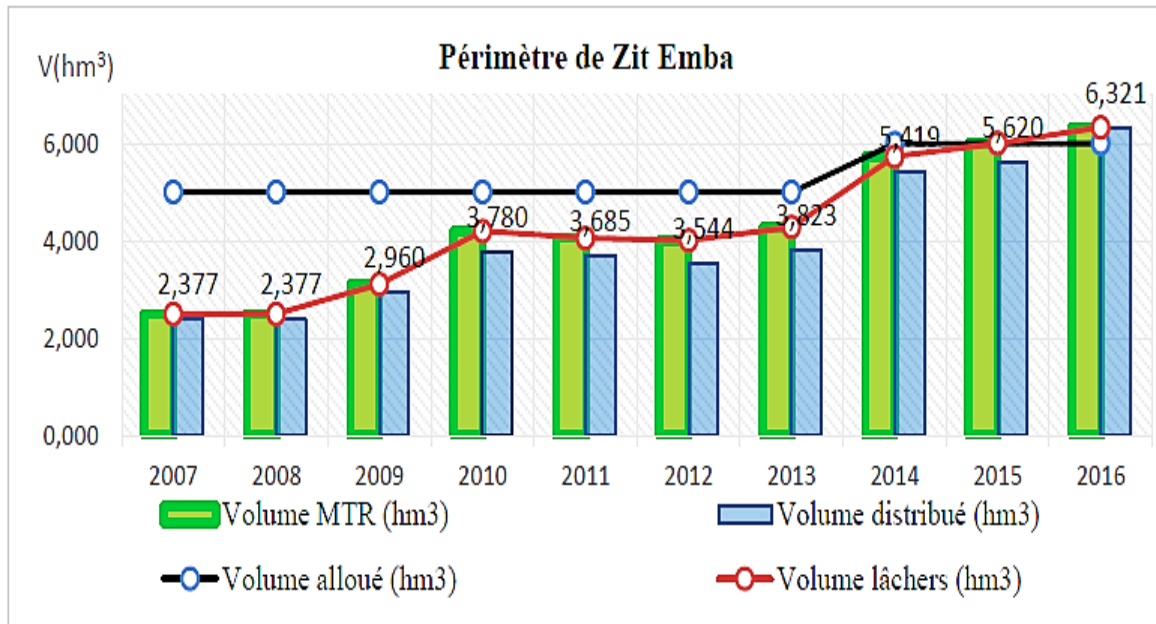


Figure III.9. Évolution interannuelle des volumes d'eau au profit du périmètre de Zit El Emba (période : 2007 -2016). (Nini F., 2017).

Conclusion

L'analyse des caractéristiques hydro-climatiques du bassin versant de l'oued Kébir Ouest, et plus spécifiquement du périmètre irrigué de Zit El Emba, met en évidence une forte variabilité saisonnière des précipitations et des températures, typique du climat méditerranéen. Cette variabilité engendre un déséquilibre entre l'offre et la demande en eau, notamment durant la saison estivale, marquée par un déficit hydrique important. Le réseau hydrographique dense, bien que favorable à la mobilisation de la ressource, reste tributaire d'une gestion rationnelle et efficace de l'eau disponible, en particulier celle stockée au niveau du barrage de Zit El Emba.

Dans ce contexte, l'intégration des technologies de l'Internet des Objets (IoT) représente une opportunité stratégique pour améliorer la gestion de l'irrigation. En permettant un suivi en temps réel de paramètres tels que l'humidité du sol, les conditions climatiques locales ou encore le débit d'irrigation, les solutions IoT favorisent une irrigation de précision, adaptée aux besoins réels des cultures. Elles permettent également d'anticiper les pénuries, de limiter les pertes et d'optimiser la consommation d'eau dans un périmètre où chaque goutte compte.

L'approche intelligente et connectée qu'offrent les dispositifs IoT constitue ainsi un levier essentiel pour relever les défis liés à la rareté de la ressource, tout en assurant une gestion durable et productive de l'eau dans le périmètre irrigué de Zit El Emba.

Chapitre IV :

*Intégration de l'IIoT pour l'optimisation
de l'irrigation à Zit El Emba*

Introduction

Face aux enjeux croissants liés à la rareté de l'eau et aux exigences d'une agriculture plus durable, la modernisation des systèmes d'irrigation est devenue une priorité stratégique, notamment dans les zones à forte vocation agricole comme le périmètre irrigué de Zit El Emba. Ce périmètre, situé dans la wilaya de Skikda, représente un espace agricole vital qui nécessite une gestion rationnelle et efficiente de la ressource hydrique pour assurer la pérennité des cultures et optimiser les rendements. (Abdi M S. & Boumakel O D., 2020).

Dans ce contexte, l'intégration des technologies émergentes, notamment l'Internet des Objets (IoT), ouvre de nouvelles perspectives pour améliorer la gestion de l'eau d'irrigation. En permettant une collecte en temps réel des données agro-climatiques, hydriques et techniques, l'IoT facilite une prise de décision plus réactive, précise et économique. L'automatisation de l'irrigation, le suivi de l'humidité des sols, la détection des fuites ou encore l'ajustement des apports hydriques en fonction des besoins réels des cultures sont autant d'applications concrètes qui rendent cette technologie particulièrement adaptée aux besoins du périmètre de Zit El Emba.

Ce chapitre examine donc les potentialités offertes par l'Internet des Objets dans l'optimisation de la gestion de l'eau à Zit El Emba. Il s'agit d'identifier les équipements nécessaires, les conditions d'implémentation, ainsi que les bénéfices attendus pour une gestion plus intelligente, économe et durable des ressources en eau.

1. Analyse des données climatiques et leur apport à l'intégration de l'IoT dans la gestion de l'irrigation

L'intégration de l'Internet des Objets (IoT) dans la gestion de l'irrigation repose sur une connaissance fine des paramètres climatiques locaux. Ces données permettent d'adapter les apports en eau aux besoins réels des cultures en fonction des conditions environnementales. Cette section vise à analyser les principales variables climatiques de la région de Zit El Emba afin de mettre en évidence leur utilité dans le déploiement de solutions d'irrigation intelligentes.

Le tableau climatique présenté fournit une synthèse des principales caractéristiques météorologiques moyennes mensuelles de la région du périmètre irrigué de Zit El Emba, situé à proximité de Skikda, dans le nord-est de l'Algérie. Les variables recensées incluent la température minimale (T. Min), la température maximale (T. Max), l'humidité relative, la vitesse du vent, la durée d'ensoleillement, le rayonnement solaire global (radiation) ainsi que l'évapotranspiration potentielle (ET₀), paramètre fondamental pour l'évaluation des besoins hydriques des cultures.

1.1. Analyse climatique de la région

L'étude du climat constitue une étape essentielle pour évaluer les besoins hydriques des cultures et adapter les stratégies d'irrigation. Dans le contexte du périmètre irrigué de Zit El Emba, une bonne connaissance des paramètres climatiques permet de mieux comprendre les dynamiques saisonnières influençant la disponibilité et la demande en eau. Cette section présente les principales caractéristiques climatiques de la région à travers l'analyse de données telles que la température, l'humidité, le vent, l'ensoleillement, le rayonnement solaire et l'évapotranspiration potentielle.

- **Températures** : Les données indiquent une variabilité saisonnière typique du climat méditerranéen. Les températures les plus basses sont observées en hiver (janvier-février), avec des minimales avoisinant 8,5 à 9 °C et des maximales autour de 16 à 17 °C. À l'inverse, les mois de juillet et août enregistrent les températures les plus élevées, atteignant des maximales de 28 à 30 °C et des minimales supérieures à 22°C.
- **Humidité relative** : L'humidité reste globalement élevée tout au long de l'année, avec une moyenne annuelle proche de 70 %. Une légère hausse est enregistrée durant l'automne et l'hiver, notamment en novembre (75 %), en lien avec des précipitations plus fréquentes.
- **Vitesse du vent** : La vitesse moyenne annuelle du vent est modérée (environ 3,03 m/s), avec des pics durant les mois de décembre et janvier (jusqu'à 3,8 m/s), et des valeurs plus faibles durant la période estivale.
- **Ensoleillement et rayonnement solaire** : Le cycle annuel de l'ensoleillement est marqué par une forte intensité durant l'été, atteignant un pic en juillet (9,64 heures/jour), alors que l'hiver présente des durées d'ensoleillement réduites (autour de 6 heures). Le rayonnement solaire suit une tendance parallèle, avec des maxima en juin et juillet (~24 MJ/m²/j) et des minima en décembre et janvier (~ 8,7 MJ/m²/j).
- **Évapotranspiration potentielle (ET₀)** : Étroitement liée à la température, à l'ensoleillement et à la vitesse du vent, l'ET₀ atteint un maximum durant l'été (155,8 mm/mois en juillet) et un minimum durant l'hiver (environ 58-60 mm/mois). La moyenne annuelle s'établit à 100,3 mm/mois.

Tableau IV.1. Caractéristiques climatiques dans la région d'étude.

Pays : Algérie. Station de Skikda Altitude : 2 m. Latitude : 36.50° N. Longitude : 6.54° E							
Mois	T. Min (°C)	T. Max (°C)	Humidité (%)	Vent (m/s)	Ensoleillement (h)	Radiation (MJ/m ² /j)	ET ₀ (mm/mois)
Jan	9.0	16.78	67	3.6	6.13	9.8	58.78
Fév.	8.5	16.2	68	3.6	7.18	13.1	63.08
Mars	10.8	18.92	66	3.1	7.42	16.4	84.35
Avr.	12.4	20.4	66	3.1	8.43	20.4	103.7
Mai	15.8	23.0	69	2.5	8.48	22.1	121.8
Juin	19.5	26.8	73	2.5	9.47	24.0	134.6
Juillet	22.0	28.34	71	2.6	9.64	23.9	155.8
Août	23.0	30.0	72	2.5	9.35	22.2	148.4
Sep	20.4	27.5	74	2.7	8.33	18.4	105.5
Oct.	17.3	25.6	72	2.8	7.39	14.1	98.44
Nov.	13.0	20.6	75	3.5	6.06	10.2	68.68
Déc.	10.2	17.8	67	3.8	5.68	8.7	60.58
Moyenne	15.25	22.66	70	3.03	7.8	17.6	100.3

(Abdeladim Y., 2021)

1.2. Détermination de la pluie efficace

La pluie efficace correspond à la différence entre les précipitations totales et l'évapotranspiration réelle de la culture. L'eau des précipitations efficaces est répartie, au niveau du sol, en deux fractions : l'écoulement superficiel et l'infiltration.

