

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي و

البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر

بلقايد- تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Hydraulique

Spécialité : Hydraulique Urbaine

Par : MASSAHOUDOU KARAMI ABDOU Tarek

Sujet

**SMART IRRIGATION DES TERRES AGRICOLES ARIDES ET
SEMI-ARIDES PAR UN SYSTEME GOUTTE À GOUTTE ET
UN POMPAGE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE.
ÉTUDE DE CAS ET PROTOTYPE.**

Soutenu publiquement, le **27 /09/2023**, devant le jury composé de :

| | | | |
|----------------------------|------------|-----------------------|--------------|
| Mr DEBBAL Mohammed Zakaria | MAA | Université de Tlemcen | Président |
| Mr BENADDA Lotfi | MCB | Université de Tlemcen | Examinateur |
| Mr MAACHOU Omar | MAA | Université de Tlemcen | Examinateur |
| Mr BENNACER Abdelkader | Ingénieur | DSA Tlemcen | Examinateur |
| Mr BENMANSOUR Abdelhalim | Professeur | Université de Tlemcen | Encadreur |
| Mr BENADDA Belkacem | Professeur | Université de Tlemcen | Co-Encadreur |

Année universitaire : 2022 /2023

REMERCIEMENTS

Gloire et louange à Dieu le tout puissant ALHAMDOLILAH.

Nous tenons tout d'abord à remercier **Allah** le tout puissant, sa grâce, sa clémence et sa miséricorde nous a enrichi de sagesse, de force et d'une inspiration profonde durant l'élaboration de ce modeste travail pour le contribuable patriote.

Je suis rempli d'une immense gratitude et d'une grande émotion en ce jour où je vous remercie pour votre soutien, votre patience et votre expertise tout au long de la réalisation de mon mémoire de fin d'études. Je tiens tout particulièrement à remercier mes encadreurs, messieurs **BENMANSOUR ABDELHALIM** et **BENADDA Belkacem**, pour leur investissement et leur accompagnement tout au long de ce projet innovant. Sans eux, je n'aurais pu mener à bien cette thématique unique, qui m'a tant passionné et inspiré.

Nous adressons aussi nos remerciements à messieurs **BENADDA Lotfi** et **MAACHOU Omar** (I2E), enseignants à l'université de Tlemcen, ainsi que monsieur **BENACER Abdelkader**, ingénieur à la DSA Tlemcen, d'avoir accepté d'examiner ce travail et l'enrichir. Aussi, mes remerciements vont à monsieur **DEBBAL Mohammed Zakaria**, enseignant à l'université de Tlemcen pour avoir accepté la rude tâche de Présider le jury d'examen.

Je souhaite également exprimer ma reconnaissance à tous les professeurs du département hydraulique qui ont participé à la réussite de ce travail, ainsi qu'à toutes les personnes impliquées du CENTRE I2E pour leur suivis. Nous remercions également les chercheurs permanents de l'Unité de Recherche Energies Renouvelables en Milieu Saharien, URERMS, Adrar, à leur tête le docteur **SEHOUANE Nour Eddine**, où j'ai effectué un stage d'un mois.

Mes sincères remerciements vont à Mr **HOUALIA MOHAMMED**, propriétaire de la ferme agricole, de nous avoir ouvert ses portes, accueillie et de par sa vision nous a guidé et orienté.

Leur contribution a été déterminante pour la finalisation de ce projet innovant.

Et enfin, je tiens à remercier chaleureusement tous mes amis, mes camarades et toute la promotion HYDRAULIQUE URBAINE_2023 pour leur soutien, leur bienveillance tout au long de cette aventure. Leur présence a été un vrai moteur et une source de motivation pour moi afin de me relancer après une longue période de sciatique.

Je suis fier de vous présenter mon mémoire et je suis profondément reconnaissant envers toutes les personnes qui ont contribué à sa réussite.

Merci infiniment pour votre accompagnement et votre confiance.

Bien cordialement,

MASSAHOUDOU KARAMI ABDOU Tarek

DÉDICACES

À mes chers parents, aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour dont ils ne cessent de me combler, ma reconnaissance et ma gratitude seront éternelles. Pour votre patience illimitée qui demeure le pilier de ma force et surtout mes guides tout au long de ce parcours académique. Votre soutien inconditionnel, votre amour et vos encouragements sont le moteur de ma persévérance. Qu'ALLAH vous procure une longue vie en toute sainteté.

Ce mémoire est dédié à vous, pour tout ce que vous avez fait et continuez d'établir dans ma vie.

À mes deux familles **MASSAHOUDOU KARAMI** et **RADJI**, mes amis et connaissances, qui ont été mes compagnons de route dans cette aventure. Vos encouragements, vos conseils, vos sourires et surtout vos critiques ont été une bouée de sauvetage qui a façonné ma personne. Merci de m'avoir accompagné tout au long de ce parcours académique et d'avoir été une source de motivation et d'inspiration.

À vous chers grands frères **AbdoulAziz** et **Faycal** que vos âmes reposent en paix et qu'Allah vous accorde sa grâce divine nos prières vous accompagneront toujours.

A ma tante Chérie **AMINA BEIDI** et ma Grande Mère **DADA**, qu'Allah vous accueille dans son paradis éternel. Ce mémoire est également dédié à vous, pour tout l'amour, le soutien et l'encouragement que vous m'aviez apportés.

Enfin à vous tous je dirai Merci (**SAHATIK**). Vous avez été mes piliers de force et j'espère que je pourrai continuer à compter sur votre soutien dans les défis futurs.

Résumé

L'eau et l'énergie constituent un enjeu stratégique pour l'émancipation d'une Nation. Malheureusement, l'Algérie est soumise à une aridité extrême, à une agriculture traditionnelle pénible, réalisée souvent par de vieilles personnes (septuagénaires et plus), à l'apport d'eau non régulier et à la dégradation des sols.

Pour y remédier à ces aléas, et surtout pour pousser les jeunes générations à travailler la terre, nous procédons à la conception et au dimensionnement d'un réseau d'irrigation gouttes à gouttes avec pompage solaire photovoltaïque et un pilotage par smartphone via des capteurs connectés aux pieds des arbres fruitiers. Notre projet ATAFILAH, à caractère innovant, a pour étude de cas un périmètre d'agrumes clémentines dans la ferme HOUALIA à Hennaya (Wilaya de Tlemcen). Un prototype de pilotage à distance a été conçu et réalisé dans ce projet.

Mots-Clés : Irrigation intelligente, photovoltaïque, smartphone, capteurs, Arduino.

Summary

Water and energy are strategic issues for the emancipation of a nation. Unfortunately, Algeria is subject to extreme aridity, painful traditional agriculture, often carried out by old people (in their seventies and older), unregulated water supply and soil degradation. To remedy these problems, and above all to encourage the younger generation to work the land, we are designing and sizing a drip irrigation network with photovoltaic solar pumping and smartphone control via sensors connected to the feet of the fruit trees. The case study of our innovative ATAFILAH project is a clementine citrus grove on the HOUALIA farm in Hennaya (Wilaya of Tlemcen). A remote-control prototype was designed and produced as part of this project.

Keywords: Intelligent irrigation, photovoltaic, smartphone, sensors, Arduino.

ملخص

تشكل المياه والطاقة قضية استراتيجية لتحرر الأمة. لسوء الحظ، تعاني الجزائر من الجفاف الشديد والزراعة التقليدية الصعبة التي غالبًا ما يقوم بها كبار السن (في السبعينيات وما فوق)، وإمدادات المياه غير المنظمة وتدهور التربة.

لمعالجة هذه المخاطر، وقبل كل شيء لتشجيع الأجيال الشابة على العمل في الأرض، نقوم بتصميم وتحديد حجم شبكة الري بالتنقيط مع ضخ الطاقة الشمسية الكهربائية والتحكم عبر الهواتف الذكية عبر أجهزة استشعار ، ذو الطبيعة المبتكرة، يحتوي كحالة دراسية على منطقة ATAFILAH متصلة عند سفح أشجار الفاكهة. مشروعنا حمضيات الكليمتين في مزرعة هواليا في الحنايا (ولاية تلمسان). تم تصميم وإنتاج نموذج أولي للتحكم عن بعد في هذا المشروع.

الكلمات المفتاحية: الري الذكي، الخلايا الكهروضوئية، الهاتف الذكي، الحساسات، الاردوينو

Liste des abréviations

| | |
|-----------------|--|
| A | Les besoins traditionnels en mm/jour |
| a1 | Les besoins quotidiens réduit à la culture (mm / jour) |
| AC | Courant alternatif. |
| ATAFILAH | Le nom du projet innovant et de la solution à l'irrigation automatique |
| B brutes | Besoins brutes |
| B nette | Besoins nets |
| CC | Courant continu. |
| Cg | Coût globale de système photovoltaïque |
| Ch. | Constante hydraulique. |
| Cu | Coefficient d'uniformité |
| DA | Dinars Algérien |
| Dfc | Dose effective continue |
| Dn | Diamètre normalisé en mm |
| e | Espacement entre goutteurs |
| Ee | Energie électrique. |
| Eg. | Espace goutteur. |
| Eh. | Energie hydraulique. |
| Etp. | Evapotranspiration potentiel. |
| Fm. | Facteur de couplage. |
| GPV | Générateur photovoltaïque |
| Pc | La puissance crête du générateur |
| ETM | Évapotranspiration Maximale (Evapotranspiration potentielle) |
| ETo | Évapotranspiration de référence |
| Kc | Coefficient de culture ETP : |
| Ec | Énergie consommée exprimée en (kw) |
| IOT | Internet des objets |
| RS232 | Fonction de transmission |
| | |

Sommaire

| | |
|---|---|
| Remerciements | |
| Dédicaces | |
| Listes des abréviations | |
| Listes des figures | |
| Listes des tableaux | |
| Résumé | |
| INTRODUCTION GENERALE | |
| | 1 |
| CHAPITRE I : LES DIFFERENTES TECHNIQUES D'IRRIGATION ET L'AGRICULTURE FACE A LA CRISE MONDIALE DE L'EAU ET LES SOLUTIONS LIEES POUR PROTEGER LA RESSOURCE EAU. | |
| | 4 |
| I. | Définition de l'irrigation |
| | 5 |
| I.1.1 | Irrigation de surface : |
| | 6 |
| I.1.1.1 | L'Irrigation par planche |
| | 6 |
| I.1.1.2 | L'irrigation à la raie (ou par rigole) |
| | 6 |
| I.1.1.3 | L'irrigation par bassin : |
| | 7 |
| I.1.2 | L'irrigation par aspersion. |
| | 8 |
| I.1.3 | L'irrigation goutte à goutte |
| | 8 |
| I.1.3.1 | Cultures recommandées |
| | 9 |
| I.1.3.2 | Les composantes d'une installation d'irrigation localisé : |
| | 10 |
| I.1.3.2.1 | L'unité de pompage |
| | 10 |
| I.1.3.2.2 | La filtration |
| | 11 |
| I.1.3.2.3 | Conduites et rampes. |
| | 12 |
| I.2 | Programmeurs d'irrigation |
| | 13 |
| I.3 | Choix des techniques d'irrigation : |
| | 14 |
| I.4 | L'auto-suffisance alimentaire. |
| | 15 |
| I.5 | Agriculture intelligente face au changement climatique : |
| | 16 |
| I.5.1 | La crise mondiale de l'eau. |
| | 16 |
| I.5.2 | Solutions face à la crise du changement climatique en agriculture |
| | 17 |
| I.5.2.1 | La réutilisation des eaux usées et drainées de l'Oued SOUF |
| | 17 |
| I.5.2.2 | Système d'arrosage automatique solaire "intelligent" |
| | 18 |
| I.5.2.3 | Agriculture HORS-SOL : (hydroponie, aquaponie) |
| | 19 |
| I.5.2.4 | l'agriculture de précision : |
| | 19 |
| I.5.2.5 | l'irrigation déficitaire régulée (IDR). |
| | 20 |
| I.5.2.6 | Gestion intégrée de la ressource en eau. |
| | 20 |
| I.6 | Contrôleurs d'irrigation intelligente. |
| | 20 |
| CHAPITRE II : REALTION ENTRE LA PLANTE, LE SOL ET LES BESOINS EN EAU DES DIFFERENTES CULTURES | |
| | 21 |
| II. | Processus de transfert d'eau dans le végétal. |
| | 22 |
| II.1. | Facteurs qui agissent sur la consommation d'eau |
| | 22 |
| II.1.1. | Facteurs climatiques |
| | 23 |
| II.1.2. | Potentiel de l'eau. |
| | 23 |
| II.2. | Les besoins en eau des cultures. |
| | 23 |
| II.2.1. | L'évapotranspiration (ET). |
| | 24 |
| II.2.2. | Méthodes déterminant l'évapotranspiration. |
| | 24 |
| II.2.2.1. | Les méthodes directes |
| | 24 |
| II.2.2.2. | Les méthodes déterminant l'ETP, les formules empiriques |
| | 25 |

| | |
|--|----|
| II.2.2.2.1. Formule de THORNTHWAITE. | 25 |
| II.2.2.2.2. Formule de TURC. | 25 |
| II.2.2.2.3. Formule de TURC réelle. | 26 |
| II.2.2.2.4 Méthode de BLANEY-GRIDDLE : | 26 |
| II.3. Le bilan hydrique. | 27 |
| II.4. Normes de qualité des eaux d'irrigation. | 28 |
| II.5. Solutions | 28 |
| II.5.1. Gestions des résidus | 28 |
| II.5.2. La pré – irrigation. | 28 |
| II.5.3. La gestion de la fréquence d'irrigation. | 33 |
| II.5.4. Les fertilisants. | 29 |
| CHAPITRE III : LES ENERGIES RENOUVELABLES ET LA STATION DE POMPAGE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE | 30 |
| III. Généralité | 31 |
| III.2. Les différents types d'énergie renouvelable. | 31 |
| III.2.1. Énergie solaire. | 31 |
| III.2.2. Énergie éolienne. | 32 |
| III.2.3. Énergie hydraulique. | 32 |
| III.2.4. Biomasse. | 32 |
| III.2.5. Géothermie. | 33 |
| III.3. Système photovoltaïque. | 34 |
| III.3.1. Le rayonnement solaire. | 34 |
| III.3.2. Principe de fonctionnement. | 34 |
| III.3.3. Modèle d'une cellule solaire et schéma électrique équivalent | 35 |
| III.3.4. Module et panneau photovoltaïque. | 35 |
| III.3.4.1. Associations en série. | 36 |
| III.3.4.2. Associations en parallèle. | 36 |
| III.3.4.3. Association hybride (en série et en parallèle). | 36 |
| III.4. Les différents types de panneau photovoltaïque | 37 |
| III.4.1. Panneaux photovoltaïques monocristallin | 37 |
| III.4.2. Panneaux photovoltaïques nouvelle génération | 37 |
| III.4.3. Panneaux photovoltaïque amorphe | 37 |
| III.4.4. Panneau solaire photovoltaïque bifacial | 37 |
| III.5. Potentiel solaire en Algérie | 38 |
| III.6. Types de pompes solaires | 38 |
| III.6.1. Pompes de surface : | 39 |
| III.6.2. Pompes immergées : | 39 |
| III.7. Types du système de pompage solaire | 39 |
| III.7.1. Pompage par batterie : | 39 |
| III.7.2. Pompage au fils du soleil : | 40 |
| III.8 La partie stockage : | 41 |
| III.8.1. Des notions hydrauliques : | 41 |
| III.8.5. Choix de la pompe : | 41 |
| CHAPITRE IV : ETUDE D'UN SYSTEME D'IRRIGATION GOUTTE A GOUTTE PAR POMPAGE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE DANS LA ZONES SEMI-ARIDES ET ARIDES EN ALGERIE. CAS D'ETUDE HENNAYA (WILAYA DE TLEMCEN). | 43 |
| IV.1. Étude du milieu physique du site | 44 |