Il existe plusieurs méthodes pour calculer P_{eff} ici on va utiliser celle de pourcentage fixe (80%) :

Pluies efficaces (en mm/mois) = 80% × Pluies moyennes mensuelles (80%) (mm/mois)

Tableau III.2. Calcul des pluies efficaces pour chaque mois.

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Total
P (mm)	48	49,8	104,4	116	134,4	77,4	45,3	56	34,5	8,1	6,6	8	688,5
P eff (mm)	38,4	39,84	83,52	92,8	107,52	61,92	36,24	44,8	27,6	6,48	5,28	6,4	550,8

(Abdeladim Y., 2021)

Le tableau présente les précipitations totales mensuelles (P en mm) ainsi que les pluies efficaces correspondantes, calculées pour chaque mois de l'année. Les pluies efficaces représentent la partie utile des précipitations, c'est-à-dire la quantité d'eau réellement disponible pour les cultures après soustraction des pertes par ruissellement, évaporation ou infiltration profonde. Ce paramètre est essentiel pour évaluer la contribution naturelle de la pluie à l'irrigation.

Sur l'ensemble de l'année, les précipitations totales atteignent 688,5 mm, tandis que les pluies efficaces cumulées sont de 550,8 mm, soit environ 80 % des précipitations annuelles. Ce taux d'efficacité est relativement élevé, indiquant une bonne valorisation des précipitations dans le périmètre étudié.

a. Répartition saisonnière

L'analyse mensuelle montre une nette répartition saisonnière :

- *Période automne-hiver (octobre à mars)* : C'est durant cette période que se concentrent les précipitations les plus abondantes et les plus efficaces. Par exemple :
 - Novembre : 104,4 mm de pluie dont 83,52 mm efficaces.
 - Décembre : 116 mm, dont 92,8 mm efficaces.
 - Janvier : 134,4 mm, avec une pluie efficace de 107,52 mm — la plus importante de l'année.

Cette période est donc cruciale pour la recharge hydrique des sols, des nappes et pour limiter les besoins d'irrigation des cultures en place ou en préparation.

- *Période printemps-été (avril à août)* : Les précipitations diminuent fortement, avec des valeurs faibles voire très faibles : Juin, juillet, août enregistrent respectivement 8,1 mm, 6,6 mm et 8 mm, avec des pluies efficaces inférieures à 6,5 mm.

Cette faiblesse des pluies en été rend l'irrigation indispensable pour couvrir les besoins hydriques des cultures estivales (tomate, melon, courgette, etc.).

b. Bilan hydrique et implications

La distribution des pluies efficaces confirme une saisonnalité méditerranéenne typique, caractérisée par des précipitations concentrées en automne et en hiver, et une sécheresse estivale marquée. Cela a des implications importantes pour la gestion de l'irrigation :

Il est possible de profiter des excédents hivernaux pour recharger les retenues et les sols.

En revanche, l'irrigation reste incontournable en été, notamment pour les cultures maraîchères ou fruitières exigeantes en eau.

La planification de l'irrigation doit donc tenir compte de cette variabilité saisonnière afin d'optimiser l'usage des ressources disponibles.

1.3. Apports des données climatiques à la mise en œuvre de solutions IoT pour l'irrigation

Ces paramètres climatiques sont essentiels pour l'élaboration de systèmes d'irrigation intelligents reposant sur l'Internet des Objets (IoT). Leur exploitation permet d'améliorer significativement la précision, la réactivité et l'efficacité de la gestion de l'eau dans le périmètre irrigué. Voici les principales applications envisagées :

- **Estimation fine des besoins en eau** : En combinant les données mensuelles d' ET_0 aux coefficients culturaux propres aux espèces cultivées, les besoins en eau peuvent être estimés avec une grande précision. Un système IoT peut alors ajuster automatiquement les apports hydriques à chaque stade phénologique des cultures.
- **Planification saisonnière** : L'analyse des tendances climatiques permet d'anticiper les périodes de forte demande hydrique (été) et celles de moindres besoins (hiver). Ces informations facilitent la programmation des cycles d'irrigation et la gestion stratégique des ressources.
- **Optimisation dynamique de l'irrigation** : En intégrant en temps réel les mesures issues de capteurs (humidité du sol, température, hygrométrie, etc.) aux données historiques, il devient possible de déclencher l'irrigation en fonction de seuils optimisés. Cela permet d'éviter à la fois le stress hydrique et le gaspillage.
- **Prévention du stress hydrique** : L'identification des mois à forte ET_0 permet de renforcer la surveillance et les apports en eau pendant les périodes critiques, assurant une meilleure résilience des cultures face aux aléas climatiques.
- **Modélisation prédictive** : À partir des tendances historiques, des algorithmes intégrés aux plateformes IoT peuvent simuler les besoins futurs en eau et anticiper les décisions à moyen et long terme, en lien avec les scénarios de changement climatique.
- **Automatisation intelligente** : L'ensemble de ces paramètres peut alimenter un système totalement automatisé capable de déterminer quand, où et combien irriguer, en tenant compte de l'évolution du climat, de l'état du sol et des exigences des cultures.
- **Suivi et évaluation des performances** : En croisant les apports en eau mesurés avec les besoins théoriques calculés (basés sur ET_0), il devient possible d'évaluer l'efficacité de l'irrigation, d'identifier les zones déficitaires ou excédentaires, et de proposer des ajustements ciblés.

Les données climatiques présentées ne se limitent pas à une simple description des conditions météorologiques locales : elles constituent un fondement indispensable à l'élaboration de stratégies d'irrigation intelligentes et durables. En les combinant avec les technologies IoT, il devient possible de piloter avec précision et réactivité la gestion de l'eau au sein du périmètre irrigué de Zit El Emba, en favorisant une agriculture performante, résiliente et économe en ressources.

2. Cycle végétatif des cultures

La connaissance du cycle végétatif des cultures constitue une base essentielle pour une gestion agricole efficace, en particulier dans un contexte de modernisation des pratiques grâce aux technologies connectées. Identifier les périodes de croissance active, de floraison, de fructification et de récolte permet de planifier les interventions culturales et d'optimiser l'irrigation en fonction des besoins réels des plantes. Dans le périmètre irrigué de Zit El Emba, plusieurs cultures sont pratiquées selon un calendrier précis, adapté aux conditions agro-climatiques locales.

Le tableau suivant fournit une représentation chronologique des périodes de croissance et de développement de diverses espèces cultivées dans le périmètre de Zit El Emba, sur une année agricole allant de septembre à août :

- **Blé (Blé)** : Semé en automne (novembre), le blé se développe durant l'hiver et le printemps, pour être récolté en fin de printemps ou début d'été (juin-juillet).
- **Luzerne** : Culture pérenne par excellence, la luzerne connaît une longue période de croissance continue s'étendant de septembre à août, autorisant plusieurs coupes au cours de l'année.
- **Pomme de terre** : Elle peut être cultivée deux fois par an. Une première culture est implantée à la fin de l'hiver (février-mars) et récoltée en été (juin-juillet). Une seconde période est envisageable plus tard dans l'année, bien que non clairement délimitée dans le tableau.
- **Tomate** : Plantée au printemps (mars-avril), la tomate se développe durant les mois chauds, avec une récolte s'étalant jusqu'en août.
- **Chou** : Cette culture est installée à la fin de l'hiver (février-mars) et son cycle s'étend jusqu'à l'été (juillet-août), similaire à celui de la tomate.

- **Courgette** : Semée au printemps (avril-mai), la courgette entre en production dès juin, avec une première récolte estivale et une possible seconde période de culture en fin d'été (août-septembre).
- **Melon** : C'est une culture estivale par excellence. Le semis a lieu au printemps (mars-avril), suivi d'une récolte en juillet-août.
- **Oignon vert** : Ce légume peut être semé en automne (septembre-octobre) avec une récolte en début d'hiver (décembre), et une deuxième période de culture peut être envisagée au printemps (mai-juin).
- **Oliviers** : Les oliviers, arbres à cycle pérenne, ont une activité végétative continue allant de septembre à août. Cette période inclut la floraison, la croissance des fruits et leur maturation.

Ces informations constituent un outil stratégique pour la planification des activités agricoles. Il permet de :

- Visualiser les périodes optimales de semis et de récolte ;
- Organiser les rotations et successions culturales en évitant les conflits saisonniers;
- Synchroniser l'apport en eau avec les besoins réels des cultures, notamment grâce aux données climatiques analysées précédemment ;
- Favoriser l'intégration de solutions IoT pour adapter l'irrigation aux différents stades phénologiques.

Tableau IV.3. Cycle végétatif des cultures.

Cultures	sep	oct	nov	dec	jan	fev	mars	avril	mai	Juin	juill.	aout		
Blé		←										→		
Orge		←										→		
luzerne	←	→												
Pomme de terre		←				→								
Tomate							←				→			
choux	←	→												
courgette	←											→		
fraise		←										→		
melon	←											→		
Oignon vert		←				→								
Oliviers	←	→												
cerisier	←	→												

(Abdeladim Y., 2021)

La visualisation de ces cycles permet d'organiser judicieusement les semis, les récoltes, et les rotations culturales. Elle est également indispensable pour adapter les apports hydriques aux exigences spécifiques de chaque culture, à chaque stade de son développement. Cette approche constitue un préalable essentiel à l'intégration de l'Internet des Objets (IoT) dans la gestion de l'irrigation, en assurant un pilotage précis et économe en ressources.

3. Estimation des volumes d'eau d'irrigation

La détermination des besoins en eau d'une culture nécessite une bonne connaissance des plantes et aussi les données climatique et pédologique de la région pour pouvoir estimer la réserve en eau utile du sol 'RU' et la réserve facilement utilisable par la plante 'RFU'.

L'estimation des volumes d'eau d'irrigation permet de prévoir les volumes d'eau stockés dans la retenue et d'effectuer un meilleur calendrier d'arrosage.

*Le volume des besoins en eau = le besoin de la culture(m³) * la surface de la culture.*

Le tableau présente une analyse détaillée des besoins en eau pour les différentes cultures au sein du périmètre irrigué. Il distingue le besoin net, qui représente la quantité d'eau théoriquement nécessaire à la croissance des plantes, de la surface cultivée pour chaque espèce. En tenant compte des pertes potentielles liées à l'irrigation, le tableau fournit également le besoin brut par hectare et le besoin brut total en mètres cubes pour chaque culture.

L'analyse révèle une variabilité significative des besoins en eau entre les cultures. La luzerne et l'olivier se distinguent par leurs besoins bruts totaux les plus élevés, avec respectivement 69 728 m³ et 90 752 m³. Ces chiffres importants peuvent s'expliquer par un cycle végétatif potentiellement plus long pour la luzerne et des besoins spécifiques des arbres fruitiers comme l'olivier, qui peuvent varier selon leur âge et leur stade de développement. Le melon et la courgette présentent également des besoins bruts totaux substantiels, avoisinant les 46 237 m³ chacun, en raison de leurs besoins nets élevés.

À l'opposé, l'oignon vert affiche le besoin brut total le plus faible, avec seulement 2 208 m³, ce qui reflète son faible besoin net en eau. Des cultures comme le blé et l'orge, bien que cultivées sur des surfaces importantes (30 hectares chacune), ont des besoins bruts totaux intermédiaires, respectivement de 42 908 m³ et 39 848 m³. La pomme de terre et la fraise, cultivées sur des surfaces plus petites, présentent des besoins bruts totaux similaires et relativement modestes, autour de 6 614 m³.

En considérant l'ensemble du périmètre irrigué, qui s'étend sur une superficie totale de 200 hectares, le besoin brut total en eau pour toutes les cultures s'élève à 424 720 m³. Cela représente

le volume d'eau estimé nécessaire pour assurer une irrigation adéquate, en tenant compte des pertes inhérentes au processus. Le besoin brut moyen par hectare pour l'ensemble du périmètre est d'environ 2123,6 m³/ha.

Le volume des besoins en eau pour notre périmètre est présenté dans le tableau suivant :

Tableau IV.4. Volume des besoins en eau pour notre périmètre

Cultures	Besoins net (mm)	Surface (ha)	Besoins bruts (m³/ha)	Besoins bruts (m³)
Blé	107,27	30	1430,27	42908
Orge	99,62	30	1328,27	39848
Luzerne	261,48	20	3486,40	69728
p. Terre	49,61	10	661,47	6614,67
Fraise	49,61	10	661,47	6614,67
Oignon V	16,56	10	220,80	2208
Tomate	201,01	10	2680,13	26801,33
Melon	346,78	10	4623,73	46237,33
Choux	36,25	10	483,33	4833,33
Courgette	346,78	10	4623,73	46237,33
Olivier	453,76	15	6050,13	90752
Ceriser	314,53	10	4193,73	41937,33
Total	2283,26	200	30443,47	424720

(Abdeladim Y., 2021)

Ce tableau est un outil essentiel pour la gestion de l'eau au sein du périmètre irrigué. Il met en évidence les cultures les plus gourmandes en eau et permet d'estimer le volume total nécessaire à l'irrigation. Ces informations sont fondamentales pour la planification de la distribution de l'eau, l'optimisation des pratiques d'irrigation et la prise de décisions éclairées en matière de gestion des ressources hydriques, en tenant compte des spécificités de chaque culture et de la superficie qui lui est allouée. Il est crucial de considérer que ces chiffres sont des estimations et que les besoins réels peuvent être influencés par divers facteurs environnementaux et agronomiques.

4. Système d'Irrigation Intelligent pour la Culture de Tomates

L'irrigation représente un élément essentiel dans la culture des tomates, car elle influe directement sur le rendement et la qualité des productions. Le recours aux technologies intelligentes, telles que les capteurs d'humidité et les systèmes basés sur l'Internet des Objets (IoT), permet d'optimiser les apports en eau tout en favorisant une gestion durable de cette ressource. Ce chapitre présente un système d'irrigation intelligent basé sur le microcontrôleur ESP32. Il intègre des capteurs d'humidité du sol et de l'air, ainsi qu'une interface utilisateur développée à l'aide de la plateforme Remote XY. (Abdi, M. S., & Boumakel, O. D., 2020).

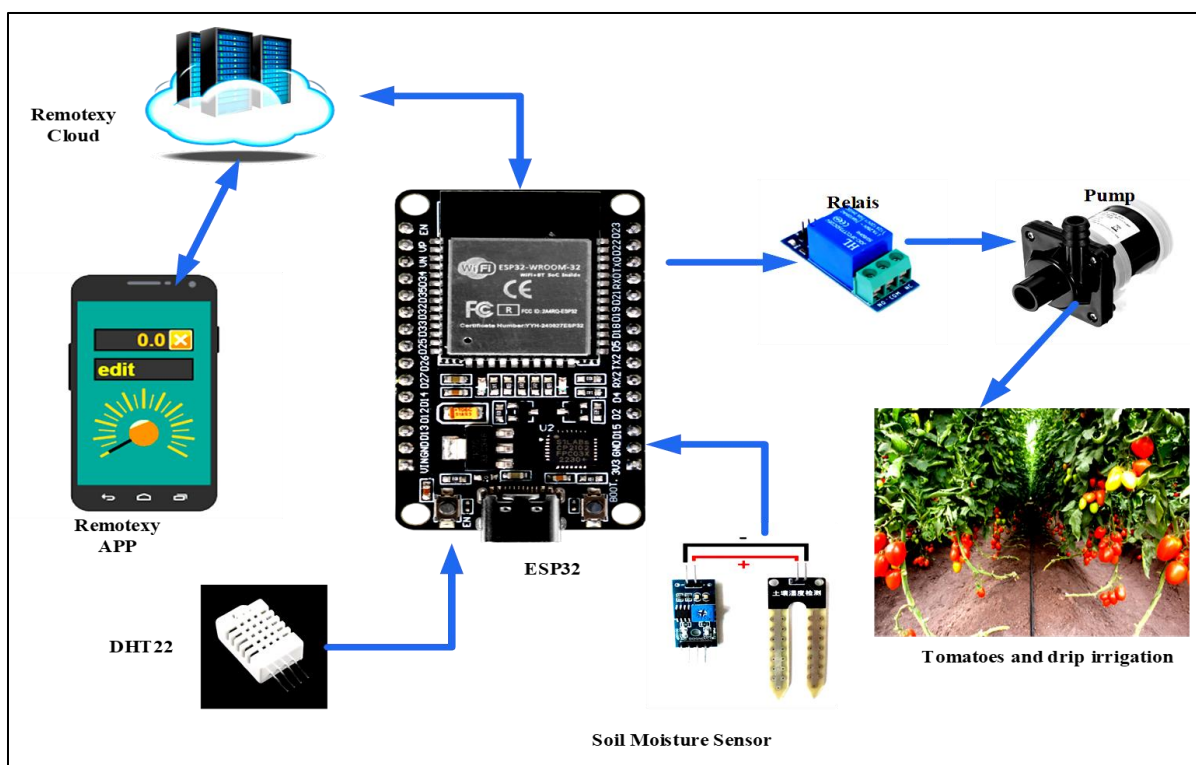


Figure IV.1. Schéma de block de system étudié.

4.1. Objectifs du Système

4.1.1. Optimisation de l'irrigation

Le premier objectif du système est d'ajuster précisément l'irrigation selon les besoins hydriques des plants de tomates. Cette régulation vise à éviter aussi bien le stress hydrique que l'arrosage excessif, afin d'assurer un développement optimal des cultures. (Lahlouh M., & Azizou A., 2018).

4.1.2. Automatisation

Le système vise également à automatiser le processus d'irrigation. Cette automatisation permet de limiter les interventions manuelles tout en offrant une gestion plus efficace, notamment à distance. (Abdi, M. S., & Boumakel, O. D., 2020).

4.1.3. Surveillance et contrôle

Enfin, le système prévoit la mise en place d'une interface graphique conviviale permettant à l'utilisateur de surveiller les conditions environnementales en temps réel et de contrôler les paramètres d'irrigation à distance.

4.2. Composants du Système

4.2.1. ESP32

L'ESP32 constitue le cœur du système. Ce microcontrôleur performant dispose de fonctionnalités Wi-Fi et Bluetooth intégrées, ce qui le rend parfaitement adapté aux applications IoT. Il assure la collecte et le traitement des données transmises par les capteurs, tout en gérant la communication avec l'interface utilisateur.

Sur le plan technique, l'ESP32 est équipé d'un processeur double cœur cadencé à 240 MHz, d'une mémoire SRAM de 520 Ko, et prend en charge les protocoles de connectivité Wi-Fi 802.11 b/g/n ainsi que Bluetooth 4.2. (Fig. IV.2).