| | |
|---|----|
| IV.1.1. Présentation de la zone d'étude | 44 |
| IV.1.2. Identification et localisation du site d'étude. | 45 |
| IV.1.3. Situation agricole de la zone. | 45 |
| IV.1.4. Topographie et relief. | 46 |
| IV.1.5. Situation géologique et hydrogéologique. | 46 |
| IV.1.6. La nappe de Hennaya : | 46 |
| IV.2. Propositions et choix de cultures associées à l'agrumes clémentine. | 47 |
| IV.3. Climat et bioclimat. | 48 |
| IV.3.1. Précipitations : | 49 |
| IV.3.2. Températures | 51 |
| IV.3.2.1. Températures moyennes maximales | 51 |
| IV.3.2.2. Températures moyennes minimale. | 51 |
| IV.3.2.3. Température Moyenne mensuelle. | 52 |
| IV.3.3. Autres paramètres climatiques | 53 |
| IV.3.3.1. Gelées : | 53 |
| IV.3.3.2. Grêle : | 53 |
| IV.3.3.3. Orages : | 53 |
| IV.3.3.4. Le vent | 53 |
| IV.3.3.5. Humidité relative | 54 |
| IV.3.3.6. Insolation et éclairage | 55 |
| IV.3.3.6.1. Evapotranspiration potentielle (E.T.P) | 56 |
| IV.3.3.6.2. Evapotranspiration de TURC | 56 |
| IV.3.4. Etude du régime climatique | 57 |
| IV.3.4.1. Méthode de visualisation | 57 |
| IV.3.4.2. Indices climatiques | 57 |
| IV.3.4.3. Quotient pluviométrique « d'Emberger » | 58 |
| IV.3.4.4. Indice d'aridité de DEMARTONE | 59 |
| IV.3.4.5. Indice d'aridité mensuelle | 60 |
| IV.3.4.6. Comparaison du résultat du type du climat obtenu | 61 |
| IV.4. Etude du sol de la parcelle d'essai | 61 |
| IV.4.1. Prélèvement échantillonnages du sol | 62 |
| IV.4.2. Analyse physique. | 63 |
| IV.4.2.1. Humidité du sol | 64 |
| IV.4.2.2. Analyse granulométrique par tamisage | 64 |
| IV.4.2.3. Granulométrie par sédimentation | 66 |
| IV.4.2.4. Analyse de perméabilité | 68 |
| IV.5. Les paramètres clés des besoins en eau d'une culture | 70 |
| IV.5.1. Evaluation théorique | 70 |
| IV.5.1.1. Evaluation des besoins en eau des cultures ETM | 70 |
| IV.5.1.2. Calcul du bilan hydrique du sol | 70 |
| IV.5.2. La dose d'irrigation | 72 |
| IV.5.3. La dose pratique d'arrosage(dp) | 72 |
| IV.5.4. Module m | 73 |
| IV.5.5. Bilan eau-énergie | 73 |
| IV.5.6. Evaluation du débit de pointe | 74 |
| IV.6. Présentation du logiciel Cropwat | 74 |
| IV.7. Dimensionnement | 75 |
| IV.7.1. Dimensionnement du réseau goutte à goutte (1 ère MÉTHODE) | 75 |

| | |
|---|------------|
| IV.7.1.1. Données générales | 75 |
| IV.7.1.1.1. Besoins journaliers | 76 |
| IV.7.1.1.2. Besoin journalier en tenant compte de la réduction | 76 |
| IV.7.1.2. Dose d'irrigation nette pratique | 77 |
| IV.7.1.3. Fréquence des arrosages | 77 |
| IV.7.1.4. Durée d'arrosage par mois | 77 |
| IV.7.1.5. Durée d'arrosage journalier | 78 |
| IV.7.1.6. Calcul du débit spécifique | 79 |
| IV.7.1.7. Calcul du débit caractéristique | 79 |
| IV.7.1.8. Estimation des volumes d'irrigation | 80 |
| IV.7.1.9. Dimensionnement hydraulique d'un réseau goutte à goutte | 80 |
| IV.7.2. Dimensionnement du réseau goutte à goutte (2ème MÉTHODE) | 81 |
| IV.7.2.1. Choix des goutteurs | 81 |
| IV.7.2.2. Paramètre de la micro-irrigation | 81 |
| IV.7.2.3. Dimensionnement du réseau | 83 |
| IV.7.2.3.1. Dimensionnement des rampes, porte rampes et tête | 84 |
| IV.7.2.3.2. Dimensionnement de la tête morte et calage | 86 |
| IV.7.2.3.3. Dimensionnement du réservoir : (1ere option) | 89 |
| IV.7.2.3.4. Capacité du bassin (2eme option réelle du terrain) | 89 |
| IV.7.2.3.5. Dimensionnement de la conduite de refoulement | 90 |
| IV.7.2.4. Dimensionnement de la station de pompage | 92 |
| IV.7.2.4.1. Choix de la pompe | 92 |
| IV.7.2.5. Dimensionnement du générateur photovoltaïque | 94 |
| IV.7.2.5.1. Convertisseur DC/AC (onduleur) | 95 |
| IV.7.2.5.2. Taille du générateur PV | 95 |
| IV.7.2.5.3. Calcul de la puissance crête du PV | 96 |
| IV.7.2.5.3.1. Calcul de l'énergie électrique | 96 |
| IV.7.2.5.3.2. Calcul de nombre de panneaux W | 97 |
| IV.7.2.5.3. Calcul du nombre de panneaux en série /parallèle | 97 |
| IV.8. Automatisation du réseau d'irrigation | 98 |
| IV.9. Analyse économique et financière du système de pompage photovoltaïque | 99 |
| CHAPITRE V : LA CARTE ARDUNIO ET LES COMPOSANTS DE NOTRE SYSTEME DE CONTROLE ATAFILAH AINSI QUE SA PROGRAMMATION | 102 |
| V. Partie logicielle | 103 |
| V.1. Définition | 103 |
| V2. La partie matérielle | 103 |
| V.2.1. Définition | 103 |
| V.2.2. Carte Arduino UNO | 104 |
| V.2.3. Ethernet Shield | 104 |
| V.3. Architecture du système | 105 |
| V.4. Fonctionnement de système d'irrigation | 105 |
| V.4.1. Irrigation en zone sans internet ni GSM (fixés) | 106 |
| V.4.2. Irrigation automatisée (Via GSM ou via WIFI) | 106 |
| V.5 Résultats et interprétations | 107 |
| CONCLUSION GENERALE | 119 |

Liste des figures

| | | |
|----------------|--|----|
| Figure I.1 : | Représentation des différentes méthodes d'irrigation | 5 |
| Figure I.2 : | Irrigation à la planche | 6 |
| Figure I.3 : | Irrigation par sillon ou à la raie | 6 |
| Figure I.4 : | Irrigation par bassin | 7 |
| Figure I.5 : | Irrigation par aspersion d'un champ | 8 |
| Figure I.6 : | Irrigation goutte à goutte | 9 |
| Figure I.7 : | Distribution des eaux sous l'irrigation localisé d'un champ | 10 |
| Figure I.8 : | L'unité de pompage et la zone irriguée avec l'irrigation localisé | 10 |
| Figure I.9 : | Dispositif du filtre à sable réalisé au laboratoire | 11 |
| Figure I.10 : | Dispositif du filtre à tamis | 12 |
| Figure I.11 : | Station en tête de filtration et d'injection d'engrais | 13 |
| Figure I.12 : | Quatre piliers de la sécurité alimentaire | 15 |
| Figure I.13 : | Utilisation de l'eau dans le monde | 15 |
| Figure I.14 : | Réchauffement climatique | 16 |
| Figure I.15 : | Quantité d'eau dans le monde et sa consommation | 16 |
| Figure I.16 : | Résumé des changement attendus dans le rendement des cultures | 17 |
| Figure I.17 : | Station d'épuration et réutilisation des eaux usées. | 18 |
| Figure I.18 : | Hydroponie sous de tuyau PVC. | 19 |
| Figure I.19 : | Irrigation par pivot (à la ramette). | 19 |
| Figure II.1 : | Représentation simplifiée des différents types d'eau dans un sol. | 23 |
| Figure II.2 : | Potentiel de l'eau | 23 |
| Figure II.3 : | Le bac évaporant | 25 |
| Figure II.4 : | Cycle de l'eau à l'échelle du sol | 27 |
| Figure II.5 : | Cycle de l'eau global lie au déficit hydrique. | 27 |
| Figure III.1: | Energie solaire photovoltaïque | 31 |
| Figure III.2: | Schéma du fonctionnement d'une station éolienne | 32 |
| Figure III.3: | Schéma d'une station hydroélectrique. | 32 |
| Figure III.4: | Schéma d'une station de biomasse et ses filiales | 33 |
| Figure III.5: | Schéma d'une Géothermie basse énergie | 33 |
| Figure III.6: | Composant du rayonnement solaire | 34 |
| Figure III.7: | Principe de la conversion photovoltaïque | 35 |
| Figure III.8: | Schéma équivalent de cellule PV | 35 |
| Figure III.9: | Schéma d'un montage en série des panneaux solaires | 36 |
| Figure III.10: | Schéma d'un montage en parallèle des panneaux solaires | 36 |
| Figure III.11: | Caractéristique résultante d'un groupement hybride de cellules | 36 |
| Figure III.12: | Les différents types de panneau photovoltaïque | 37 |
| Figure III.13: | Panneaux photovoltaïques bifaciaux | 37 |
| Figure III.14: | Potentiel solaire en Algérie | 38 |
| Figure III.15: | Pompes de surface. | 39 |
| Figure III.16: | Positionnement d'une pompe immergée. | 39 |
| Figure III.18: | Système de pompage avec stockage d'énergie | 40 |
| Figure III.19: | Schéma du système de pompage solaire pour un site isolé | 40 |
| Figure III.20: | Irradiation et caractéristiques des pompes au fil du soleil/batterie | 41 |
| Figure III.21: | Choix d'une pompe selon la HMT et le débit demandés | 42 |
| Figure IV.1 : | Localisation de la zone d'étude et de la ferme HOUALIA. | 44 |

| | | |
|---------------|---|-----|
| Figure IV.2 : | Localisation de la commune de Hennaya dans la wilaya de Tlemcen | 45 |
| Figure IV.3 : | La situation hydrogéologique de la wilaya de Tlemcen. | 47 |
| Figure IV.4 : | Carte du réseau hydrographique de la Tafna | 47 |
| Figure IV.5 : | Répartition annuelle des précipitations de la station de ZENATA 1981-2021 | 49 |
| Figure IV.6 : | Précipitations moyennes mensuelles de la station de ZENNATA 1981-2021 | 50 |
| Figure IV.7 : | Répartition saisonnière des précipitations (mm) | 50 |
| Figure IV.8 : | Représentation des températures moyennes maximales de la Station | 51 |
| Figure IV.9 : | Représentation des températures moyennes minimales (1981-2021) | 52 |
| Figure IV.10: | Représentation des températures moyennes mensuelles (1981-2021) | 52 |
| Figure IV.11: | Histogramme des fréquences mensuelles moyennes du vent 1981-2021 | 54 |
| Figure IV.12: | Humidité relative 1981-2021 (NASA, 2021) | 55 |
| Figure IV.1 : | Ensoleillement moyen mensuel de la station 1981-2021 | 56 |
| Figure IV.14: | Diagramme pluviothermique (ombrothermique)1981-2021 | 57 |
| Figure IV.15: | Climatogramme d'Emberger | 58 |
| Figure IV.16: | La zone d'étude | 62 |
| Figure IV.17: | La tanière ayant servi pour le prélèvement de l'échantillon du sol | 62 |
| Figure IV.18: | Mesure de la masse totale de l'échantillon de sol | 63 |
| Figure IV.19: | Une batterie de 18 tamis | 65 |
| Figure IV.20: | Le vibrotamis électrique et les refus obtenus des tamis utilisé | 65 |
| Figure IV.21: | Les matériaux utilisés | 67 |
| Figure IV.22: | Essai de perméabilité à charge constante puis à charge variable | 68 |
| Figure IV.23: | Schéma des différents composants du système d'irrigation. | 83 |
| Figure IV.24: | Schéma d'une conduite assurant un débit en route | 84 |
| Figure IV.25: | Schéma du principe de pompage au fil du soleil. | 87 |
| Figure IV.26: | Système de pompage avec stockage | 90 |
| Figure IV.27: | Système de pompage hydraulique (hauteur manométrique totale) | 91 |
| Figure IV.28: | Système de pompage d'eau avec stockage | 92 |
| Figure IV.29: | Critères de choix de pompe selon besoin journalier et HMT. | 93 |
| Figure IV.30: | Schéma synoptique simplifié de pompage PV | 94 |
| Figure IV.31: | Schéma de la configuration des panneaux PV. | 97 |
| Figure V.1 : | La carte Arduino UNO (Arduino, 2023) | 104 |
| Figure V.2 : | Le module Ethernet Shield | 104 |
| Figure V.3 : | Structure de l'architecture du système d'irrigation automatisée | 105 |
| Figure V.4 : | Projet type Système d'irrigation intelligente | 107 |
| Figure V.5 : | Prototype expérimental réalisé | 108 |
| Figure V.6 : | Prototype final réalisé 1 | 108 |
| Figure V.7 : | Prototype final réalisé 2 | 109 |

Liste des tableaux

| | | |
|----------------|---|-----|
| Tableau I.1 : | Avantages et inconvénients de l'irrigation par surface | 7 |
| Tableau I.2 : | Avantages et inconvénients de l'irrigation par aspersion | 8 |
| Tableau I.3 : | Avantage et inconvénient de l'irrigation goutte à goutte | 13 |
| Tableau I.4 : | Les 17 objectifs du développement durable | 20 |
| Tableau II.1 : | La répartition d'eau en profondeur des différents types de sols | 24 |
| Tableau II.2 : | Les normes de la qualité des eaux d'irrigation | 28 |
| Tableau III.1: | Gisement solaire en Algérie selon les localités | 38 |
| Tableau IV.1: | Choix de cultures et assolement | 48 |
| Tableau IV.2: | Station météorologique de ZENNATA | 49 |
| Tableau IV.3: | Moyennes mensuelles des gelés de la station ZENATA 1981-2021 | 53 |
| Tableau IV.4: | Répartition de l'humidité moyenne en % de la station ZENNATA | 55 |
| Tableau IV.5: | Evolution de l'ETP –Pen Mann (mm) moyenne journalière | 56 |
| Tableau IV.6: | Evapotranspiration TURC | 56 |
| Tableau IV.7: | Quotient d'Emberger (NASA,2021) | 59 |
| Tableau IV.8: | Limite des climats d'après l'indice climatique de DEMARTONE | 60 |
| Tableau IV.9: | Valeur de l'indice d'aridité annuelle | 60 |
| Tableau IV.10 | Indice d'aridité mensuelle | 60 |
| Tableau IV.11: | Comparaison des différentes méthodes utilisées | 61 |
| Tableau IV.12: | Les échantillons et leurs profondeurs | 63 |
| Tableau IV.13: | Les caractéristiques de l'échantillonnage | 63 |
| Tableau IV.14: | Les résultats d'humidité de sol | 64 |
| Tableau IV.15: | Type de courbe en fonction de Cu et de Cc | 66 |
| Tableau IV.16: | Résultats des coefficients de HAZEN et de courbure | 66 |
| Tableau IV.17: | Analyse physique du sol (Granulométrie) | 66 |
| Tableau IV.18: | Les résultats des Essais à charge constante | 69 |
| Tableau IV.19: | Les résultats des Essais à charge variable | 69 |
| Tableau IV.20: | La réserve utile des sols | 72 |
| Tableau IV.21: | Réserves utiles et Réserve facilement utilisable du sol | 72 |
| Tableau IV.22: | La réserve facilement utilisable | 72 |
| Tableau IV.23: | Les résultats obtenus par le logiciel CROPWAT | 75 |
| Tableau IV.24: | Résultats du calcul des besoins nets mensuelles en eau | 79 |
| Tableau IV.25: | Estimation des volumes d'irrigation | 80 |
| Tableau IV.26: | Calcul hydraulique de besoins des goutteurs | 80 |
| Tableau IV.27: | Caractéristiques des goutteurs proposés | 81 |
| Tableau IV.28: | Les besoins réduits pour les AGRUMES | 82 |
| Tableau IV.29: | Nombre et longueur de rampe par porte rampe et nombre goutteurs | 83 |
| Tableau IV.30: | Dimensionnement des rampes et portes rampes | 85 |
| Tableau IV.31: | Résultats des besoins en eaux annuels obtenu à partir du logiciel cropwat | 86 |
| Tableau IV.32: | Débit à apporter pour chaque parcelle | 86 |
| Tableau IV.33: | Caractéristiques électriques de la pompe | 93 |
| Tableau IV.34: | Caractéristiques électriques de l'onduleur | 95 |
| Tableau IV.35: | Caractéristiques électriques et mécaniques du module PV | 96 |
| Tableau V.1 : | Devis quantitatif et estimatif d'un système d'irrigation | 99 |
| Tableau V.2 : | Estimatif du cout du système photovoltaïque et énergétique | 101 |

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale :

L'accès à la ressource en eau et aux énergies propres et durables constitue un des défis majeurs du 21ème siècle. Les ressources en eaux et en énergies sont des facteurs essentiellement indispensables à la vie. Ils sont aussi synonymes du développement économique et social durable d'un pays.

L'eau douce liquide représente uniquement 0,6% de la ressource hydrique présente sur terre. Cette ressource indispensable à la vie (boisson, agriculture, industrie, hygiène, etc.) est mal répartie dans le monde. Le changement climatique accentue cette problématique, avec des événements climatiques extrêmes (sécheresse, inondations, vents, etc.) dans certaines parties du monde, qui modifient les écosystèmes et bouleversent les équilibres hydrologiques.

En Algérie, l'évolution économique et sociale est fortement liée à la maîtrise de la gestion de l'eau, l'énergie et l'agriculture. Malheureusement, pour combler les besoins alimentaires, celle-ci se trouve confrontée à la rareté ou la mauvaise gestion de l'eau, vu sa position géographique (région aride et/ou semi-aride). À ceci, s'ajoute la forte croissance de la population et le réchauffement climatique, ce qui implique l'augmentation des besoins en eaux et énergies.

L'agriculture, à elle seule, consomme 70% de la ressource sans oublier la concurrence accrue entre les autres secteurs. À ceci, s'ajoute l'exode rural des jeunes ce qui fait que les terres sont le plus souvent exploitées par de vieux fellahs octogénaires.

Par ailleurs, les sources d'énergie utilisées sont généralement les hydrocarbures et particulièrement le gaz naturel qui se tarissent de plus en plus.

Pour y remédier à cette problématique beaucoup de programmes de recherche sont en cours.