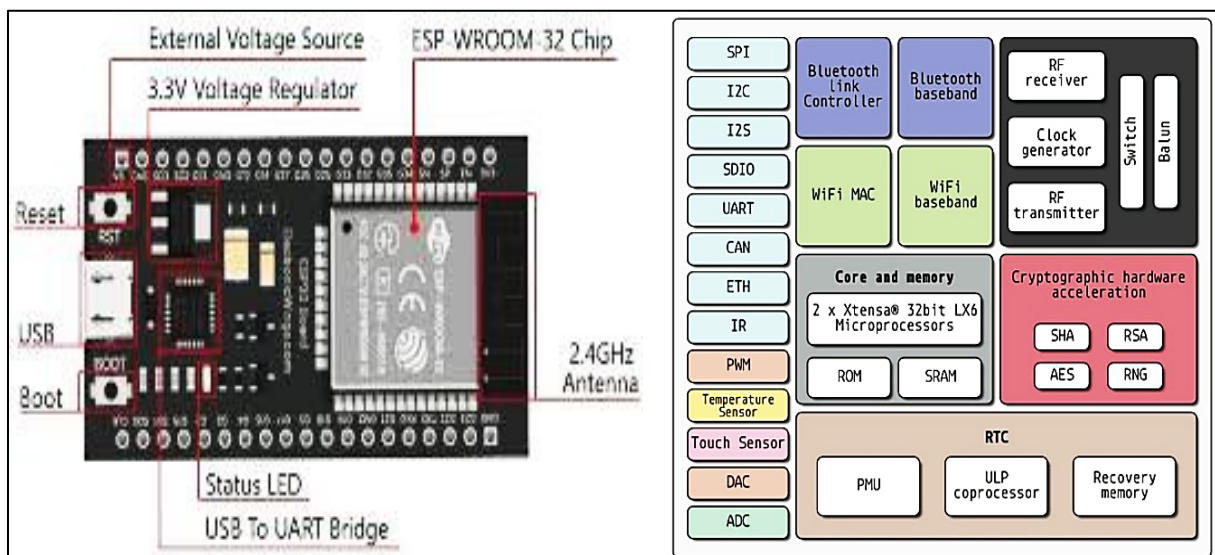


Figure IV.2. Schéma du Carte ESP32.

4.2.2. Capteur d'humidité du sol

Ce capteur a pour fonction de mesurer la teneur en eau présente dans le sol. Les données relevées sont transmises au microcontrôleur, qui déclenche l'irrigation lorsque l'humidité descend en dessous d'un seuil critique. (Fig IV.3).



Figure IV.3. Capteurs d'humidité du sol.

Il existe principalement deux types de capteurs utilisés dans ce système :

- *Capteurs résistifs* : Mesurent la résistance électrique du sol, qui varie selon sa teneur en eau.
- *Capteurs capacitifs*: détectent les variations de capacité électrique en fonction de l'humidité du sol, offrant ainsi une mesure plus précise et plus stable.

4.2.3. Capteur DHT22

Le capteur DHT22 permet de mesurer deux paramètres environnementaux clés : la température ambiante et l'humidité relative de l'air. Ces données sont essentielles pour ajuster l'arrosage en fonction des conditions climatiques réelles. (Fig. IV.4).

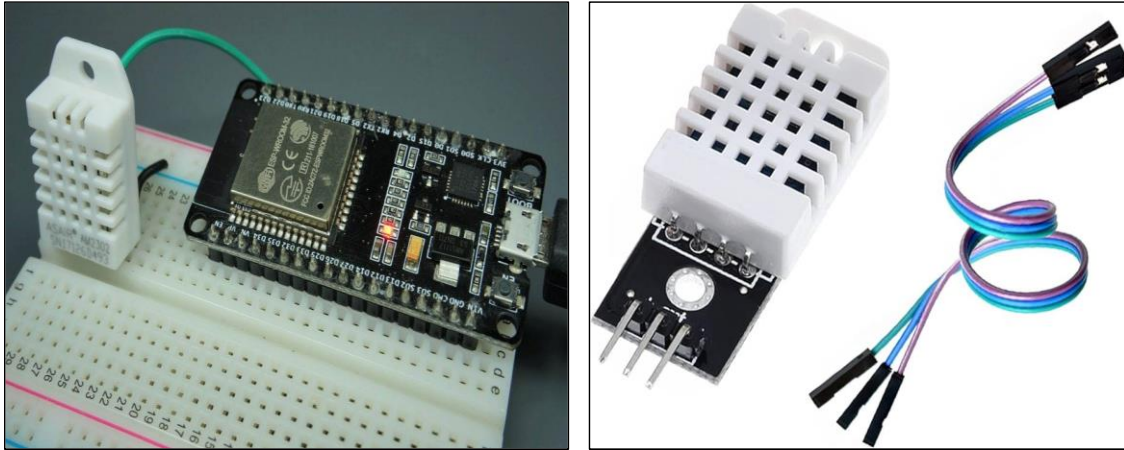


Figure IV.4. Capteur de température DHT22 et capteur d'humidité de l'air.

Ce capteur est capable de mesurer des températures comprises entre - 40 et 80 °C et une humidité relative allant de 0 à 100 %. Sa précision est de $\pm 0,5$ °C pour la température et de ± 2 à 5 % pour l'humidité.

4.2.4. Relais

Le relais joue un rôle central dans l'activation du dispositif d'irrigation. Il sert d'interrupteur électronique permettant de commander l'ouverture ou la fermeture de la vanne d'irrigation. Cette commande est déclenchée automatiquement par le microcontrôleur en fonction des données environnementales. (Fig.IV.5).

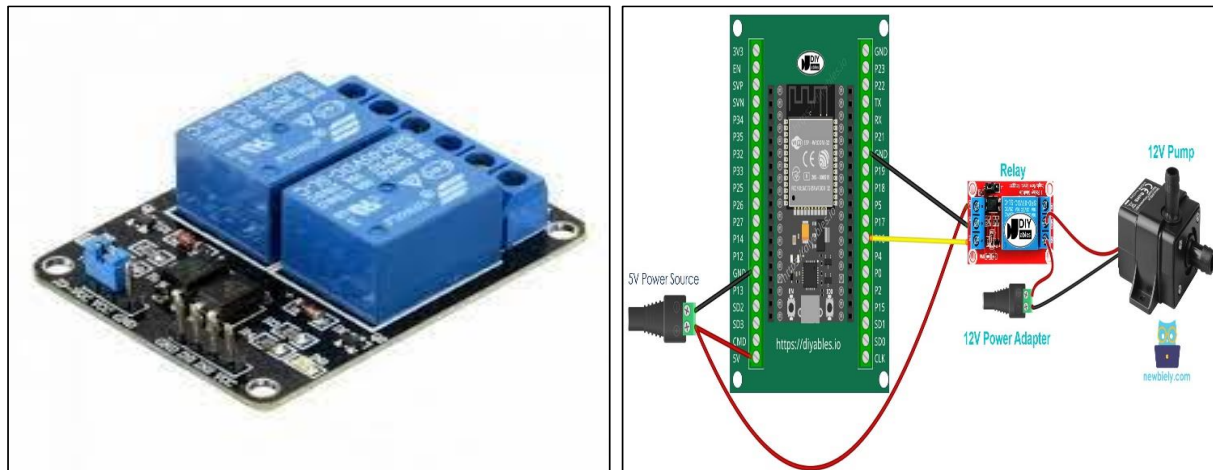


Figure IV.5. Relais.

4.2.5. Vanne d'irrigation

La vanne d'irrigation permet de réguler le flux d'eau vers les plants de tomates. Elle peut être de type électromécanique ou électrovanne, selon les spécificités du système. Elle s'ouvre ou se ferme en fonction des signaux émis par le relais, garantissant un apport en eau ajusté aux besoins de la culture. (Fig. IV.6.).



Figure IV.6. Vanne d'irrigation.

3. Fonctionnement de prototype réalisé

Cette partie décrit le mode de fonctionnement du système d'irrigation intelligent développé, en mettant l'accent sur l'installation physique des composants, la gestion des données de capteurs, la logique de prise de décision automatisée et l'interface de contrôle conçue avec RemoteXY.

3.1. Installation des Composants

L'installation du système commence par le positionnement judicieux des capteurs dans l'environnement de culture. Le capteur d'humidité du sol est enfoui à une profondeur comprise entre 15 et 30 centimètres, ce qui permet de capturer des données fiables sur la teneur en eau du sol dans la zone racinaire des plants de tomates. À proximité de ce dispositif, le capteur DHT22 est installé de manière à mesurer avec précision la température ambiante ainsi que l'humidité relative de l'air.

Une fois les capteurs correctement placés, l'ensemble des composants est relié au microcontrôleur ESP32 à l'aide d'un câblage soigné, conforme au schéma électrique du système. Cette étape est cruciale pour assurer la communication correcte entre les différents modules électroniques. (Salhi A., & Boukerker H., 2021).

3.2. Mesure de l'Humidité

Le système effectue des relevés réguliers afin de surveiller en permanence les conditions d'humidité du sol et de l'air. Le microcontrôleur procède à des lectures toutes les dix minutes, ce qui permet de détecter rapidement les écarts par rapport aux seuils d'humidité définis à l'avance.

Les seuils de référence sont fixés pour optimiser les apports en eau. Lorsque l'humidité du sol descend en dessous de 20 %, une intervention d'irrigation est jugée nécessaire. À l'inverse, lorsque l'humidité atteint ou dépasse 80 %, l'irrigation est automatiquement suspendue afin d'éviter toute surcharge en eau.

3.3. Prise de Décision

À chaque lecture, le microcontrôleur compare les valeurs relevées avec les seuils prédéfinis. On constate deux cas :

- **Humidité inférieure à 20 %** : Si l'humidité mesurée est inférieure au seuil minimal de 20 %, le système déclenche une séquence d'irrigation.
- **Humidité supérieure à 80 %** : lorsque le niveau d'humidité dépasse 80 %, le système interrompt l'arrosage.

Ce processus permet une gestion intelligente de l'eau, adaptée aux besoins réels des plantes.

3.4. Activation de l'irrigation

Lorsque l'irrigation est requise, le microcontrôleur transmet un signal au relais, qui active alors l'ouverture de la vanne d'irrigation. Pendant toute la durée de l'arrosage, le système continue de surveiller les conditions d'humidité du sol. Dès que le seuil supérieur est atteint, l'irrigation est automatiquement arrêtée. Ce mécanisme assure à la fois un arrosage efficace et une préservation des ressources hydriques.

4. Interface Graphique avec Remotexy

Afin d'offrir à l'utilisateur un outil de gestion interactif et pratique, une interface graphique a été conçue à l'aide de la plateforme RemoteXY. Cette interface permet de visualiser en temps réel les données environnementales tout en offrant des options de contrôle manuel.

4.1. Élaboration de l'Interface

L'interface graphique affiche clairement les informations relevées par le capteur DHT22, notamment la température ambiante et l'humidité relative de l'air. En plus de ces données, l'utilisateur peut contrôler manuellement la pompe d'irrigation à l'aide d'un interrupteur virtuel de type marche/arrêt. Des indicateurs visuels permettent de connaître à tout moment l'état de la pompe, qu'elle soit active ou inactive.

4.2. Fonctionnalités de l'Interface

L'un des atouts majeurs de cette interface réside dans la mise à jour en temps réel des données mesurées, assurant ainsi une réactivité optimale du système. Elle permet également d'activer manuellement l'irrigation, dans les cas où une intervention humaine serait jugée nécessaire. Enfin, le système est capable d'envoyer des notifications d'alerte lorsque les seuils d'humidité sont dépassés, afin de prévenir toute anomalie ou défaillance.

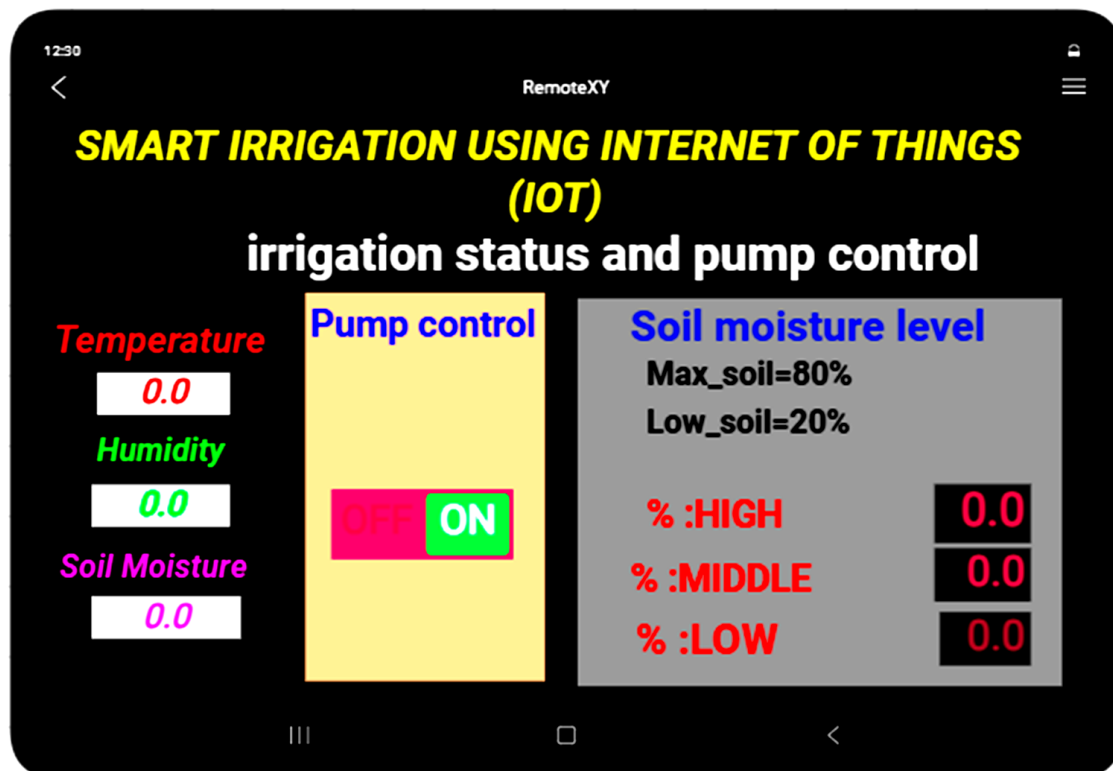


Figure IV.7. Interface Graphique avec Remotexy réalisé

5. Résultats du Système

Cette section présente les principaux résultats obtenus à partir de l'expérimentation du système d'irrigation intelligent basé sur la plateforme ESP32. Les données collectées ont permis d'évaluer les performances du dispositif, tant en termes de fiabilité des mesures que d'efficacité dans la gestion de l'eau.

5.1. Données Collectées

Les relevés effectués ont permis de dégager des moyennes représentatives des conditions environnementales. La température ambiante observée s'établit autour de 25 °C, tandis que l'humidité relative de l'air atteint en moyenne 60 %. Concernant l'humidité du sol, les niveaux

mesurés varient de manière significative, allant de 0 % à 90 % selon les conditions expérimentales. Ces variations témoignent de la capacité du système à s'adapter à différentes situations d'irrigation.

5.2. Efficacité de l'Irrigation

L'analyse des performances du système montre une réduction notable de la consommation en eau, estimée à environ 30 % par rapport aux méthodes d'irrigation traditionnelles. Cette économie est principalement due à l'automatisation du processus d'arrosage, déclenché uniquement lorsque cela est nécessaire. Par ailleurs, les cultures ont bénéficié de meilleures conditions de croissance, avec une amélioration visible de leur développement et une résistance accrue aux maladies.

5.3 Comparaison avec les Méthodes Traditionnelles

Par rapport aux pratiques classiques, le système intelligent s'est distingué par une gestion plus précise de l'irrigation. Il permet une réponse rapide et adaptée aux besoins réels des plantes, évitant ainsi les excès ou les manques d'eau. En outre, l'utilisation de l'interface graphique RemoteXY a considérablement simplifié le pilotage et la surveillance du système, rendant son utilisation accessible même à des utilisateurs peu expérimentés.

6. Partie expérimentale : étude de cas

Cette partie approfondit l'analyse des performances du système à travers trois scénarios expérimentaux distincts : le cas d'excès d'eau (A), le cas d'humidité moyenne (B) et le cas de déficit hydrique (C). Chaque situation a permis d'évaluer la réactivité du système, sa précision dans la prise de décision, ainsi que les effets sur les cultures. Les résultats sont illustrés par des figures représentatives, notamment l'interface graphique développée avec Remote XY (Figure IV.8), ainsi que les captures des situations expérimentales. (Figures IV.9 à IV.11).



Figure IV.8. Interface Graphique avec Remotexy réalisé.

6.1. Cas d'excès d'eau

Dans ce premier scénario, les capteurs ont relevé un taux d'humidité du sol supérieur à 80 %. Le système a réagi instantanément en désactivant la pompe d'irrigation afin d'éviter un arrosage excessif. Une notification d'alerte, indiquant un niveau d'humidité élevé (soil moisture level High=1), a été envoyée à l'utilisateur via l'interface RemoteXY. Cette réactivité a permis de prévenir les risques de saturation prolongée du sol, qui aurait pu causer des dommages aux racines. Grâce à une intervention rapide, notamment par l'optimisation du drainage, les cultures n'ont subi aucun impact négatif, et leur état sanitaire est resté satisfaisant.

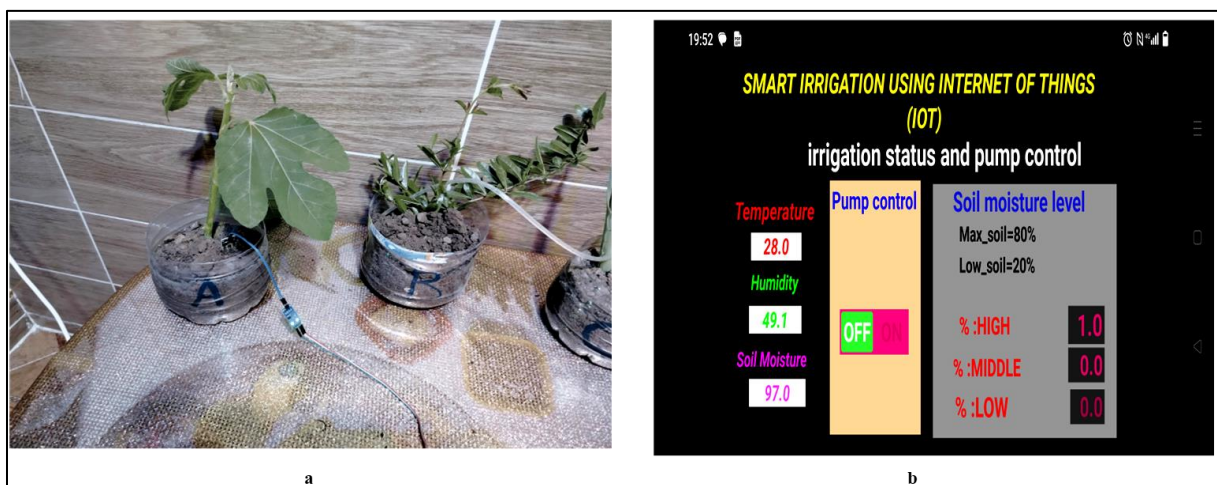


Figure IV.9. Résultat cas (A) excès d'eau; [(a) prototype , (b) application Remotexy].