Dans le cas du Sahara, avec la nappe albiennne, l'eau est suffisamment disponible. Cependant, cette eau est saumâtre et très profonde. Dans certaines zones éloignées ou enclavées l'accès au réseau électrique national ou aux énergies fossiles (pétrole ou gaz) est limité, loin, ou très cher à obtenir. Dans ces cas, l'utilisation de l'énergie solaire pour l'irrigation est extrêmement judicieuse. En effet, l'Algérie a un fort potentiel solaire, donc une source énergétique abondante et durable.

Par le recours aux énergies renouvelables et à l'irrigation intelligente on peut donc préserver la ressource en eau et valoriser les terres agricoles. Par ce processus nous aurons une **GESTION RATIONNELLE DE L'EAU** et une **INDÉPENDANCE ÉNERGÉTIQUE**, qui pourrait nous mener à une **AUTOSUFFISANCE ALIMENTAIRE**.

La thématique de notre projet de fin d'étude s'inscrit dans cet optique. En effet, **notre travail consiste à concevoir, dimensionner et réaliser un système d'irrigation goutte à goutte alimenté par énergie solaire photovoltaïque au fil de l'eau. Le système va permettre au fellah d'autopiloter, automatiquement et à distance, à l'aide d'un smartphone son périmètre agricole.**

En effet, la connaissance en temps réel de la teneur en eau du sol permettrait à l'agriculteur de connaître le moment propice à l'irrigation et la quantité en eau dont a besoin la culture. Ceci, se fera en fonction des données climatiques numérisées.

Le système contrôleur intelligent de l'irrigation, appelé **ATAFILAH**, que nous avons conçu et réalisé fonctionne avec une carte **ARDUINO MEGA 2560**, que nous avons programmé avec le **langage C++**, et des capteurs de températures et d'humidité du sol. Le système réalisé est fait de telle sorte à ce que son utilisation sera à la portée de n'importe quel agriculteur.

Le mémoire est organisé comme suite :

Nous débutons par une introduction générale pour exposer la problématique puis nous entamons notre manuscrit ;

- Dans le premier chapitre nous présenterons les différentes techniques d'irrigation leurs avantages et inconvénients ainsi que l'agriculture face à la crise mondiale de l'eau et les solutions liées pour protéger cette ressource.
- Dans le deuxième chapitre nous avons présenté les facteurs agissant sur la croissance des végétaux et la relation plante/sol mais aussi les besoins en eau des différentes cultures.
- Dans le troisième chapitre, nous avons présenté les énergies renouvelables et particulièrement l'énergie solaire photovoltaïque ainsi que la station de pompage.
- Dans le quatrième chapitre nous avons présenté la zone d'étude ainsi que la conception et le dimensionnement du système d'irrigation intelligent.
- Dans le cinquième et dernier chapitre nous présenterons le système intelligent du pilotage de l'irrigation basé la carte ARDUINO MEGA 2560 et les composants de notre système ATAFILAH ainsi que la programmation de celui-ci.

Nous terminons notre manuscrit par une conclusion générale et des perspectives.

CHAPITRE I :

LES DIFFÉRENTES TECHNIQUES D'IRRIGATION ET L'AGRICULTURE FACE À LA CRISE MONDIALE DE L'EAU ET LES SOLUTIONS LIÉES POUR PROTÉGER LA RESSOURCE EAU.

Introduction.

L'expansion d'une population se traduit directement par une hausse des demandes en eau pour l'agriculture, générant ainsi des tensions avec d'autres secteurs tels que l'industrie et la consommation d'eau potable. (Ashraf, 2010)

En outre, la crise climatique met les ressources en eau sous contrainte. L'objectif ultime est d'atteindre une récolte de qualité supérieure et une productivité élevée (C.BROWER, 1990).

I. Définition de l'irrigation.

L'irrigation c'est l'apport d'eau de manière ciblée aux zones agricoles. L'irrigation maintient l'humidité requise pour la croissance des cultures. En effet, l'irrigation peut permettre d'obtenir de deux à cinq fois plus de production, et jusqu'à dix fois plus en zone aride (OLLIER. CH, 1983). Les différentes méthodes d'irrigation sont réparties en 3 grandes classes (Voir fig. I.1) :

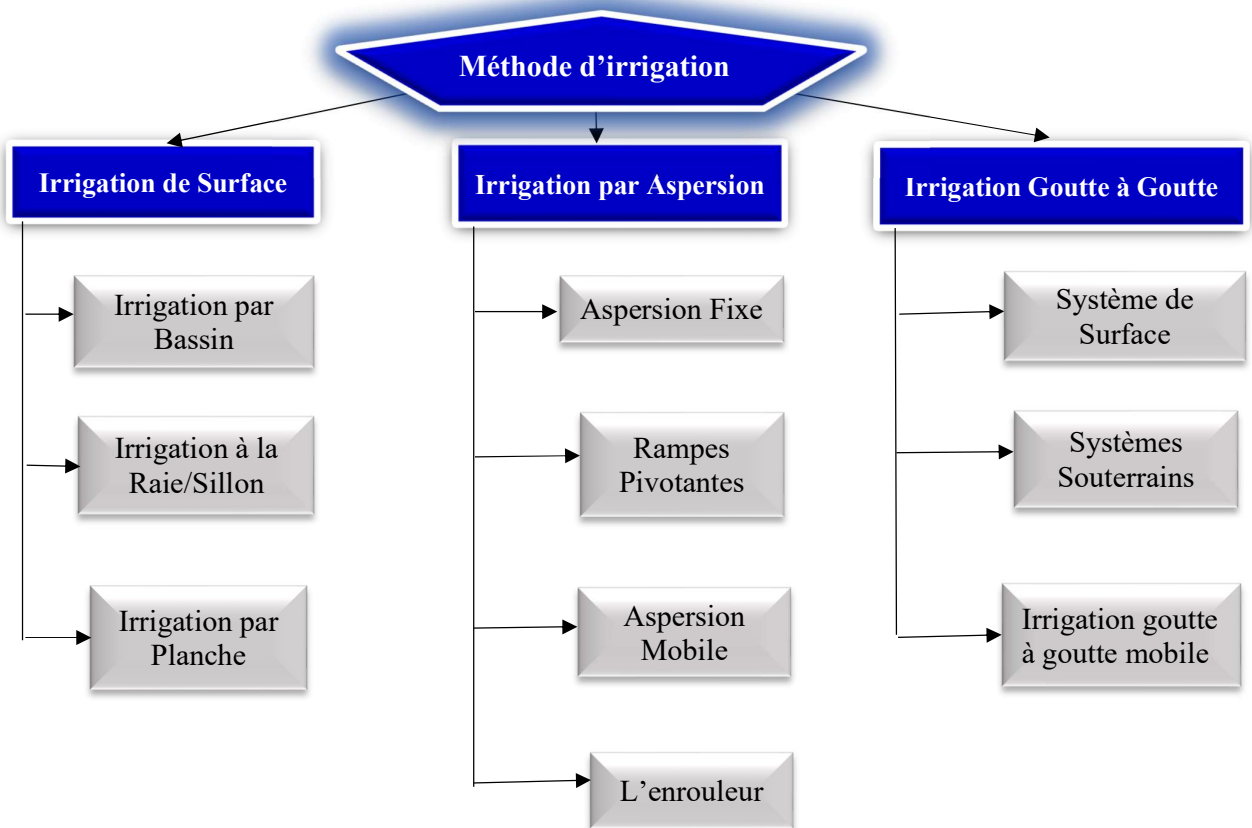


Figure I.1 : Représentation des différentes méthodes d'irrigation.

I.1.1 Irrigation de surface :

C'est l'ensemble des techniques d'arrosage par la répartition de l'eau à la parcelle à l'air libre en épandant de l'eau à la surface du sol. La distinction entre les différentes techniques d'irrigation de surface repose principalement sur la façon dont l'eau est utilisée : ruissellement, submersion ou méthodes combinées (C.BROWER, 1990)

I.1.1.1 L'Irrigation par planche :

Sur un sol incliné, une fine couche d'eau est versée de 0,2 à 3%. La formule de Crevât est utile pour déterminer la longueur de la planche en fonction de l'infiltration du sol (C.BROWER, 1990)



Figure I.2 : Irrigation à la planche (Ahmed Skhiri, 2019)

I.1.1.2 L'irrigation à la raie (ou par rigole).

Les sillons sont séparés d'une distance allant de 0,6 à 1,25 mètres, selon le type de sol et la culture. Elle est utile pour les cultures en ligne et toutes les autres cultures ne supportant pas une submersion prolongée par les eaux de leur feuillage ou de leur collet. (C.BROWER, 1990)



Figure I.3 : Irrigation par sillon ou à la raie (Michel Elkan, 2017).

I.1.1.3 L'irrigation par bassin :

Le processus est mené sur un sol plat avec une pente de 0,1 à 1 %. Après cela, le sol irrigué est rempli. Ensuite, cette couche d'eau s'infiltre lentement dans le sol. (C.BROWER, 1990)



Figure I.4 : Irrigation par bassin (Redaction BANGKOK, 2023)

NB : L'irrigation par bassins n'est pas recommandée pour les cultures qui ne tolèrent pas la submersion par l'eau pendant plus de 24 heures. (C.BROWER, 1990)

La modernisation des systèmes d'irrigation par planches ou par bassins sert à étancher le canal de distribution de l'eau en tête de parcelle et l'équiper de vannes de régulation qui permettent d'alimenter successivement les biefs de ce canal, et de vannes de prises latérales pour les planches ou bassins (A.S.HUMPHERYS, 1987)

Tableaux I.1 : Avantages et inconvénients de l'irrigation par surface

| <i>AVANTAGES</i> | <i>INCONVENIENTS</i> |
|--|---|
| - Investissement initial faible | - Besoin important en main d'œuvre (sauf système moderne) |
| - Besoin en énergie faible ou nul | - Inadaptation aux sols très filtrants |
| - Insensibilité au vent | - Planage nécessaire à la parcelle |
| - Bonne adaptation à l'épandage d'eaux usées épurées | - Pertes d'eau dans les réseaux de canaux |

1.1.2 L'irrigation par aspersion.

Elle imite une pluie fine qui ne noie pas les plantes ou les jeunes pousses. (OOREKA, 2020) Cependant, elle doit être évitée dans les endroits où le vent est fréquent et également lorsque l'eau salée est utilisée pour arroser des cultures aux feuillages sensibles au sel. (C.BROWER, 1990).



Figure I.5 : Irrigation par aspersion d'un champ (AMAZON M, 2019).

L'irrigation par aspersion convient aux cultures en lignes, de plein champ et à l'arboriculture. La distribution de l'eau peut se faire sur ou sous frondaison. (Sulaiman A., 2020).

Tableau I.2 : Avantages et inconvénients de l'irrigation par aspersion

| <i>AVANTAGES</i> | <i>INCONVENIENTS</i> |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> - Possibilité d'arroser tous les types de sols, - Possibilités de réaliser des installations mobiles, susceptible de se déplacer facilitant la rotation culturale, - Si le matériel est automatisé, possibilité de réaliser une irrigation à faible dose et à cadence rapide, - Possibilités de réaliser des installations de protection contre les gelés radiatives au printemps, | <ul style="list-style-type: none"> - Dépenses énergétiques élevées, - Perte par évaporation - Mouillage des feuilles favorisent les maladies cryptogamiques - Possibilités réduite pour l'arrosage avec des eaux résiduaires (formation des aérosols), - Déplacement des matériels difficile dans les zones à culture haute, |

1.1.3 L'irrigation goutte à goutte :

L'irrigation goutte à goutte donne de l'eau à la plante à faible dose, humidifiant ainsi une partie du sol. Cela réduit les pertes par percolation et évaporation. De plus, cela réduit le développement des mauvaises herbes. Dans la plupart des cas, l'automatisation nécessite des contrôleurs liés aux électrovannes, aux vannes volumétriques et/ou hydrauliques. (Monney,

2011) La fréquence des irrigations au goutte à goutte est supérieure à celle des autres techniques (tous les 1 à 3 jours), ce qui maintient une forte humidité du sol, favorable à la croissance des cultures. Ces organes fonctionnent sous une pression d'environ 1 bar et ont des débits de 1 à 8l/h pour les goutteurs ou les gaines perforées, 20 à 60l/h pour les diffuseurs et 35 à 100l/h pour les ajutages calibres. (RNED-HA, 1992). (C.BROWER, 1990).

Ce système minimise l'évaporation du sol en surface, le ruissellement et la percolation profonde en fournissant de l'eau directement à la zone racinaire (Ayars, 1999). Le problème de cette technique est le colmatage des goutteurs. Pour y remédier à ce problème on doit procéder à la filtration de l'eau en amont.

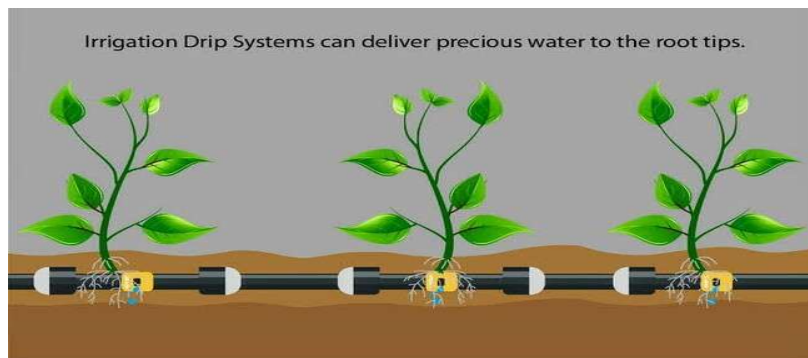


Figure I.6 : Irrigation goutte à goutte (ADOBE, 2023).

I.1.3.1 Cultures recommandées.

L'irrigation goutte à goutte est particulièrement appropriée pour les cultures en ligne (légumes, fruits), l'arboriculture et la vigne. A cause des coûts d'installation élevés, cette technique d'irrigation est réservée aux cultures à haute productivité et de haute qualité. Sur le plan mondial, différents termes sont employés pour décrire cette méthode d'irrigation (FAO, FAO.fr, 2023) notamment :

- **Micro-irrigation :** Terme choisi par CIID (**Téhéran 1976**) en référence aux débits utilisés qui, contrairement aux deux autres techniques plus anciennes, aspersion et irrigation de surface, sont très faibles.
- **Irrigation goutte à goutte :** Terme utilisé par certains auteurs en référence à l'utilisation d'un type particulier de distributeurs : le goutteur.
- **Irrigation localisée :** terme choisi par l'Organisation mondiale pour l'alimentation et l'agriculture (FAO, OAA, 1976) en raison des apports d'eau effectués au voisinage immédiat des plantes. (**MADR, 1994**)

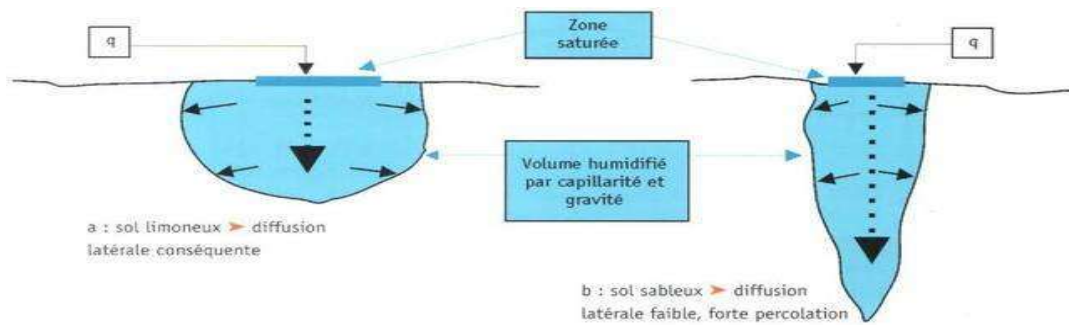


Figure I.7 : Distribution des eaux sous l'irrigation localisée d'un champ (C.BROWER, 1990).

I.1.3.2 Les composantes d'une installation d'irrigation localisée :

I.1.3.2.1 L'unité de pompage :

Elle comprend des appareils nécessaires pour garantir le bon fonctionnement, la sécurité et la protection de l'environnement du réseau. Le conditionnement hydraulique de l'eau, la filtration, la chimigation, la programmation et le comptage sont tous des services assurés. (Léopold. R et Pierre, 1995)

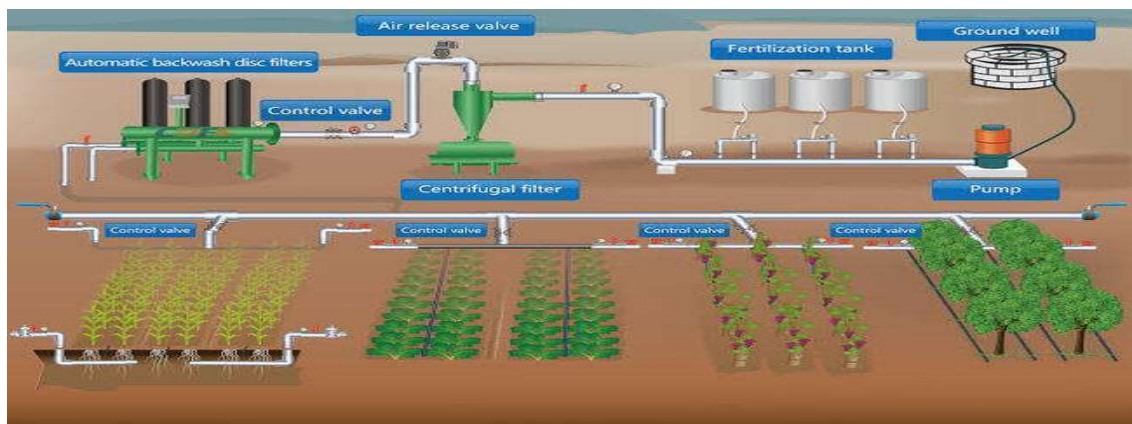


Figure I.8 : L'unité de pompage et la zone irriguée avec l'irrigation localisée (Changsa Dawning, 2022).

❖ La pression hydraulique :

Lorsqu'on installe le réservoir quelques mètres plus haut que la terre à arroser (C.BROWER, 1990). Une pression de gravité suffisante est créée pour irriguer au goutte-à-goutte une petite surface. On peut compenser la diminution de la pression en augmentant la durée des arrosages et en augmentant le diamètre des tubes et des orifices des goutteurs. Il sera ainsi possible d'éviter de placer des régulateurs de pression de précision, en particulier si le terrain est plat et que les canalisations latérales ne sont pas trop étroites ou longues. (MERSC, 2019)

❖ **La mesure du débit :**

En l'absence de valves doseuses ou de débitmètres, la gestion du débit implique d'enregistrer la durée de chaque irrigation en fonction des besoins estimés de la culture, en prenant en compte son stade de croissance et les conditions météorologiques, notamment la pluviométrie et l'évapotranspiration depuis la dernière irrigation. (MERSC, 2019)(Messaitfa,2007).

I.1.3.2.2 **La filtration.**

La filtration sert à éliminer les impuretés qui pourraient obstruer les distributeurs du réseau d'irrigation. (Léopold. R et Pierre, 1995).

❖ **Le filtre à sable :**

Le filtre à sable est un réservoir à pression rempli d'une épaisse couche de sable calibré qui empêche les éléments solides en suspension de passer dans l'eau. Le sable roulé d'une seule granulométrie facilite la filtration (RIEUL LEOPOLD, 2003).

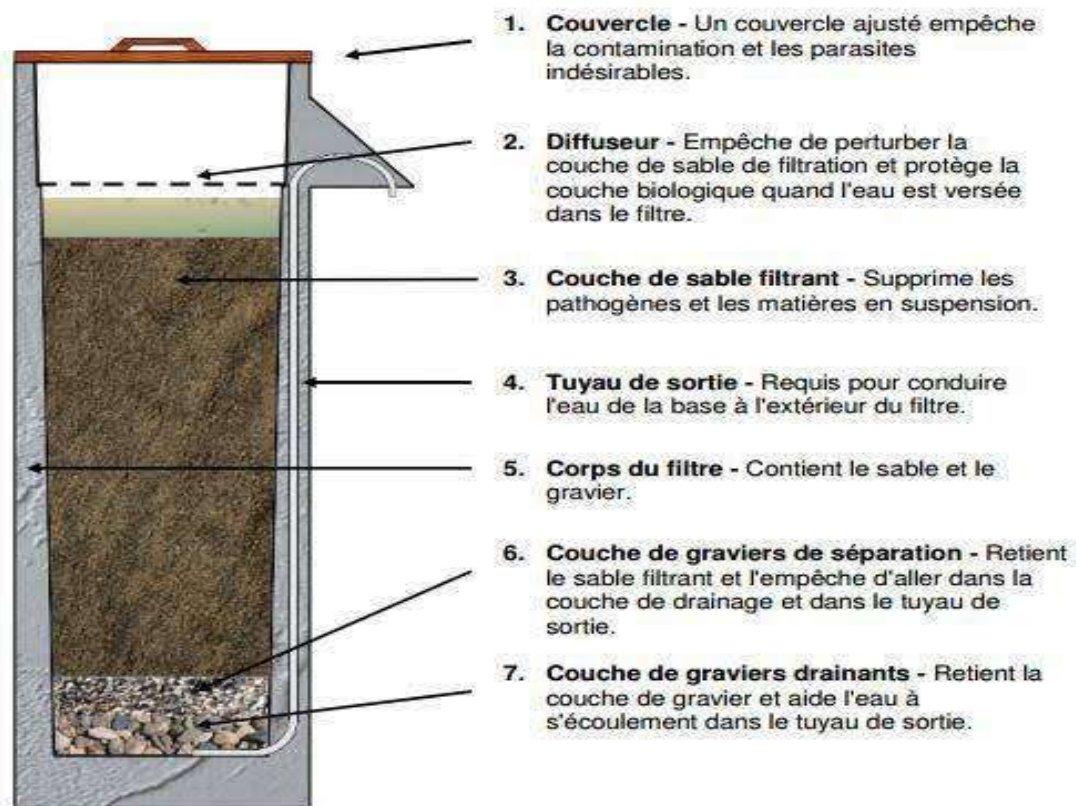


Figure I.9 : Dispositif du filtre à sable réalisé au laboratoire (Wiki Lowtechlab, 2023).

❖ **Les filtre à tamis :**

Les filtres à tamis sont constitués d'un réservoir à pression contenant un tamis ou une paroi filtrante en plastique ou en acier inox avec des mailles de 80 à 250 microns.

Une bonne filtration est obtenue pour une vitesse de passage de l'eau dans le tamis du même ordre de grandeur qu'un filtre à sable, soit 2,8 cm/s (RIEUL LEOPOLD, 2003).

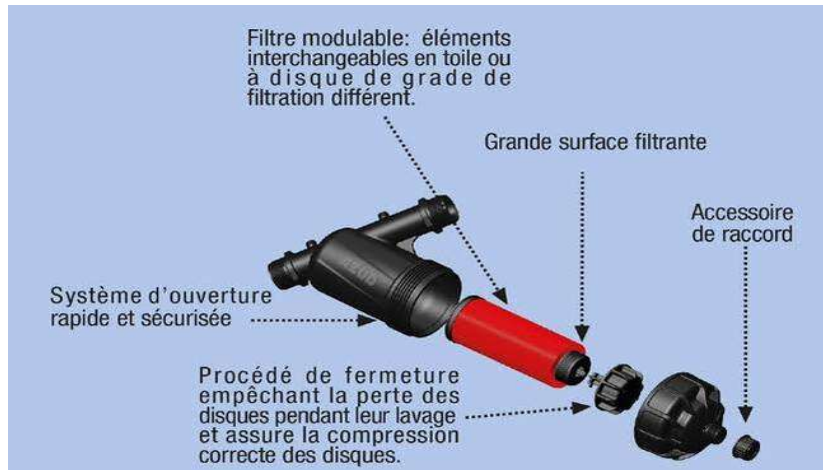


Figure I.10 : Dispositif du filtre à tamis (Wixstatic, 2022).

I.1.3.2.3 **Conduites et rampes.**

❖ **La conduite principale :**

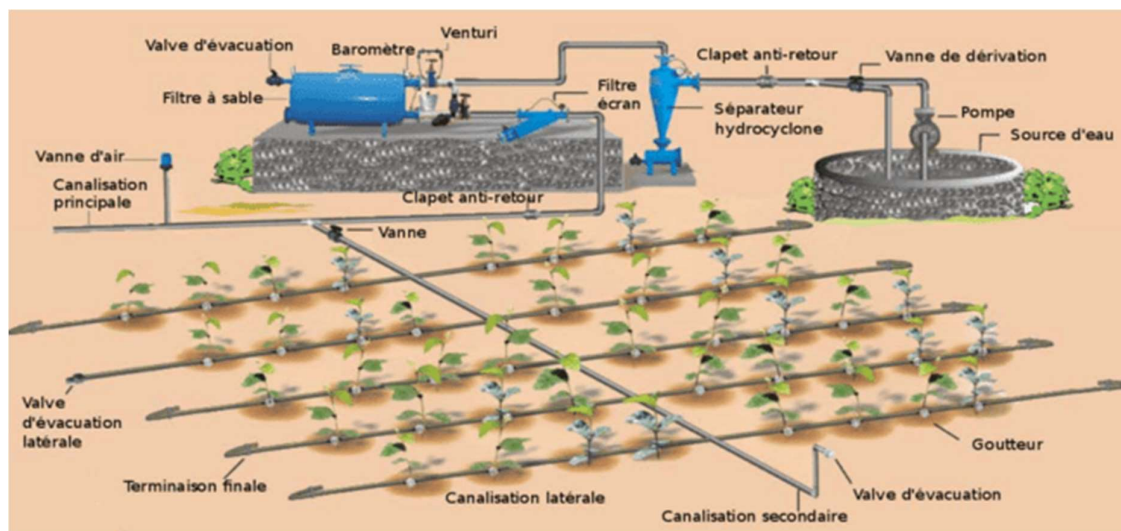
Elle relie la source d'eau aux différentes portes rampes. Amiante ciment, PVC rigide et polyéthylène (PE) à haute densité peuvent être utilisés. (BOYERI, 2013)

❖ **La porte rampes :**

C'est le câble qui alimente les rampes d'un côté ou des deux côtés. Ils peuvent être constitués en PE ou en chlorure de polyvinyle rigide. Les rampes en polyéthylène basse densité (PEBD) ont des distributeurs. Avec un espacement prédéterminé, les distributeurs y sont fixés.

❖ **Les distributeurs :**

Les distributeurs sont une partie importante de l'installation. C'est à partir d'eux que l'eau sort en débits faibles et réguliers à la pression atmosphérique (BOYERI, 2013). On a différents types de distributeurs (Les goutteurs turbulents, Goutteur turbulent intégré, Mini diffuseurs, Gaines).



I.11 : Station en tête de filtration et d'injection d'engrais (Elmercurio, 2015)

I.2 Programmeurs d'irrigation

Ce sont les appareils constituant le système qui automatise l'irrigation de notre périmètre agricole (par heures, secteurs ou zones). Au début de chaque unité ou sous-unité d'irrigation, ils seront généralement placés à côté des électrovannes. De nombreux programmes d'irrigation sont disponibles. Les réservoirs d'engrais et les électrovannes de contrôle les plus simples et les plus complexes peuvent gérer l'ensemble du système d'engrais pour plusieurs secteurs d'irrigation, démarrer et arrêter les pompes, automatiser le nettoyage des filtres, des engrais et des nutriments en fonction des conditions extérieures, contrôler le pH, la conductivité électrique, etc.

Pour contrôler le pH, une sonde régule l'ajout d'acide à la solution nutritive afin de maintenir les indices idéaux aliments et contrôler la quantité totale consommée (Prakor, 2023).

Tableaux I.3 : Avantage et inconvénient de l'irrigation goutte à goutte.

| <i>AVANTAGES</i> | <i>INCONVENIENTS</i> |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> -Convient aux terres désertiques sablonneuses et n'a pas besoin d'être nivelé. - Optimisation d'eau, le rendement de production le plus élevé atteignant 86%. - Très faible besoin en main d'œuvre, - Une plus grande efficacité d'utilisation des engrais est enregistrée. | <ul style="list-style-type: none"> - Problème du blocage fréquent des goutteurs. - Les flexibles sont fréquemment endommagés et doivent être remplacés. - Nécessite des techniciens qualifiés. - Des problèmes d'accumulation de sel |

| | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> - Ne mouille pas le feuillage, ce qui favorable de point de vue phytosanitaire, - Limite la prolifération des adventices, - Convient à presque tous les légumes, fruits et grandes cultures, éloignés les uns, des autres. | <ul style="list-style-type: none"> peuvent survenir autour de la zone d'irrigation. - Coût globalement élevé qui fait réserver cette technique aux cultures à forte valeur ajoutée, - Nécessite un système de filtration d'eau |
|--|---|

I.3 Choix des techniques d'irrigation :

Le choix d'une technique d'irrigation est basé sur un ensemble de critères et de contraintes (Hlavek,1992) :

- La topographie ;
- La réserve en eau (quantité ; débit dont on dispose) ;
- Nature du sol (perméabilité),
- Le type de culture ;
- Facteurs sociologiques et culturels ;
- Rentabilité du projet.
- Les coûts et les bénéfices.

Après examen des avantages et des inconvénients de chaque méthode, il faudrait choisir la méthode d'irrigation qui fonctionne le mieux pour les conditions locales et la culture considérée. L'une des modifications les plus courantes pour économiser de l'eau est de passer de l'irrigation de surface à l'aspersion.

La quantité de précipitations durant une saison de végétation aura également des effets sur l'infiltration de l'eau, tout comme une humidité du sol abondante ou insuffisante (C.BROWER, 1990).

I.4 L'auto-suffisance alimentaire.

L'autosuffisance alimentaire est à la capacité d'une Nation à nourrir de manière autonome sa population, avec les ressources agricoles du pays, sans avoir recours à importer sa nourriture de l'extérieur (MOREAU DEFARGES, 2017) et (Dwight H. Perkins, 2008).

Cette définition met l'accent sur les quatre principales dimensions de la sécurité alimentaire :



Figure I.12 : Quatre piliers de la sécurité alimentaire (CARI FAO, 2015)

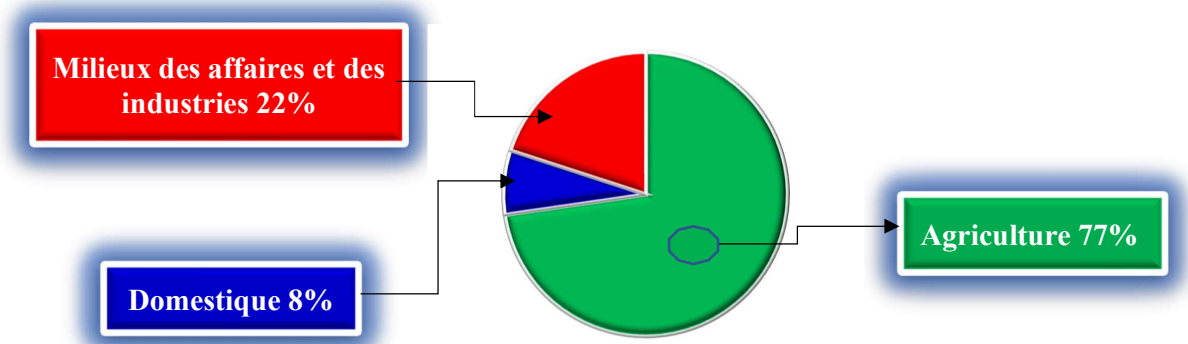


Figure I.13 : Utilisation de l'eau dans le monde.

Tous les pays cherchent à satisfaire la demande nationale, mais ceux qui le peuvent s'efforcent d'exporter leurs surplus agricoles ou la totalité de certaines productions qui ne trouvent pas de débouchés sur le marché national. Certaines cultures de plantations irriguées, souvent héritage d'une colonisation, donnent des produits qui doivent être nécessairement exportés, c'est le cas par exemple de l'Algérie qui doit trouver des clients pour leurs agrumes à titre d'exemple (TUTTIEMPO., 2023) (Couture I, 2006).

I.5 Agriculture intelligente face au changement climatique :

De par le monde, la part de l'eau douce pour l'agriculture est en diminution constante (Cai, 2003). L'agriculture est la plus consommatrice de l'eau douce dans le monde (Calzadilla, 2010). Cependant, il existe une compétition entre l'agriculture et les autres secteurs, en ce qui concerne la consommation en eau, dans les zones arides et semi-arides (De Fraiture, 2010).



Figure I.14 : Réchauffement climatique (AB Conservation, 2022).

L'industrialisation des pays en voie de développement et la croissance mondiale de la population sont les principales causes du réchauffement climatique qui entraîne la sécheresse et le stress hydrique. Ceci implique une crise mondiale de l'eau.

I.5.1 La crise mondiale de l'eau.

Au Maghreb les volumes moyens des précipitations sont estimés à 357 km³/an, soit une lame d'eau de 110mm. Augmentation des terres semi-arides/arides de 5 à 8% (GIEC- IPCC, 2007). Les enjeux liés à l'eau sont cruciaux pour les activités humaines et environnementales dans un contexte de la crise alimentaire mondiale et du changement climatique (Climate.ec.europa, 2023) (Openedition, 2023)

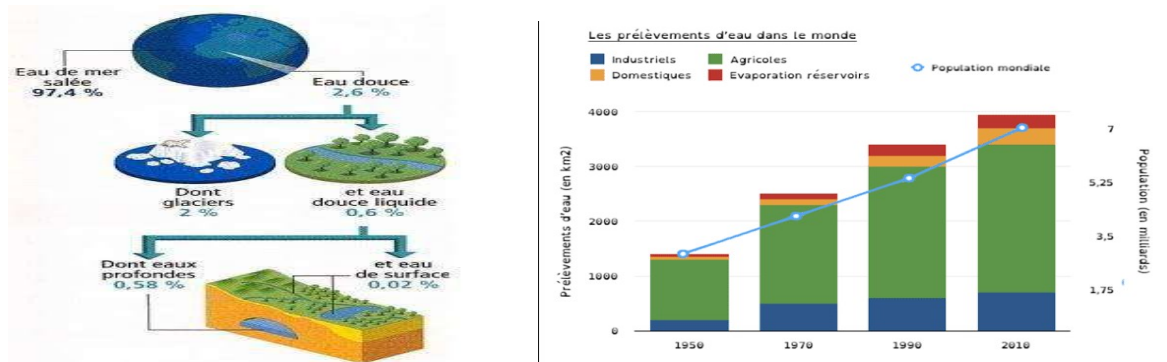


Figure I.15 : Quantité d'eau dans le monde et Consommation d'eau dans le monde (Normandie, 2017).