6.2. Cas d'humidité moyenne

Le deuxième scénario s'est déroulé dans des conditions où l'humidité du sol variait entre 20 % et 80 %, intervalle considéré comme optimal. Le système a maintenu la pompe désactivée pendant toute cette période, confirmant ainsi l'adéquation de l'humidité avec les besoins des plantes. Une notification informative, mentionnant un niveau d'humidité moyen (soil moisture level Middle =1), a été envoyée à l'utilisateur. Cette situation a permis une gestion stable de l'eau, favorable à une croissance saine. De plus, la confiance offerte par la précision du système a permis à l'agriculteur de se consacrer à d'autres tâches sans craindre de déséquilibres hydriques.

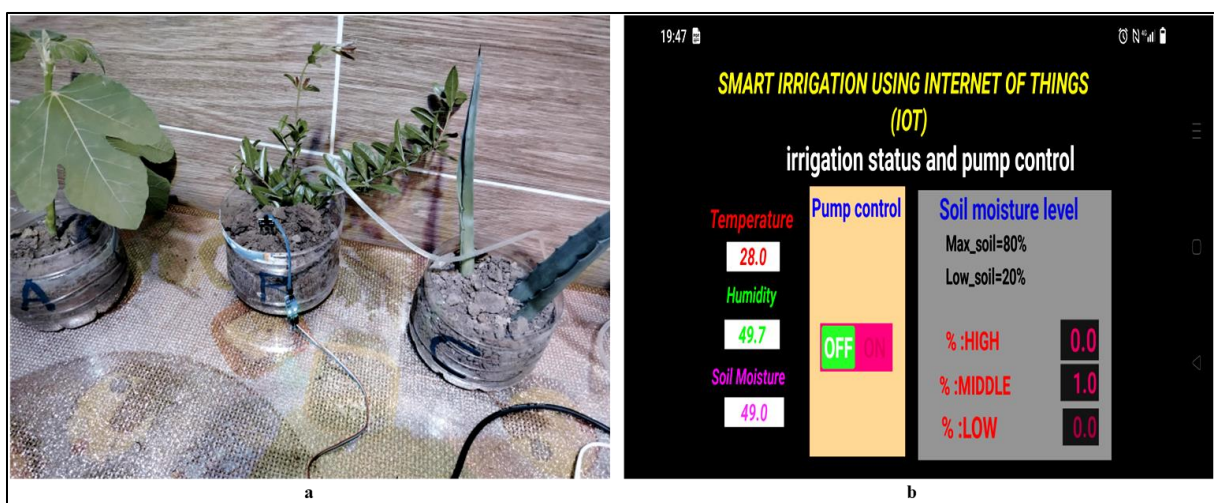


Figure IV.10. Résultat cas (B) *humidité moyenne* ; [(a) prototype , (b) application remotexy].

6.3. Cas de manque d'eau

Dans le dernier cas étudié, le niveau d'humidité du sol est tombé en dessous du seuil critique de 20 %. Le système a automatiquement déclenché l'activation de la pompe d'irrigation. L'utilisateur a été informé en temps réel par une alerte signalant un faible niveau d'humidité (soil moisture level Low=1). Cette réaction rapide a permis une réhydratation efficace du sol, évitant ainsi le stress hydrique des plantes. La surveillance continue via l'application a renforcé la gestion maîtrisée des apports en eau, avec un effet positif sur la préservation des cultures et la prévention des effets néfastes de la sécheresse.

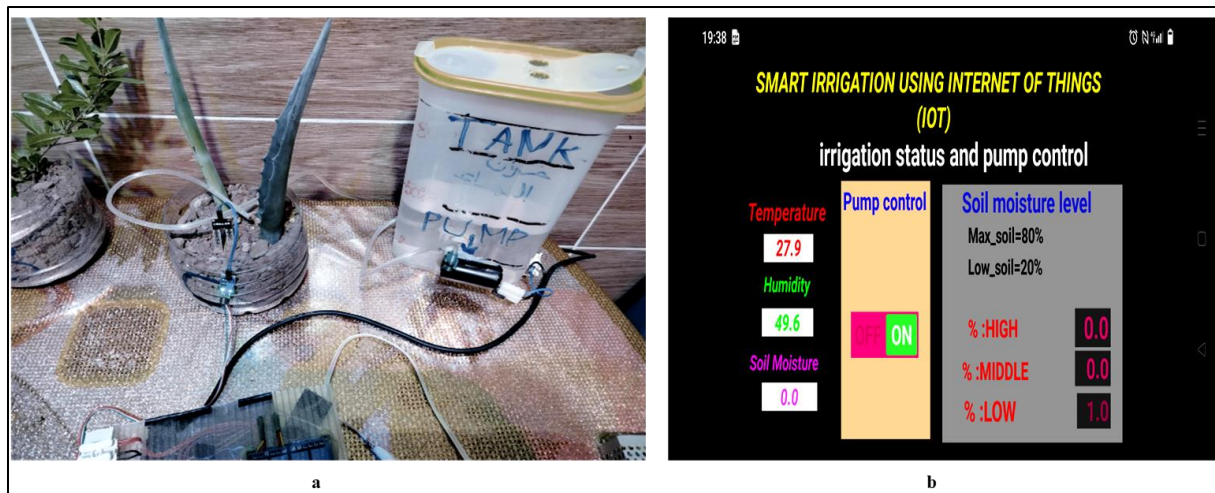


Figure IV.11. Résultat cas (C) *manque d'eau*; [(a) dans le prototype , (b) sur l'application remotexy]

Conclusion des cas d'étude

Les résultats obtenus à travers les différents scénarios expérimentaux confirment la fiabilité et l'efficacité du système d'irrigation intelligent basé sur l'ESP32, même en présence de conditions hydriques contrastées. En situation d'excès d'eau, le système a su détecter rapidement les niveaux critiques d'humidité, désactivant aussitôt l'irrigation et alertant l'utilisateur, ce qui a permis de préserver la santé racinaire des plantes. Dans le cas d'un taux d'humidité moyen, le dispositif a démontré sa capacité à maintenir un équilibre hydrique stable sans intervention humaine, garantissant ainsi un environnement optimal pour la croissance végétale. Enfin, en cas de déficit hydrique, le déclenchement automatique de l'irrigation a permis de restaurer efficacement les conditions nécessaires au bon développement des cultures.

La combinaison de capteurs précis, de seuils programmés et de l'interface de contrôle RemoteXY a permis une gestion proactive et en temps réel de l'irrigation. Les notifications instantanées et la visualisation des données environnementales ont grandement facilité la prise de décision, réduisant les interventions manuelles tout en assurant une économie d'eau significative.

Ces résultats soulignent le potentiel de cette approche pour renforcer la résilience de l'agriculture face aux défis climatiques, notamment dans les zones à ressources hydriques limitées. Par ailleurs, ils ouvrent des perspectives prometteuses pour le perfectionnement du système, notamment par l'intégration de modules d'intelligence artificielle, de prévisions météorologiques ou encore d'algorithmes d'apprentissage automatique, afin d'anticiper les besoins hydriques des cultures et de maximiser l'efficacité de l'irrigation.

Ce système constitue donc une solution technologique accessible, évolutive et adaptée aux exigences actuelles d'une agriculture durable et intelligente.

7. Vers une généralisation du système IoT à l'échelle du périmètre de Zit El Emba : cas de la tomate industrielle

L'expérimentation réussie de l'Internet des Objets (IoT) pour l'optimisation de l'irrigation dans sur notre prototype offre une opportunité stratégique pour envisager une extension graduelle de Ce système à l'ensemble du périmètre, ou du moins à ses zones les plus intensément cultivées. Une telle généralisation s'avère particulièrement pertinente pour des cultures à forte valeur économique et à besoins hydriques bien définis, telles que la tomate industrielle, qui occupe une place importante dans l'itinéraire technique des agriculteurs de la région. (Khellouf M. I., et Tebaa M. A., 2021).

7.1. Choix de la tomate industrielle comme culture cible

La tomate industrielle constitue un excellent cas d'usage pour la généralisation du système IoT. Elle est largement cultivée dans la région, requiert une gestion précise de l'eau selon ses stades phénologiques (levée, croissance végétative, floraison, nouaison, grossissement des fruits, maturation), et sa sensibilité au stress hydrique peut affecter directement le rendement et la qualité des récoltes. En outre, sa culture en plein champ sur des superficies moyennes à grandes est favorable à une gestion collective et centralisée de l'irrigation pilotée par les données. (Haniche M., & Tabrait M., 2021).

7.2. Stratégie de déploiement progressif du système IoT

La généralisation du système IoT peut être envisagée selon une approche modulaire et par étapes :

- **Phase 1 : Ciblage des zones prioritaires**

Sélection des secteurs les plus stratégiques du périmètre (en fonction de la concentration des producteurs de tomates industrielles, de l'accessibilité, de la qualité des infrastructures d'irrigation et du potentiel de rendement). Cette phase vise un déploiement partiel sur 10 à 20 % de la superficie cultivée en tomate.

- **Phase 2 : Installation des dispositifs IoT**

Installation d'un réseau de capteurs (humidité du sol, température, radiation solaire, pluviométrie locale, débit des bornes) interconnectés via des modules LoRa ou NB-IoT,

alimentés par panneaux solaires, avec des stations locales de traitement et une interface de supervision centrale.

- **Phase 3 : Intégration avec les pratiques agricoles locales**

Personnalisation des seuils d'irrigation recommandés en fonction du type de sol, du stade de développement des plantes et des résultats historiques obtenus dans la région. Des modules d'aide à la décision (DSS) peuvent être intégrés pour générer des alertes ou des recommandations automatiques pour les irrigants.