Cependant, avec la tension en Ukraine et la crise énergétique, de nombreux pays sont fortement consommateurs d'énergies fossiles (non renouvelables), (MEBTOUL, 2019)

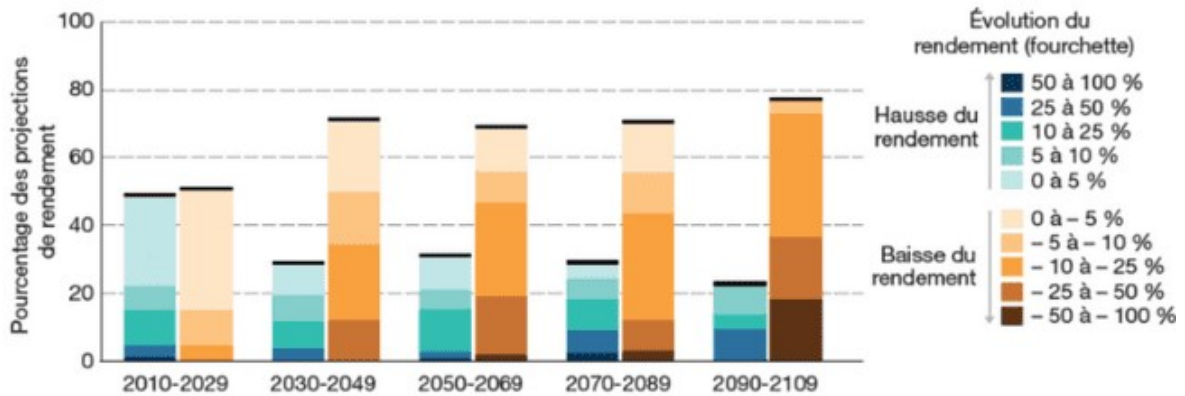
“Une question se pose : aurons-nous assez d'eau, en 2050, pour nourrir les 9 milliards d'habitants de la planète ?”

I.5.2 Solutions face à la crise du changement climatique en agriculture.

En réponse au changement climatique et pour garantir la sécurité alimentaire, il est impératif d'utiliser l'eau de manière efficace et réfléchie dans l'agriculture.

Il est plus que nécessaire d'utiliser, en premier lieu, les eaux conventionnelles et non conventionnelles pour l'agriculture. Par ailleurs, il faudrait les utiliser de manière optimale et de créer un système de gestion circulaire pour compenser le déficit hydrique (Molden, 2003).

Résumé des changements attendus dans le rendement des cultures à cause du changement climatique au cours du XXI^e siècle par rapport aux niveaux de la fin du XX^e siècle



Source : Giec, 2^e groupe de travail, 2014

Figure I.16 : Résumé des changements attendus dans le rendement des cultures d'après (GIEC, 2014)

I.5.2.1 La réutilisation des eaux usées épurées et drainées.

Les eaux usées épurées et de drainage sont utilisées pour l'irrigation. Les boues récupérées sont valorisées et réutilisées pour compenser le manque en matières organiques. L'épuration tertiaire est rare car elle est plus coûteuse. Elle est souvent de niveau secondaire ou primaire et elle sert à l'arrosage des gazons, des arbres fruitiers et des cultures fourragères (REMINI, 2005).

Dans un premier temps, il faudrait capter et utiliser les eaux de ruissellement des pluies. Par ailleurs, il est possible d'utiliser des eaux non conventionnelles, tels que le dessalement et la réutilisation des eaux usées épurées, ainsi que la recharge artificielle des nappes à partir d'eaux usées. (Banque mondiale, 2003 ; Plan Bleu, 2008).

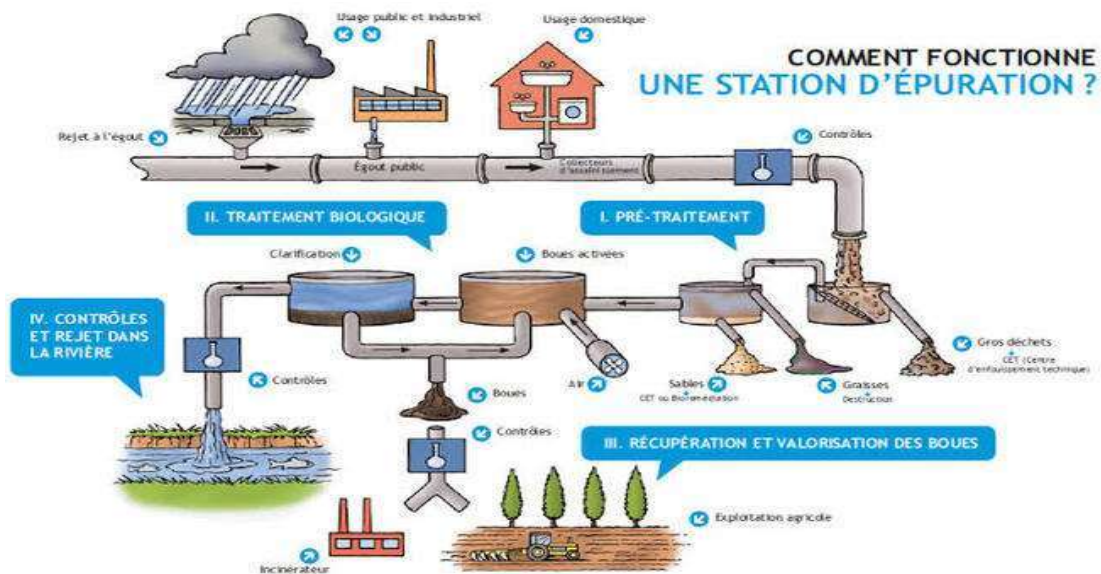


Figure I.17 : Station d'épuration et réutilisation des eaux usées épurées (IDEA, 2022).

Selon l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), il existe trois principaux piliers qui composent l'agriculture intelligente face au changement climatique :

- A. une croissance durable de la productivité et des revenus agricoles.
- B. L'adaptation au changement climatique et le développement de la résilience.
- C. La réduction et/ou l'élimination des GES en favorisant les énergies renouvelables.

Dans ce domaine, des réseaux de capteurs connectés à Internet peuvent être utilisés pour superviser l'environnement des cultures. Des scientifiques ont développé des systèmes d'arrosage automatiques alimentés par l'énergie solaire appelés "intelligents".

I.5.2.2 Système d'arrosage automatique solaire "intelligent".

Cela facilitera la prise de décision pour les agriculteurs en optimisant l'utilisation de l'eau pour l'irrigation ; Ceci, en gérant les intrants et en planifiant les travaux agricoles en temps réel. De plus, ces réseaux peuvent collecter des informations sur la qualité des sols, les niveaux d'humidité, les concentrations de sels minéraux, etc., ce qui permet une meilleure production et un produit de qualité supérieure. Cela aide à lutter contre la pollution de l'air, du sol et de l'eau et à améliorer l'environnement dans son ensemble. Enfin, grâce à l'utilisation de panneaux solaires et de batteries rechargeables, le coût de l'énergie est nul (HELLOWATT, 2023).

I.5.2.3 Agriculture HORS-SOL : (hydroponie, aquaponie)

Cette méthode consiste à nourrir les racines des plantes dans du substrat avec une solution nutritive (fertilisation) ; ce principe permet à la plante d'avoir suffisamment d'oxygène et d'eau pour répondre aux besoins de chaque plante. (Yohan Hubert, 2014) (Blog, 2023).



Figure I.18 : Hydroponie sous de tuyau PVC (HYDROPONIE, 2023).

I.5.2.4 L'agriculture de précision :

L'agriculture de précision est un principe cherchant à mieux tenir compte des variabilités des milieux (Bars, 1997).

Sur le papier, il existe trois avantages à ajuster les apports : économique (en réduisant la facture des intrants), écologique (en limitant le lessivage par exemple) et agronomique (en améliorant les rendements en adaptant les besoins de chaque plante). En pratique, l'agriculteur peut ajuster la dose en fonction des caractéristiques de la parcelle, du rendement de l'année précédente (en utilisant une carte de rendement) ou en temps réel. (Horizons, 2019)



Figure I.19 : Irrigation par pivot (à la ramette) (URBINATI, 2020).

I.5.2.5 L'irrigation déficitaire régulée (IDR).

L'irrigation déficitaire régulée est une autre méthode prometteuse, surtout pour les cultures fruitières. (IDR), qui vise à réduire l'irrigation au cours de stades phénologiques spécifiques sans risque de perte de rendement et de qualité des fruits tels que le pêcher (Girona, 2005) et le pommier (Ebel, 1995)

L'IDR a été initialement proposé pour contrôler la croissance végétative des vergers de pêchers sans affecter la production de fruits. (Chalmers D. M., 1981), les agrumes (González-Altozano, 1999), l'amandier (Romero, 2004)

En outre, une irrigation déficitaire réduit l'apport d'eau de la plante. (Iniesta, 2009) (Moriana, 2003) Cette technique conserve l'eau sans toutefois avoir une influence sur le rendement et la qualité des fruits (Chalmers D. , 1989).

I.5.2.6 Gestion intégrée de la ressource en eau.

La gestion intégrée et durable de l'eau répondra aux défis de la disponibilité de l'eau et de l'alimentation et assurera la sécurité hydrique et alimentaire tout en atteignant les objectifs de développement durable, (Worldwater, 2017)

Tableau I.4 : Les dix-sept objectifs du développement durable (Graine de Paix, 2016).



I.6 Contrôleurs d'irrigation intelligente.

Deux types généraux de contrôleurs sont utilisés pour contrôler les systèmes d'irrigation : les systèmes de boucle de régulation ouverte et systèmes de boucle de régulation fermée.

- **Les systèmes de boucle de régulation ouverte** : Ils appliquent une action prédéfinie. Cela, est fait avec des minuteriers d'irrigation simples.
- **Les systèmes de Boucle de régulation fermée** : Ils reçoivent une rétroaction de capteurs, ils prennent des décisions et appliquent les résultats de ces décisions sur le système d'irrigation (P. Patil, 2013).

Conclusion :

La réutilisation des eaux usées, un choix adéquat de la méthode d'irrigation et une répartition intelligente et efficace des ressources en eau est plus qu'indispensable pour y remédier au problème de sécheresse et pour améliorer le rendement et la qualité des produits agricoles.

L'irrigation intelligente permet la création d'emploi, facilite le travail aux agriculteurs et aide les Nations à atteindre une autosuffisance alimentaire.

Enfin, l'irrigation de surface est de loin la méthode d'irrigation la plus répandue. Les méthodes d'irrigation par aspersion et par goutte à goutte pourraient être les plus appropriées pour les zones arides et semi-arides.

CHAPITRE II :

RELATION ENTRE LA PLANTE, LE SOL ET LES BESOINS EN EAU DES DIFFÉRENTES CULTURES.

Introduction

Dans ce chapitre nous aborderons les éléments de bases concernant le sol, l'eau, la plante et les relations entre eux ; Ceci, dans une perspective agronomique. La notion d'évapotranspiration regroupe les deux processus, à savoir l'évaporation directe de l'eau du sol et la transpiration par les plantes.

Comme tous les organismes vivants, les plantes ont besoin pour vivre et se développer de chaleur et d'humidité. La chaleur issue du rayonnement solaire et ses variations qui règlent en grande partie la répartition des organismes à la surface de la terre.

II. Processus de transfert d'eau dans le végétal.

L'eau absorbée par les racines, circule sous forme liquide à travers le système vasculaire, passant par le tronc, les branches et les feuilles, pour finalement être libérée par transpiration par les pores stomatiques des feuilles, (= 90% de la transpiration totale).

La transpiration est influencée par la photosynthèse, dépendant du rayonnement solaire. Elle joue également un rôle dans la régulation de la température de la plante (Ahmed Skhiri, 2015).

II.1. Facteurs qui agissent sur la consommation d'eau :

II.1.1. Facteurs climatiques :

- La température et l'humidité de la région.
- Pluviométrie : (les périodes de pluie ou les périodes sèches).
- Durée de l'ensoleillement : la croissance et le niveau de production des plantes dépendent grandement de la quantité de soleil que la culture reçoit par jour.

❖ Facteurs physiologiques :

Ils sont liés à la plante elle-même. On distingue :

- La nature de la plante : certains végétaux adaptés aux milieux secs transpirent beaucoup moins que d'autres.
- L'âge et la vigueur des feuilles : les feuilles saines en plein développement évaporent plus que les feuilles jeunes, ou que celles qui dépérissent.

Les terres les plus fertiles seront destinées aux cultures de légumes, de betteraves à sucre, de maïs, de cotonniers, etc... tandis que les sols escarpés peuvent être adaptés pour la culture de vigne et d'arbres fruitiers. (Pantes-et-eau, 2023) (Ahmed Skhiri, 2015)

➤ **Humidité du sol :**

- Si la teneur en eau du sol est inférieure à la teneur minimale (point de flétrissement) : les racines ne parviennent plus à tirer l'eau du sol.
- Si la teneur en eau du sol est égale ou supérieure à la teneur minimale ; la transpiration cesse, le feuillage flétrit et la plante meurt.

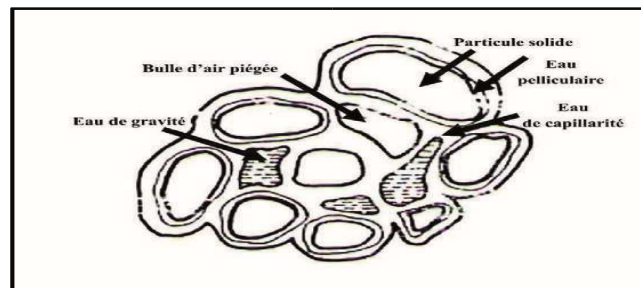


Figure II.1 : Représentation simplifiée des différents types d'eau dans un agrégé de sol (Ahmed Skhiri, 2015).

II.1.2. Potentiel de l'eau.

Le potentiel exprime l'intensité des forces qui retiennent l'eau dans le sol et, par conséquent, l'importance du travail qu'il faudra fournir pour extraire cette eau.

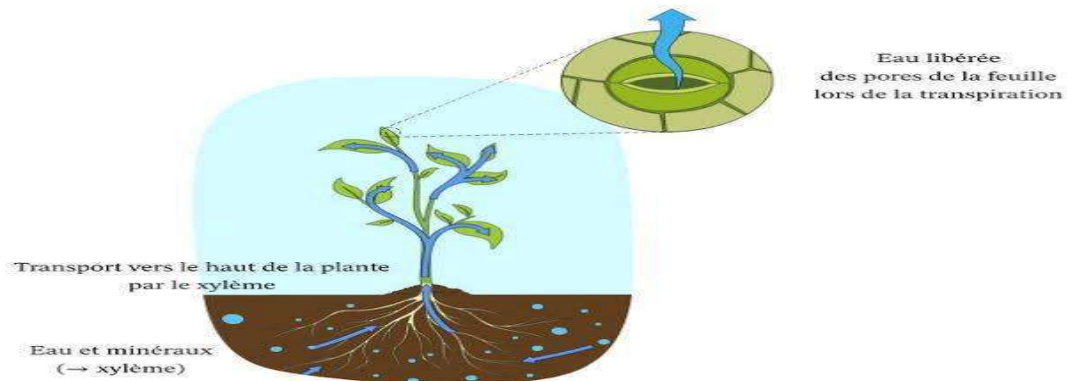


Figure II.2 : Potentiel de l'eau (TUZET, 1990) .

II.2. Les besoins en eau des cultures.

Les besoins d'eau pour l'irrigation dépendent du type de culture, de la méthode d'irrigation et des facteurs météorologiques (température, humidité, vitesse du vent, évaporation du sol et

Chapitre II : Relation entre la plante, le sol et les besoins en eau des différentes cultures.

saison de l'année). Cependant, l'expérience locale et la pratique sont toujours très importantes pour une évaluation des besoins. (OLLIER. CH, 1983)

Le pourcentage en poids d'eau dans la plante peut atteindre 95% (arbres 60%, céréales 75%, légume 90%, fruits et salades 95%).

Tableau II.1 : la répartition d'eau en profondeur des différents types de sols (Ahmed Skhiri, 2015).

| <i>Profondeur</i> | <i>Limon sableux</i> | <i>Limon argileux</i> | <i>Terre humifère</i> |
|-------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| De 0 à 30 cm. | 17.65 % | 22.67 % | 44.72 % |
| De 30 à 60 cm | 14.49 % | 19.78 % | 21.24 % |
| De 60 à 80 cm | 10.67 % | 18.16 % | 21.29 % |

Sur les sols à texture légères, la distance entre les goutteurs est de l'ordre de 0.7 à 1 m, alors que, sur les sols argileux cette distance peut être de 1.5 m. Le débit du goutteur utilisé en agrumiculture varie de 4 à 10l/h. Les agrumes puisent leurs besoins en eau du sol lorsque les conditions le permettent. Le secteur des agrumes est un grand consommateur d'eau avec des besoins compris entre 1200 et 1500mm/ans. La période d'irrigation s'étale généralement de mars à octobre dans le climat méditerranéen. (maison des agrumes, 2012)

II.2.1. L'évapotranspiration (ET).

Ensemble des phénomènes et des flux d'évaporation physique et de transpiration biologique, notamment de la végétation, qui interviennent dans le bilan d'eau d'un territoire, d'un hydro système terrestre, comme facteur de flux sortant. (boudjellal_samia, 2023)

La Quantité d'eau transférée du sol vers l'atmosphère par évaporation et transpiration des plantes.

L'évapotranspiration (ET) = Evaporation (Evaporation des surfaces d'eau libre et l'eau contenue dans le sol et dans les plantes + Transpiration (Transpiration des végétaux émanant de leur feuillage).

II.2.2. Méthodes déterminant l'évapotranspiration.

II.2.2.1. Les méthodes directes.

Elles sont principalement de trois types :

- ❖ L'évapotranspiromètre ou cuve lysimétrique : Il sert à mesurer l'évapotranspiration en un lieu donné du sol nu ou couvert végétal.

- ❖ L'évaporomètre de Piche : Il s'agit d'un tube de verre rempli d'eau et fermé à son extrémité inférieure par une rondelle de papier buvard. La tranche d'eau évaporée à partir de celle-ci se lie directement sur les graduations du tube. (Bensafi, 2021)
- ❖ Le bac évaporant : Cet appareil très simple permet de mesurer directement l'évapotranspiration d'une nappe d'eau libre. Sous réserve qu'il soit correctement installé, il permet d'obtenir une bonne estimation de l'ETP.



Figure II.3 : Le bac évaporant (FAO, 2012)

II.2.2.2. Les méthodes de détermination de l'ETP par les formules empiriques

II.2.2.2.1. Formule de THORNTHWAITE.

$$ETP = 16 \left(10 \frac{t}{I}\right)^a K$$

Avec :

ETP : en mm

T : Température moyenne (°C),

I : Indice thermique annuel ($I = 121i$),

i : Indice thermique mensuel, avec $i = \left(\frac{t}{5}\right) 1.5$,

a : Simplification apporté par Serra $a = \left(\frac{1.6}{100}\right) * I + 0.5$,

K : Coefficient d'ajustement mensuel.

II.2.2.2.2. Formule de TURC.

- ✓ Si l'humidité relative de l'air est supérieure à 50 %, l'évapotranspiration potentielle est donnée par : mm/MOIS

$$ETP = 0.4(Ig + 50) \cdot \left(\frac{t}{t + 15}\right)$$

Avec :

T : Température moyenne mensuelle en °C,

Ig : Radiation globale du mois considéré en (cal/cm²/j),

Selon TURC, le coefficient 0,40 est réduit à 0,37 pour le mois de février.

- ✓ Si l'humidité relative de l'air est inférieure à 50%, l'ETP est donné par :

Chapitre II : Relation entre la plante, le sol et les besoins en eau des différentes cultures.

$$ETP = 0.4(Ig + 50) \cdot \left(\frac{t}{t + 15}\right) \cdot \left(1 + \frac{50 - hr}{70}\right)$$

Avec :

T : Température moyenne de la période considérée en °C.

hr : L'humidité de l'air en %

Ig : Radiation globale en (cal/cm²/jour)

Tel que :

$$I_g = I_{g_A} \times \left(0.18 + 0.62 \times \frac{h}{H}\right)$$

Avec :

I_{g_A} : Radiation maximale théorique

h : Durée astronomique de jour en (heure / mois)

H : la durée d'insolation en (heure / mois)

Remarque :

Pour le mois de février le coefficient 0,40 est réduit à 0,37.

II.2.2.2.3. **Formule de TURC réelle.**

$$ETr = P / \sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}$$

$$L = 300 + 25t + 0.05t^3$$

$$P : \text{hauteur annuelle des pluies en mm} \quad P = \sum_{i=1}^{12} P_i$$

$$T : \text{température moyenne annuelle } ^\circ\text{C} \quad t = \frac{\sum_{i=1}^{12} t_i}{12}$$

II.2.2.2.4. **Méthode de BLANEY-GRIDDLE :**

La méthode de BLANEY-GRIDDLE est basée sur la relation entre la consommation d'eau des plantes, la température moyenne mensuelle, la longueur moyenne mensuelle du jour, les précipitations et du type de plantes représentées par leur coefficient cultural K_c . L'équation de BLANEY-GRIDDLE est :

$$ETP = Kc \cdot (8,13 + 0,45t)P$$

t : Température moyenne (en degré Celsius) durant la période considérée (généralement le mois) ;

P : Pourcentage de la durée moyenne du jour pendant la même période, par rapport à la durée moyenne du jour pour l'année ;

Le coefficient K_c est exprimé par le rapport ETP/ETM et définit le rythme de consommation d'eau de la culture. Il est déterminé expérimentalement pour chaque type de plante.

L'ET varie en fonction de la physiologie de la plante

- Si $P > ETP$ alors $ETR = ETP$ ou Si $P < ETP$ alors $ETR = P + RU$
- Mais si $ETR < P$ alors il y a un surplus hydrologique qui va alimenter la RU et l'écoulement ou $ETR = 0$ quand P et $RU = 0$

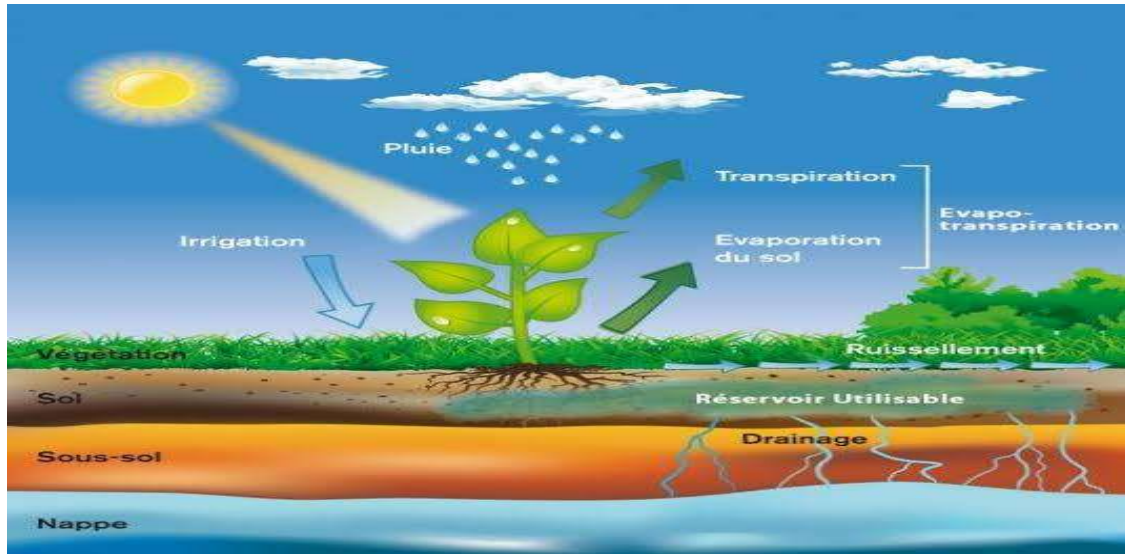


Figure II.4 : Cycle de l'eau à l'échelle du sol (INRAE, 2023)

II.3. Le bilan hydrique.

L'équation du bilan hydrique se fonde sur l'équation de continuité et peut s'exprimer comme suit, pour une période et un bassin donné :

$$P + S = R + ETP + (S + \Delta S)$$

P : précipitations [mm],

S : ressources (accumulation) de la période précédente (eaux souterraines, humidité du sol, neige, glace) [mm],

R : ruissellement de surface et écoulements souterrains [mm],

E : évapotranspiration [mm],

$S + \Delta S$: ressources accumulées à la fin de la période [mm].

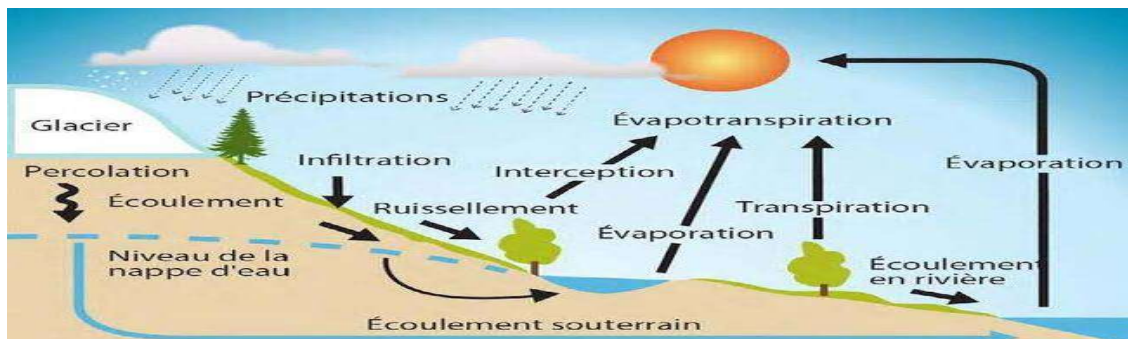


Figure II.5 : Cycle de l'eau global lié au déficit hydrique (Gagnon et Gangbazo, 2007).

II.4. Normes de qualité des eaux d'irrigation.

Les normes varient selon les pays, mais dans la majorité des pays on fait référence, à quelques exceptions près, aux cinq critères de qualité sus cités (HORNING H M., 1973). Les agrumes sont sensibles à la salinité. Une eau de bonne qualité ne doit pas contenir plus de 1.5 de résidu sec par litre et un taux de chlorure de sodium inférieur à 1g/litre est recommandé. Les agrumes craignent la stagnation d'eau qui cause l'asphyxie des racines et la maladie de gombose pour certaines portes greffe.

Tableau II.2 : Les normes de la qualité des eaux d'irrigation (Ahmed Skhiri, 2019)

| Types de problèmes | Sévérité du problème | | |
|--------------------------------------|----------------------|------------|--------|
| | Aucune | Légère | Elevée |
| Salinité : | | | |
| • Conductivité (mS/cm) | < 0,75 | 0,75 – 3 | > 3 |
| • Matières dissoutes totales | <700 | 700 – 2000 | > 2000 |
| SAR (Sodium absorption Ratio) | < 3 | 3 – 9 | > 9 |
| Alcalinité ou dureté | 80 – 120 | ----- | >200 |
| PH (risque de colmatage) | < 7 | 7 – 8 | >8 |
| Fe mg/l (risque de colmatage) | < 0,2 | 0,2 – 1,5 | >1,5 |
| Mn mg/l (risque de colmatage) | < 0,1 | 0,1 – 1,5 | >1,5 |

II.5. Solutions :

Le lessivage est la technique qui permet le retrait des sels en dessous des zones racinaires par l'application d'une quantité d'eau dépassant celle du besoin de la culture. D'où, la nécessité de sélectionner les plantes tolérantes à la salinité. Nous citerons d'autres techniques de la gestion de la salinité :

II.5.1. Gestion des résidus.

Les résidus de la récolte bien dispatchés à la surface des sols est un moyen efficace pour la réduction de l'évaporation et par conséquent, la réduction de la remontée capillaire de la salure vers la zone racinaire. Une couverture de 30 à 50% de sol s'avère efficace à cet effet.

II.5.2. La pré – irrigation.

Comme mentionner tantôt, les plantes sont plus sensibles au phénomène de la salinité au stade de la germination et de l'émergence, par conséquent, tout apport de l'eau avant la semence ou le repiquage (pré-irrigation ou lessivage) offre un moyen de lutte contre les effets nocifs de la salinité. Pour que la pré-irrigation soit efficace le sel doit être lessivé au-delà de 15 à 30cm de la zone racinaire.

II.5.3. La gestion de la fréquence d'irrigation.

Les sels sont efficacement lessivés du profil de sol sous une fréquence élevée d'irrigation (intervalle réduit d'irrigation). La gestion de l'humidité significative entre les intervalles d'irrigation permet aussi la dissolution effective de sels et son lessivage de la zone racinaire. (HELPFUL, 2021).

II.5.4. Les fertilisants.

Les fertilisants sont des composés employés en agriculture pour améliorer la teneur en éléments nutritifs du sol et stimuler la croissance des plantes. L'acronyme NPK désigne les trois principaux nutriments essentiels à la croissance des végétaux : l'azote (N), le phosphore (P) et le potassium (K). Voici une vue d'ensemble de l'importance de chaque fertilisants NPK :

II.5.4.1. Azote (N) :

Les engrais à forte teneur en azote favorisent la croissance des feuilles et des tiges, ce qui revêt une importance particulière pour des cultures comme le maïs, le blé et le riz. (Fertival Maroc, 2023) et (BIO enligne, 2023).

II.5.4.2. Phosphore (P) :

Le phosphore est essentiel à la croissance des racines des plantes, ainsi qu'à la production de fleurs et de fruits. Les plantes qui manquent de phosphore peuvent être petites et avoir des racines peu développées. Les fertilisants riches en phosphore peuvent améliorer la croissance des racines et des fleurs, ce qui est particulièrement important pour les cultures telles que les carottes, les pommes de terre et les tomates (MAPAQ GOUV, 2023).

II.5.4.3. Potassium (K) :

En mettant l'accent sur le développement des tiges et des racines, le potassium joue un rôle essentiel dans la croissance générale des plantes. Il renforce également la résistance des plantes aux maladies et aux contraintes environnementales telles que la sécheresse et le froid. Sa présence est cruciale pour des cultures comme les bananes, les agrumes et les pommes. (BIO enligne, 2023).

Conclusion :

Nous retenons donc, que les données de base de l'irrigation sont imposées par :

- La relation entre l'eau, le sol et la plante qui est un aspect crucial de la culture.
- La gestion de l'irrigation en fonction de l'évapotranspiration de la culture. En effet, une gestion de l'irrigation efficace est essentielle pour assurer une croissance

CHAPITRE III :

LES ÉNERGIES RENOUVELABLES ET LA STATION DE POMPAGE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE.

Chapitre III : Les énergies renouvelables et la station de pompage solaire photovoltaïque.

Introduction

L'une des solutions partielles à la crise mondiale du réchauffement climatique est la réduction des gaz issues de la combustion des énergies fossiles et d'accroître l'utilisation des énergies renouvelables.

Plusieurs secteurs se retrouvent au cœur d'une transformation énergétique. L'agriculture est un des secteurs primordiaux, en raison de la croissance démographique et de son importance quant à la sécurité alimentaire. À ce propos, l'état algérien a tenté ces dernières années d'inciter les agriculteurs, par le biais de subventions, à utiliser les énergies renouvelables. Ceci, afin de créer un équilibre entre la productivité des cultures et le maintien de la stabilité économique, tout en minimisant l'utilisation de ressources fossiles limitées et leurs impacts environnementaux négatifs. (K. Gairaa, 2010).

III. Les énergies renouvelables.

III.1. Définition.

Les énergies renouvelables (EnR), sont parfois appelées « énergies vertes » ou « énergies propres », par abus de langage. Les EnR sont dites renouvelables, car en dehors des avantages écologiques, elles sont durables (YOUMATTER World, 2023).

III.2. Les différents types d'énergies renouvelables.

Les différentes EnR sont : le solaire, les éoliennes, l'hydraulique, la biomasse et la géothermie.

III.2.1. Énergie solaire.

Cette énergie est issue directement de la captation du rayonnement solaire.

Il se fait selon deux principaux modes de fonctionnement :

- Solaire photovoltaïque (panneaux solaires photovoltaïques) : l'énergie solaire est captée en vue de la production d'électricité.
- Solaire thermique (chauffe-eau solaire, chauffage, panneaux solaires thermiques) : la chaleur des rayons solaire est captée est rediffusée, (YOUMATTER World, 2023).

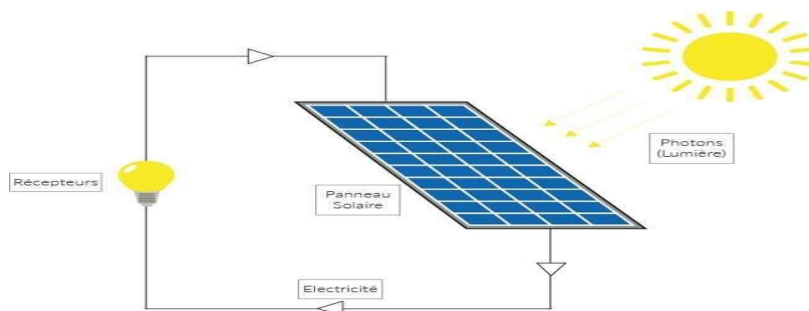


Figure III.1 : Energie solaire photovoltaïque (FSPV, 2023)

III.2.2. Énergie éolienne.

L'énergie cinétique du vent entraînera un générateur qui produit de l'électricité. On distingue plusieurs types notamment les éoliennes terrestres, les éoliennes off-shore, les éoliennes flottantes (YOUMATTER World, 2023).

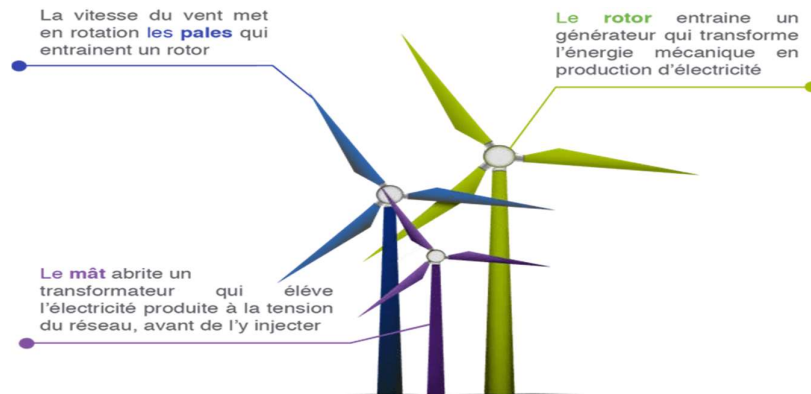


Figure III.2 : Schéma du fonctionnement d'une station éolienne (EcoInfos, 2023)

III.2.3. Énergie hydraulique.