- **Phase 4 : Évaluation et extension**

Évaluation continue des performances techniques, économiques (économies d'eau, amélioration des rendements, réduction des intrants) et organisationnelles (acceptabilité par les agriculteurs, réactivité du personnel technique). Sur la base de ces retours, l'extension à d'autres blocs du périmètre peut être entreprise. (Haniche M., & Tabrait M., 2021).

7.3. Aspects techniques et logistiques de la généralisation

Le succès de la généralisation dépendra de plusieurs facteurs :

- **Infrastructure hydraulique existante** : Le réseau de distribution d'eau doit permettre un contrôle à distance des vannes et une compatibilité avec les systèmes de commande automatisée.
- **Capacité de communication et couverture réseau** : La couverture 3G/4G ou les solutions à longue portée de type LoRaWAN devront être évaluées pour assurer une transmission fluide des données sur l'ensemble du périmètre.
- **Maintenance et assistance technique** : Une équipe locale formée à la maintenance des équipements IoT (capteurs, passerelles, batteries solaires) et à la gestion des données sera nécessaire pour assurer la durabilité du système.
- **Formation et sensibilisation des agriculteurs** : Des ateliers pratiques, démonstrations de terrain et outils d'interface simples (applications mobiles ou alertes SMS) devront accompagner le déploiement pour favoriser l'appropriation par les usagers finaux.

7.4. Bénéfices attendus d'une généralisation

La généralisation du système IoT sur le périmètre de Zit El Emba pour la culture de la tomate industrielle devrait permettre :

- Une amélioration significative de l'efficacité de l'irrigation (réduction des pertes par excès ou déficit).
- Une meilleure gestion collective des ressources en eau, notamment en période de pénurie.
- Une anticipation des besoins hydriques selon les conditions climatiques réelles et non des calendriers fixes.
- Une amélioration de la qualité et de la régularité de la production, favorable à la transformation industrielle.
- Une contribution à la durabilité de l'agriculture locale en réduisant l'empreinte environnementale de l'irrigation.

8. Suivi et amélioration continue de la performance hydrique : fondement d'une irrigation intelligente à Zit El Emba

L'une des contributions majeures de l'Internet des Objets dans la gestion de l'irrigation réside dans sa capacité à assurer un suivi continu et automatisé des paramètres agro-climatiques et hydriques, permettant une évaluation régulière de l'efficacité des stratégies mises en œuvre. En enregistrant des données en temps réel sur l'humidité du sol, les volumes d'eau appliqués, les conditions climatiques et les réponses des cultures, il devient possible de :

- Détecter rapidement les dysfonctionnements (fuites, bouchons, pertes d'efficacité du système) ;
- Corriger les schémas d'irrigation en fonction des retours terrain ;
- Comparer les performances d'une campagne à l'autre, grâce à l'historisation des données ;
- Adapter les décisions agronomiques (choix variétaux, densité de plantation, date de semis) à partir des rétroactions climatiques et hydriques observées.

Cette logique de gestion adaptative et évolutive, soutenue par des outils IoT, représente un changement de paradigme par rapport aux systèmes traditionnels, souvent basés sur des programmations fixes ou des observations empiriques. (Khellouf M. I., et Tebaa M. A., 2021).

En somme, l'analyse climatique détaillée de la région de Zit El Emba, combinée au calcul des pluies efficaces et à l'intégration de capteurs intelligents, offre un socle solide pour la mise en œuvre d'une irrigation de précision, économe en eau et mieux adaptée aux spécificités locales.

L'IoT permet ainsi de répondre aux défis posés par la variabilité climatique, la rareté de la ressource et les exigences croissantes de la production agricole durable.

Conclusion

L'analyse climatique et hydrique du périmètre irrigué de Zit El Emba met en évidence une forte variabilité saisonnière typique du climat méditerranéen, marquée par une abondance des précipitations en automne et en hiver, et une sécheresse prononcée en été. Cette répartition impose une gestion rigoureuse et adaptée de l'eau d'irrigation, notamment durant la période estivale où les besoins hydriques des cultures atteignent leur maximum alors que les pluies efficaces sont quasi nulles.

L'intégration de l'Internet des Objets (IoT) dans ce contexte offre des perspectives prometteuses pour relever les défis liés à l'optimisation de la ressource en eau. En s'appuyant sur des données climatiques précises (température, humidité, rayonnement solaire, évapotranspiration potentielle, etc.) et sur les précipitations efficaces, les dispositifs IoT permettent une irrigation fine, pilotée, réactive et économe.

La mise en place de capteurs, de stations météo connectées, d'outils de modélisation et d'actuateurs intelligents contribue non seulement à une meilleure planification des apports hydriques, mais aussi à une réduction des gaspillages et à une amélioration des rendements agricoles. Le croisement entre données climatiques historiques et mesures en temps réel rend possible une agriculture plus résiliente, mieux préparée aux impacts du changement climatique.

Ainsi, ce chapitre pose les bases d'une approche technologique innovante, fondée sur l'IoT, qui s'avère particulièrement adaptée aux exigences du périmètre de Zit El Emba. Il convient désormais d'approfondir les conditions concrètes de mise en œuvre, les choix technologiques, les dispositifs à privilégier et les scénarios d'application les plus efficaces dans le contexte agro-environnemental local.

Conclusion Générale & Recommandations

Conclusion générale et recommandations

La gestion efficiente de l'eau d'irrigation constitue, aujourd'hui plus que jamais, un impératif stratégique dans les régions méditerranéennes soumises à une forte variabilité climatique et à une pression croissante sur les ressources hydriques. Le périmètre irrigué de Zit El Emba, situé dans la wilaya de Skikda, illustre parfaitement cette réalité, avec une demande en eau agricole soutenue, un déséquilibre saisonnier entre les apports et les besoins, et une infrastructure nécessitant une modernisation ciblée.

À travers ce mémoire, une analyse approfondie des caractéristiques hydro-climatiques du bassin versant de l'oued Kébir Ouest a été menée, mettant en évidence les contraintes actuelles liées à la disponibilité et à la gestion de l'eau. Parallèlement, un diagnostic du système d'irrigation existant a permis d'identifier les limites des méthodes traditionnelles, notamment en termes de gaspillage d'eau et d'inefficacité dans la distribution. C'est dans cette optique que l'étude s'est tournée vers les technologies innovantes de l'Internet des Objets (IoT), en tant que levier de transformation pour une irrigation plus intelligente, réactive et durable.

Les résultats obtenus soulignent la pertinence croissante de l'IoT dans le domaine de l'irrigation agricole. L'intégration de capteurs intelligents, de stations météo connectées et de dispositifs automatisés permet une collecte de données en temps réel, facilitant une prise de décision rapide et adaptée aux besoins réels des cultures. Ce pilotage précis des apports en eau contribue à une réduction significative des pertes, à une meilleure valorisation de la ressource disponible, et à une résilience accrue des systèmes agricoles face aux aléas climatiques.

En proposant un modèle d'implémentation spécifique au contexte de Zit El Emba, ce travail ouvre des perspectives concrètes pour la transition vers une agriculture connectée, plus efficiente et respectueuse de l'environnement. La démarche présentée pourrait être élargie à d'autres périmètres irrigués dans la wilaya de Skikda, constituant ainsi une base de référence pour des politiques publiques axées sur l'innovation technologique et la durabilité.

Afin de faciliter la mise en œuvre efficace de ces solutions, les recommandations suivantes sont formulées :

- Renforcement des infrastructures numériques agricoles : Il est indispensable de développer les réseaux de communication (Wi-Fi agricole, réseau LoRa, etc.) pour assurer la transmission continue des données issues des capteurs IoT.

- Formation et sensibilisation des agriculteurs : La réussite de l'intégration des solutions IoT dépend fortement de l'adhésion des usagers. Il est recommandé de mettre en place des programmes de formation à l'usage des technologies connectées et à l'interprétation des données.
- Soutien institutionnel et financier : Des incitations publiques (subventions, crédits agricoles, partenariats public-privé) doivent être envisagées pour encourager l'acquisition et l'installation des systèmes IoT, notamment chez les petits exploitants.
- Mise en place d'un observatoire local de suivi hydrique : L'établissement d'une plateforme de suivi et d'analyse des données climatiques et hydrologiques permettra une gestion proactive et prédictive des ressources en eau.
- Évaluation continue des performances : Il est essentiel de suivre l'efficacité des dispositifs IoT mis en œuvre à travers des indicateurs de performance (rendement hydrique, économie d'eau, évolution des rendements agricoles, etc.) pour ajuster les stratégies d'irrigation en temps réel.
- Favoriser la recherche appliquée : Encourager des projets de recherche et développement collaboratifs entre universités, instituts techniques et agriculteurs afin de concevoir des solutions technologiques adaptées aux conditions agro-climatiques locales.

En définitive, ce mémoire ambitionne de contribuer à la réflexion nationale sur la résilience du secteur agricole face aux défis du changement climatique et de la sécurité hydrique. La mise en œuvre progressive de solutions IoT dans les systèmes d'irrigation algériens, à commencer par des zones pilotes comme Zit El Emba, pourrait amorcer une dynamique vertueuse à l'échelle régionale et nationale. Elle permettrait de faire de l'innovation technologique non plus une exception, mais une norme dans la gestion de l'eau agricole, au service d'une agriculture plus productive, plus sobre et mieux préparée aux enjeux de demain.