L'énergie cinétique de l'eau (fleuves et rivières, barrages, courants marins) actionne des turbines génératrices d'électricité (YOUMATTER World, 2023).

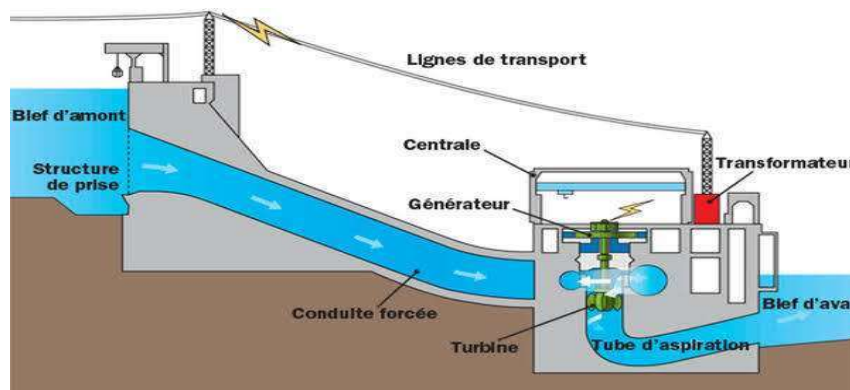


Figure III.3 : Schéma d'une station hydroélectrique. (Hydroélectricité, 2023)

III.2.4. Biomasse.

L'énergie est obtenue de la combustion de matériaux dont l'origine est biologique.

On retrouve trois catégories principales :

- Le bois
- Le biogaz et les biocarburants (YOUMATTER World, 2023)

Chapitre III : Les énergies renouvelables et la station de pompage solaire photovoltaïque.

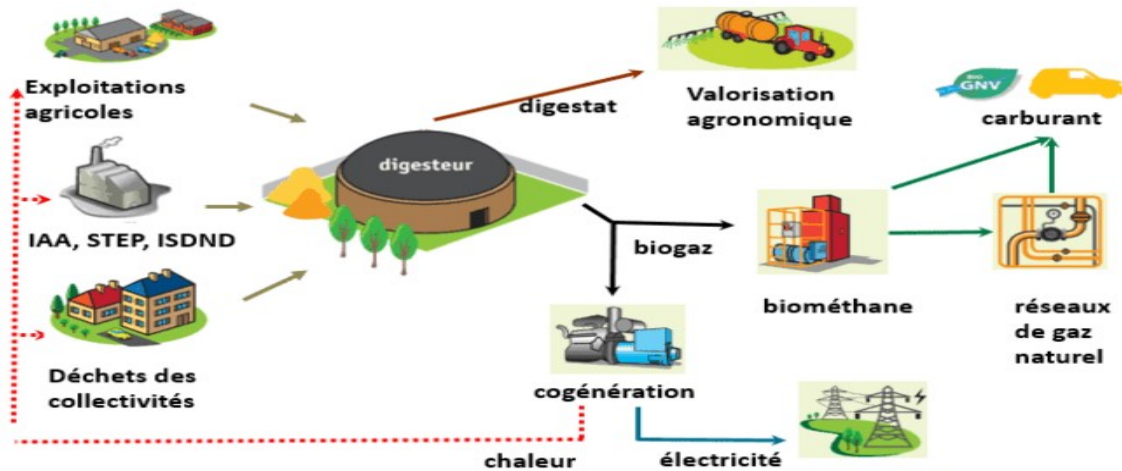


Figure III.4 : Schéma d'une station de biomasse et ses filiales (ATEE, 2023)

III.2.5. Géothermie.

Obtenu de la chaleur émise par la Terre et stockée dans le sous-sol. Selon la ressource et la technologie mise en œuvre, les calories exploitées sont converties en électricité (YOUMATTER World, 2023).

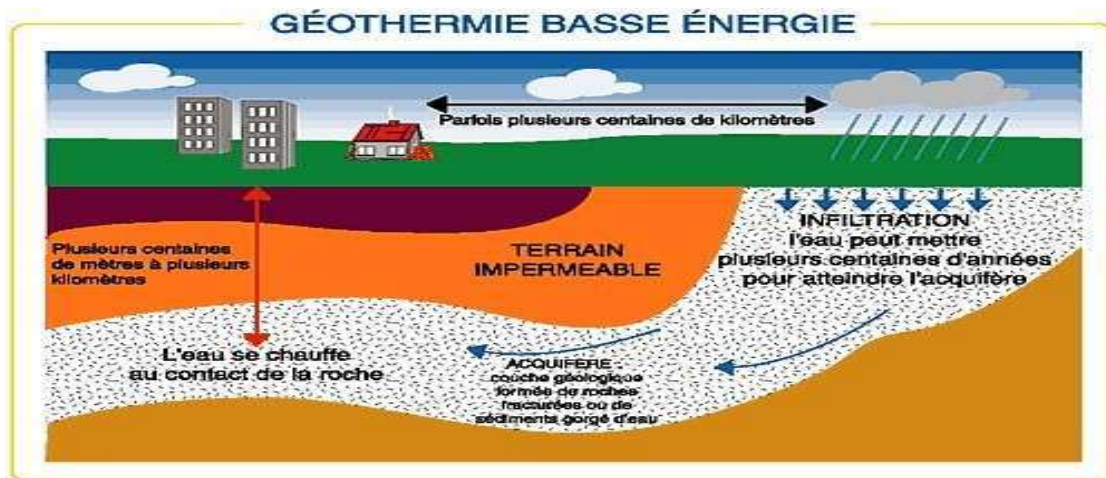


Figure III.5 : Schéma d'une Géothermie basse énergie (énergie, 2022)

III.3. Système photovoltaïque.

III.3.1. Le rayonnement solaire.

Le rayonnement solaire est un flux électromagnétique caractérisé par une vitesse, une fréquence et une longueur d'onde, l'atmosphère absorbe une partie (environ de 15%) sous forme de rayonnement diffus. L'atmosphère réfléchit un autre vers l'espace (environ de 6%), le rayonnement global au niveau du sol, l'énergie reçue par une surface dépend non seulement de la saison, mais aussi de la latitude, des conditions météorologiques, du degré de pollution et de l'orientation de la surface, etc. (Cherifi Younes, 2015)

Chapitre III : Les énergies renouvelables et la station de pompage solaire photovoltaïque.

Pour trouver la position du soleil dans le ciel :

On utilise les équations avec les coordonnées horizontales ou coordonnées équatoriales, mais il existe des sites internet qui facilitent l'obtention de ces coordonnées sans difficultés des calculs (Cherifi Younes, 2015).

Exemple : www.sunearthtools.com (Sunearthtools, 2023)

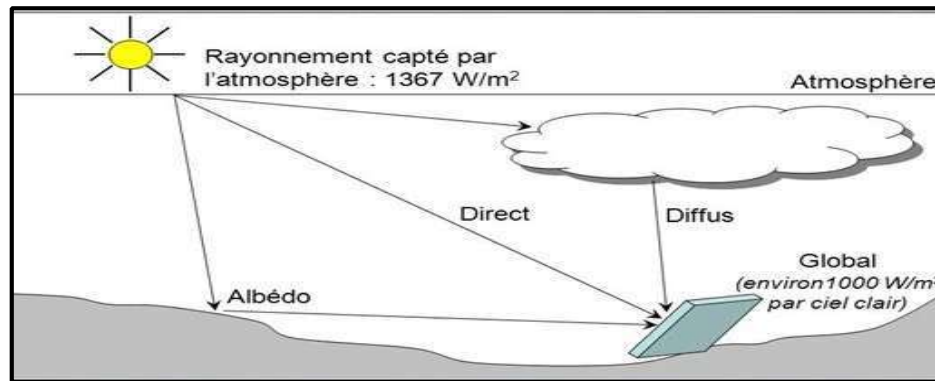


Figure III.6 : Composant du rayonnement solaire (Lauger A. et Roger A., 1981)

III.3.2. Principe de fonctionnement.

Un système photovoltaïque (PV) est un ensemble d'éléments de production d'électricité utilisant l'énergie solaire. Ces composants sont essentiellement : le champ PV, le régulateur de charge, le système de stockage (dans certains cas), l'inverseur de courant (DC /DC ou/et DC/ AC), et la charge (AZOUI, 2020).

La lumière solaire entre par la surface des modules photovoltaïques, où elle est convertie en énergie électrique de DC (générateur photovoltaïque). Plus tard, cette énergie est collectée et conduite au système de régulation de charge (régulateur) dont la fonction est d'envoyer cette énergie de manière totale ou partielle au système de stockage (batterie), où elle est stockée avec la précaution de ne pas excéder les limites requises. (Salvador UNMUNDO, 2023).

Chapitre III : Les énergies renouvelables et la station de pompage solaire photovoltaïque.

Quand les charges à alimenter sont de courant continu, elles s'alimentent de manière directe. Quand les charges sont de courant alternatif, l'énergie s'envoie à un inverseur de courant où elle est convertie en courant alternatif (onduleur) (Salvador UNMUNDO, 2023).

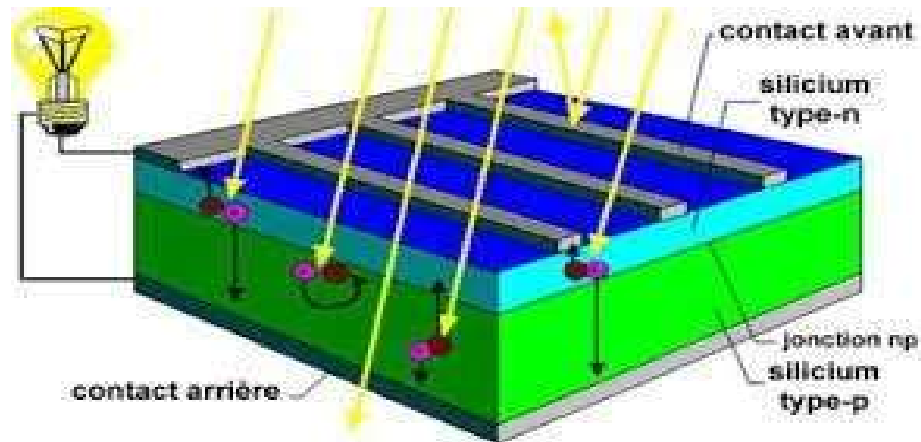


Figure III.7 : Principe de la conversion photovoltaïque (Salvador UNMUNDO, 2023)

III.3.3. Modèle d'une cellule solaire et schéma électrique équivalent :

Il est courant de considérer une cellule photovoltaïque comme un générateur de courant électrique avec un comportement similaire à celui d'une source de courant shuntée par une diode. Le modèle est complété par deux résistances, une en série R_s et une en parallèle R_p , comme le montre le schéma équivalent (figure III.8) (ABBASENL, 2011).

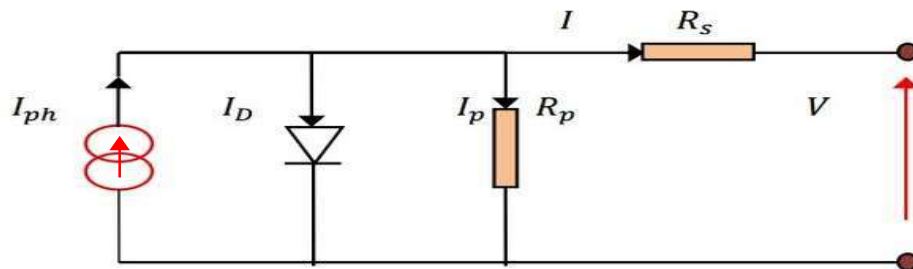


Figure III .8 : Schéma équivalent de cellule PV (ABBASENL, 2011)

III.3.4. Module et panneau photovoltaïque.

Le module PV est un ensemble de cellules photovoltaïques assemblées, électriquement, soient série et/ou en parallèle pour produire des tensions et/ou des courants plus élevés. Les assemblages sont définis comme suit (MEFLAHA, 2012) :

III.3.4.1. Associations en série.

Plusieurs cellules PV sont montées en série pour obtenir la tension voulue (Lazizi ALdjia, 2019)



Figure III.9 : Schéma d'un montage en série des panneaux solaires (Lesolaire, 2023).

III.3.4.2. Association parallèle.

Plusieurs cellules PV sont montées en série pour obtenir le courant voulu



Figure III.10 : Schéma d'un montage en parallèle des panneaux solaires (Lesolaire, 2023).

III.3.4.3. Association hybride (en série et en parallèle).

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est à dire en série-parallèle.

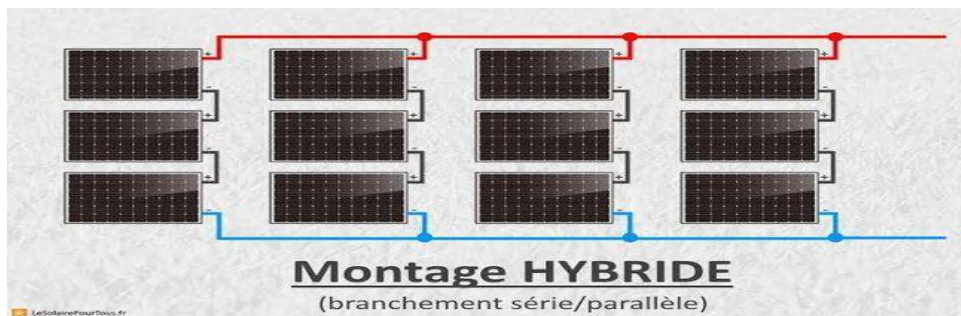


Figure III.11 : Caractéristique résultante d'un groupement hybride des cellules ($np+ ns$) (Lesolaire, 2023)

III.4. Les différents types de panneau photovoltaïque

III.4.1. Panneau photovoltaïque monocristallin :

Les panneaux PV avec des cellules monocristallines sont les photopiles de la première génération. Elles ont une durée de vie de 25 à 30 ans. (B. Flèche, 2023)

III.4.2. Panneau photovoltaïque polycristallin :

Les panneaux PV avec des cellules polycristallines sont élaborés à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Avec une durée de vie allant de 25 à 30 ans. L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est qu'elles utilisent 2 à 3 fois moins d'énergie lors des fabrications (B. Flèche, 2023).

III.4.3. Panneau photovoltaïque amorphe :

Utilisant des couches très minces de silicium appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal. Cependant, le silicium amorphe permet de produire des PV de grande surface à bas coût en utilisant moins de matière première (B. Flèche, 2023).




| Type | monocristallin | polycristallin | amorphe |
|-----------|--|---|--|
| Rendement | 11 à 16 % | 10 à 14 % | 5 à 6 % |
| |  |  |  |

Figure III.12 : Les différents types de panneau photovoltaïque (BENSACI W., 2012).

III.4.4. Panneaux photovoltaïques bifaciaux (à double face) :

Les panneaux solaires bifaciaux sont équipés de cellules solaires sur les faces externe et interne, (Total Energies, 2022). Cette technologie solaire photovoltaïque se base sur le principe de l'albédo (la quantité du rayonnement solaire réfléchi par une surface) ; les rayons solaires réfléchis par un sol neigeux, sableux ou de couleur claire peuvent être captés par le dos du panneau solaire bifacial. (Total Energies, 2022) (Prixelec, 2022)

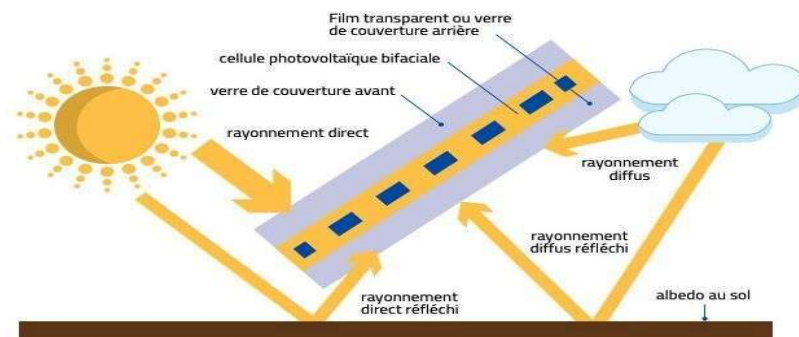
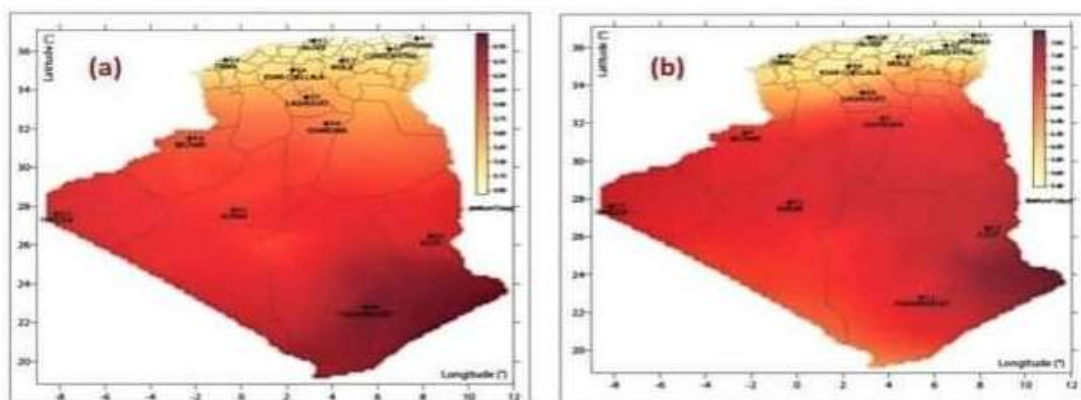


Figure III.13 : Panneaux photovoltaïques bifaciaux (S. FABRÉGAT, 2021).