Références

Bibliographiques

Références bibliographiques

1. **Abdeladim, Y. (2021)**. Étude d'aménagement hydro-agricole du périmètre d'irrigation Zit El Emba sud-ouest (200 ha). Mémoire d'Ingénieur d'État, ENSH Blida. 121 p.
2. **Abdi, M. S., & Boumakel, O. D. (2020)**. Etude et réalisation d'un système d'irrigation automatisé avec monitoring. Mémoire de Master. Université Kasdi Merbah Ouargla. 78p.
3. **Aichouche, S., & Amroune, L. (2020)**. Étude comparative entre deux techniques d'irrigation. Université Mohamed Boudiaf - M'Sila.
4. **Ait Mouhoub, Y., & Bouchebbah, F. (2015)**. Proposition d'un modèle de confiance pour l'Internet des objets. Mémoire de master. Université Abderrahmane Mira Bejaia.
5. **Ben Salah, M., Zribi, M., & Lahmar, R. (2022)**. IoT and Precision Agriculture in Tunisia.. *Journal of Smart Agriculture*, 3(2), 87–96.
6. **Bessaoud, O. (2019)**. Rapport de synthèse sur l'agriculture en Algérie. [hal.archives-ouvertes.fr > hal-02137632 > document](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02137632/document).
7. **Bhourri Khila, S., Douh, B., Mguidiche, A., & Boujeben, A. (2015)**. Synthèse des principaux indicateurs de performance des systèmes irrigués. *Revue Larhyss Journal*, n°24, pp. 263-279.
8. **Bouarfa, S., Tabet, A., & Khellaf, A. (2021)**. Digital Divide and Rural Development in Algeria. *Algerian Journal of Agricultural Technologies*, 5(1), 10–18.
9. **Bouazza, A., El Amrani, M., & Haidar, L. (2023)**. Smart Irrigation Systems in Morocco. *Mediterranean Agricultural Review*, 7(1), 40–52.
10. **Boulahia, A. (2016)**. L'eau d'irrigation en Algérie. Mémoire de Master, Université des Frères Mentouri Constantine. 55p.
11. **Chebihi, L. (2012)**. Adaptation des pompes immergées destinées à l'irrigation dans les zones arides. Mémoire de magister. Université Kasdi Merbah Ouargla.

12. **Daifallah, T. (2007)**. Ressources en eau et gestion intégrée dans le bassin versant de l'oued Kébir Ouest. Magister, Université Badji Mokhtar - Annaba. 177 p.
13. **Daifallah, T. (2017)**. Ressources en eau et leurs utilisations dans le bassin versant de l'Oued Kébir Ouest. Thèse Doctorat Es sciences. 170 p.
14. **FAO. (2022)**. Digital Agriculture: Adoption and Benefits in Dryland Areas. FAO Report, Rome.
15. **Ghomrani nour el houda et Medjrab Nesrine (2021)**. Etude hydrogéologique du sous bassin versant Oued Zeramna (Skikda), Mémoire de Master, Université de Constantine, 65p,
16. **Haniche, M., & Tabrait, M. (2021)**. Smart Agriculture in Algeria: A Review of IoT Applications. Proceedings of the Algerian Agricultural Innovation Conference.
17. **Haniche, M., & Tabrait, N. (2019)**. Internet des objets dans le domaine de l'agriculture de demain. Mémoire de Master. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. 91p.
18. **Kambouche Sofiane & Attou Ismail (2018)**. Conception et réalisation d'un système d'agriculture intelligent. Mémoire de Master. Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent. 41p.
19. **Khaldi, M. (2021)**. L'IoT au service de l'agriculture durable en Algérie. Revue Maghrébine de l'Agriculture Numérique, 2 (1), 21–35.
20. **Khellouf, M. I., & Tebaa, M. A. (2021)**. Etude et réalisation d'un système d'irrigation intelligent. Mémoire de Master. Centre Universitaire Boussoouf Abdelhafid – Mila. 29p.
21. **Kouadria, M. (2021)**. Cours d'irrigation. Polycopié de cours, Université Ibn Khaldoun de Tiaret.
22. **Lahlouh, M., & Azizou, A. (2018)**. Etude et réalisation d'un système d'irrigation automatique. Mémoire de Master. Université Djilali Bounaâma, Khemis Miliana. 62p.

23. **Lemzadmi, C., & Saidi, H. (2017).** Perte de capacité de stockage en eau dans quelques barrages de l'est Algérien. Mémoire de Master, Université 8 Mai 1945, Guelma. 86 p.
24. **M.R.E. (2018).** Bilan des réalisations des Grands Périmètres d'Irrigation en Algérie 2016. Direction de l'Hydraulique Agricole (DHA), Alger.
25. **Mouassa, S. (2017).** Évaluation des ressources en eau dans le sous bassin versant de la moyenne Seybouse. Thèse de Doctorat. Université Badji Mokhtar de Annaba. 157 p.
26. **Nini, F. (2021).** Du barrage à la parcelle irriguée : étude sur l'eau et valorisation des grands périmètres. Thèse Doctorat es-Sciences, Université Constantine. 250 p.
27. **Nini, F., & Mebarki, A. (2017).** Efficience de distribution de l'eau potable à l'échelle de quelques communes. Journal JISTEE, Numéro 2 - Octobre 2017.
28. **Nini, F., & Mebarki, A. (2019).** La mise en valeur hydro agricole. Revue Sciences et Technologie, Série D, N°49 Juin 2019.
29. **Nini, F., & Mebarki, A. (2020).** L'Efficiencie de l'Utilisation de l'Eau d'irrigation. Revue la Houille Blanche.
30. **ONID. (2020).** Aménagement hydro-agricole du périmètre Zit El Emba 6416 ha, wilaya de Skikda (avant-projet détaillé).
31. **Salhi, A., & Boukerker, H. (2021).** Etude et réalisation d'un système d'irrigation intelligente. Mémoire de Master. Université Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj. 58p.
32. **World Bank. (2021).** Agriculture 4.0. Case Studies from India. Washington, D.C.

Webographie

- https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Greenhouse_gas_emission_scenarios_01-cs.svg
- <https://depositphotos.com/fr/photos/irrigation-goutte-à-goutte.html?qview=578960640>
- <https://irrigazette.com/fr/articles/les-techniques-dirrigation-agricole>
- <https://ramcorpwire.com/fr/wire-cable-information/what-is-sprinkler-irrigation-cable/>
- https://wiki.tripleperformance.fr/wiki/Irrigation_en_maraîchage
- <https://wikifarmer.com/library/fr/article/types-de-systemes-dirrigation-que-choisir-en-fonction-de-ses-besoins>
- www.earth-policy.org
- www.swansonsnursery.com

Nom et Prénom : BOUBAISSA Houaida

Nom et Prénom : BOUZABIA Rayene

Nom et Prénom : KHENANEF Aya

**Titre : Optimisation de la gestion de l'eau d'irrigation à l'aide de l'Internet des Objets (IoT):
application au périmètre irrigué de Zit El Emba (Skikda, N-E Algérien).**

Résumé :

Face à la raréfaction croissante des ressources hydriques dans les régions à climat méditerranéen, accentuée par les effets du changement climatique et l'augmentation soutenue des besoins agricoles, la recherche d'une gestion efficace et durable de l'eau d'irrigation s'impose aujourd'hui comme un enjeu stratégique majeur. Ce mémoire s'inscrit dans cette problématique en se concentrant sur le périmètre irrigué de Zit El Emba (Skikda), avec pour objectif principal d'évaluer l'apport des technologies de l'Internet des Objets (IoT) à l'optimisation de la gestion de l'irrigation.

L'étude s'appuie sur une analyse des caractéristiques hydro-climatiques du bassin versant de l'oued Kébir Ouest, un diagnostic du système d'irrigation existant, et la proposition d'un modèle d'implémentation de solutions IoT adaptées au contexte local. Les résultats montrent que l'IoT permet une gestion plus précise et réactive des apports hydriques, réduisant les pertes en eau tout en améliorant les rendements agricoles.

Pour assurer le succès de cette transition vers une irrigation connectée et durable, l'étude recommande notamment le renforcement des infrastructures numériques, la formation des agriculteurs, le soutien institutionnel et financier, ainsi que le suivi continu des performances.

Ce travail vise ainsi à offrir un cadre opérationnel pour la modernisation de la gestion de l'irrigation dans les zones agricoles semi-arides, en valorisant le potentiel des technologies intelligentes.

***Mots clés* : Irrigation, Internet des Objets, Zit El Emba, gestion de l'eau, agriculture de précision, durabilité, climat méditerranéen.**

ملخص

مع التناقص المستمر للموارد المائية بالمناطق ذات المناخ المتوسطي، والذي تفاقم بفعل التغيرات المناخية وتزايد الطلب الزراعي، أصبحت الحاجة إلى إدارة فعالة ومستدامة لمياه الري تمثل أولوية استراتيجية ملحة. يندرج هذا البحث ضمن هذا الإطار، حيث يركز على محيط السقي بزيت العنبة (سكيكدة)، بهدف رئيسي هو تقييم مساهمة تقنيات إنترنت الأشياء (IoT) في تحسين تسيير وإدارة مياه الري الزراعي.

تعتمد الدراسة على تحليل الخصائص الهيدرولوجية-مناخية لحوض وادي الكبير الغربي، وتشخيص نظام الري الحالي، واقتراح نموذج تطبيقي لحلول ذكية تتماشى مع الخصوصيات المحلية. وقد أظهرت النتائج أن استخدام تقنيات إنترنت الأشياء يسمح بتحكم أكثر دقة ومرونة في توزيع المياه، مما يساهم في تقليص الهدر وتحسين الإنتاجية الزراعية.

ومن أجل إنجاح هذا التحول نحو ري ذكي ومستدام، توصي الدراسة بتعزيز البنى التحتية الرقمية، وتكوين الفلاحين، وتوفير الدعم المؤسسي والمالي، إضافة إلى تتبع الأداء بشكل مستمر.

ويطمح هذا العمل إلى تقديم إطار عملي لتحديث إدارة مياه الري في المناطق الزراعية شبه الجافة، عبر استغلال الإمكانيات التي تتيحها التقنيات الذكية.

الكلمات المفتاحية : الري، إنترنت الأشياء، زيت العنبة، إدارة المياه، الزراعة الدقيقة، الاستدامة، المناخ المتوسطي.