III.5. Potentiel solaire en Algérie.

Le soleil est une sphère gazeuse composée presque totalement d'hydrogène. Son diamètre est de 1391000 km (100 fois celui de la terre), sa masse est de l'ordre de 2.1027 tonnes. Toute l'énergie du soleil provient des réactions thermo–nucléaires qui s'y produisent (C. Fröhlich, 1978) (Charles Chauliaguet, 1981). L'Algérie a un énorme gisement solaire, où elle est la principale source dans le bassin méditerranéen. D'après Boudries et Dizene, l'Algérie reçoit annuellement une exposition au soleil équivalant à 2500 kWh/m² et la durée moyenne annuelle du soleil varie d'une faible valeur de 2650 h sur la ligne côtière à 3500 h dans le sud. (MEM, 2017).



Gisement solaire de l'Algérie : (a) Energie solaire globale (ou GHI : Global Horizontal Irradiance) reçue par jour sur une surface d'un m²; (b) Rayonnement solaire direct (ou DNI : Direct Normal Irradiance) reçu par jour sur une surface d'un mètre carré.

Figure III.14 : Potentiel solaire en Algérie (CDER.DZ, 2015).

Plus de 86 % du territoire algérien se trouve dans le sud, où le soleil dure plus de 8 heures par jour, voire 12 heures par jour pendant l'été. En raison de sa position géographique, la durée du soleil n'est pas significativement différente entre les mois de l'année. Cela garantit une disponibilité du soleil constante tout au long de l'année.

Tableau III.1 : Gisement solaire en Algérie selon les localités (CDER.DZ, 2015).

| Région | Région côtière | Hauts plateaux | Sahara |
|--|----------------|----------------|--------|
| Superficie | 4 | 10 | 86 |
| Durée moyenne d'ensoleillement heure/an | 2650 | 3000 | 3500 |
| Energie moyenne reçue Kwh/m ² /an | 1700 | 1900 | 2650 |

III.6. Types de pompes solaires.

Les pompes à eau sont classées selon :

- Leur principe de fonctionnement : soit de type centrifuge ou volumétrique ;

Chapitre III : Les énergies renouvelables et la station de pompage solaire photovoltaïque.

➤ Emplacement physique de la pompe par rapport à l'eau pompée : pompe de surface ou pompe immergée.

III.6.1.1. Pompes de surface :

Elle est dite pompe de surface, car souvent posée en dehors du liquide à aspirer.

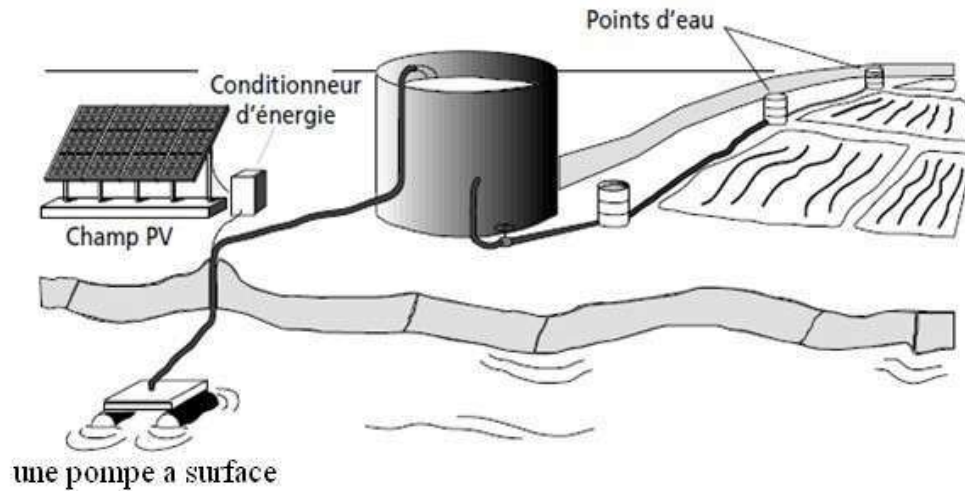


Figure III.15 : Pompes de surface.

III.6.1.2. Pompes immergées :

Les pompes de refoulement ont soit un moteur immergé dans la pompe (pompe monobloc), soit un moteur en surface. La transmission de la puissance est effectuée via un arbre long reliant la pompe au moteur. La mise en place d'une conduite de refoulement après la pompe permet des élévations de plusieurs dizaines de mètres, en fonction de la puissance du moteur.

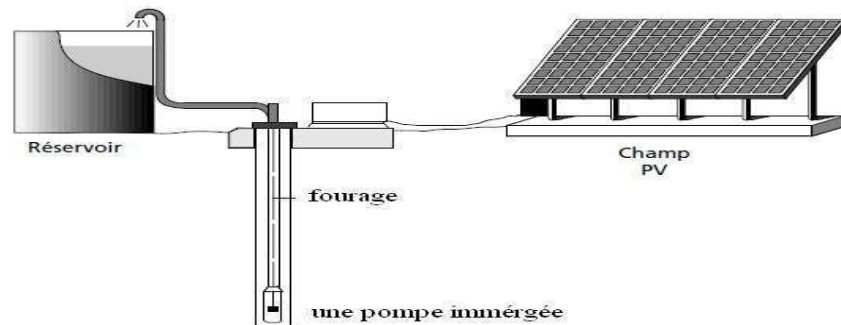


Figure III.16 : Positionnement d'une pompe immergée. (BAKRI M., 2005)

III.7. Types du système de pompage solaire

III.7.1. Pompage par batterie :

L'avantage de la méthode de pompage d'eau utilisant l'énergie stockée sur des batteries est qu'elle garantit une alimentation stable des équipements. L'énergie stockée peut être utilisée à tout moment. L'un des inconvénients majeurs de cette technique est qu'elle comporte plusieurs

Chapitre III : Les énergies renouvelables et la station de pompage solaire photovoltaïque.

composants, ce qui a un impact négatif sur la fiabilité du système et le coût total. Les batteries sont les premiers éléments à être changés. De plus, les batteries introduisent une perte de rendement d'environ 20 % à 30 % de la production d'énergie. (Eciedu, 2020)

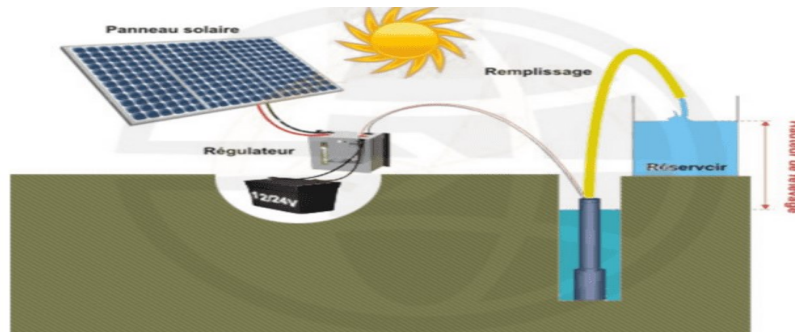


Figure III.17 : Système de pompage avec stockage batterie (BEN Ahmed B., 2015)

III.7.2. Pompage au fil du soleil :

Le système de pompage appelé « Au fil du soleil » permet d'alimenter en eau un site isolé de manière totalement indépendante du reste du système électrique et offre la possibilité de fournir plusieurs dizaines de mètres cubes d'eau par jour à des profondeurs pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres. Le générateur photovoltaïque peut alimenter la charge pendant la journée soit directement, soit via un convertisseur Courant Continu/Courant Continu (CC/CC) ou Courant Continu/Courant Alternatif (CC/AC). L'ensoleillement affecte la charge. Puisque l'énergie photovoltaïque est utilisée directement à partir des panneaux sans conversion ou stockage, le système de pompage solaire le plus courant et le moins coûteux est celui appelé « au fil du soleil ». Ce système ne fonctionne pas avec des batteries. Ce type de pompage solaire permet d'avoir un système photovoltaïque plus simple, plus fiable et moins coûteux qu'un système avec batterie (S. BELAIDI LALOUNI, 2015).

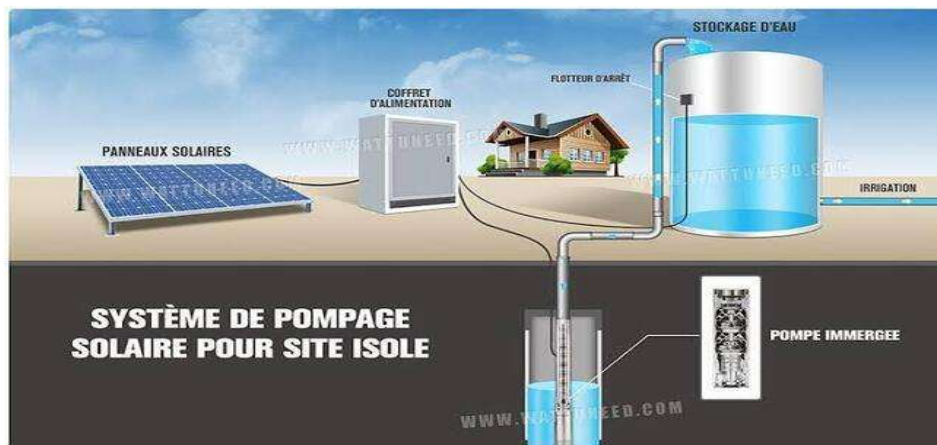


Figure III.22 : Schéma d'un système de pompage solaire pour site isolé. (Ingénierie Bleue, 2023)

III.8. La partie stockage :

Il existe deux méthodes de stockage d'énergie : le stockage d'énergie électrique et le stockage d'énergie en eau. L'eau dans des réservoirs est plus facile à stocker que l'énergie électrique dans des accumulateurs lourds, coûteux et fragiles, c'est pourquoi cette dernière méthode est souvent utilisée. De plus, le système de stockage à batterie entraîne des coûts supplémentaires, des problèmes de maintenance et l'obligation de remplacer la batterie après 3 à 5 ans d'utilisation. De plus, l'absence d'accumulateurs améliore le rendement énergétique. La capacité de stockage du réservoir varie d'un à plusieurs jours, et il peut souvent être construit localement. Ce réservoir est simple à réparer localement et ne nécessite pas d'entretien approfondi. (Poirée M. et Ollier Ch., 1986)

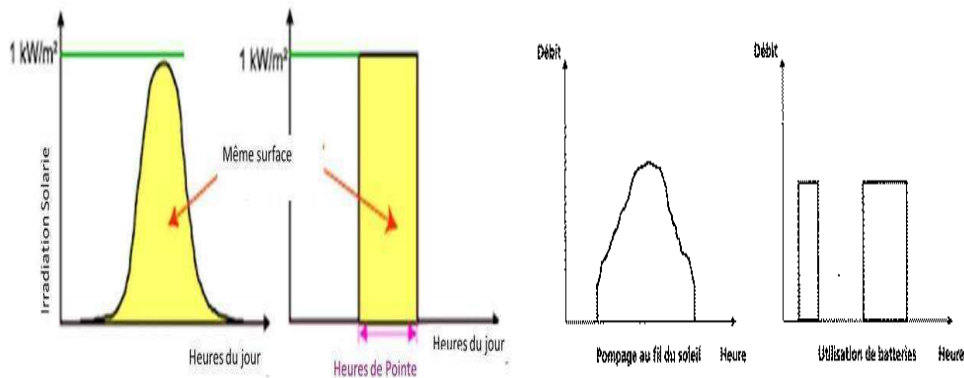


Figure III.23' : Irradiation et caractéristiques des pompages au fil du soleil et avec une batterie. (DIIL, 2020)

III.8.1. Des notions hydrauliques :

Les stations de pompage sont constituées d'une ou plusieurs pompes qui aspirent une quantité d'eau et la propulsent à une pression spécifique à travers les canalisations du réseau. Le dimensionnement d'une pompe solaire dépend principalement du débit d'utilisation et de la hauteur à laquelle la pompe doit refouler. Les pertes de charge et la pression de refoulement dans la conduite ont un impact sur cette dernière.

III.8.2. Choix de la pompe :

Le point de fonctionnement au meilleur rendement à vitesse nominale d'une pompe immergée est déterminé par son débit et son HMT. Pour une pompe centrifuge, ce point de fonctionnement est d'environ 2 850 t/min à une fréquence de 50 Hz.

La pompe qui aura le meilleur rendement autour de midi solaire est la meilleure. (PSEAU, 2005) Une pompe ayant une HMT nominale supérieure à l'optimum va démarrer plus tôt mais plafonner en débit avec un mauvais rendement en milieu de journée, au moment du plus fort potentiel.

Chapitre III : Les énergies renouvelables et la station de pompage solaire photovoltaïque.

En revanche, la pompe tournera toujours vers la gauche de sa courbe par rapport à son point de rendement maximal. L'heure de démarrage n'est pas un critère d'optimisation des choix de pompe en soi. (ERO, 2020).

- Pour une pompe centrifuge : Son diamètre est soit de 4" (95 mm), soit de 6" (142 mm).

Pour les pompes de puissance moyenne avec HMT de 10 à 60 m et débit journalier moyen, les moteurs sont en monophasé ou triphasé avec un convertisseur continu/alternatif (onduleur), extérieur ou intérieur à la pompe. La tension d'alimentation peut être soit en continu soit en alternatif <250V. Une vérification des courbes des constructeurs de la pompe permet de connaître le débit voulu à la HMT désirée. (ANATOLE Bosse, 2017)

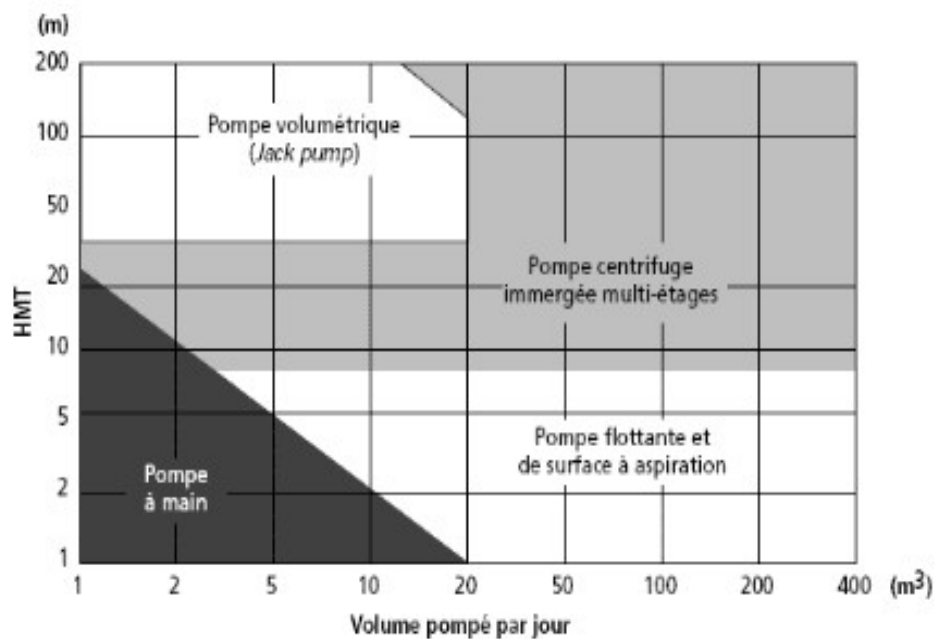


Figure III.23 : Choix d'une pompe selon la HMT et le débit demandés (MemoireONline, 2023)

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons étudié, dans la première partie, les différentes énergies renouvelables. Celles-ci représentent une grande partie de notre avenir énergétique et particulièrement l'énergie solaire photovoltaïque. Le pompage au fil du soleil en irrigation est une solution durable et écologique qui répond aux besoins en eau des cultures agricoles.

Dans seconde partie nous avons étudié les différentes pompes d'irrigation. Les pompes solaires sont de plus en plus utilisées dans les régions ensoleillées. Elles offrent une alternative prometteuse et durable comparativement aux systèmes de pompage traditionnels alimentés par des énergies fossiles.

CHAPITRE IV :

ÉTUDES D'UN SYSTÈME
D'IRRIGATION GOUTTE À
GOUTTE PAR POMPAGE
SOLAIRE
PHOTOVOLTAÏQUE DANS
LES ZONES SEMI-ARIDES
ET ARIDES EN ALGÉRIE.
CAS D'ÉTUDE HENNAYA
(WILAYA DE TLEMÇEN).

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

IV. Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à la présentation de la zone d'étude agricole ainsi qu'à la conception et au dimensionnement d'un système d'irrigation intelligente adapté à cette zone. À cet effet, nous allons étudier, dans ce chapitre, la zone agricole choisie, en tenant compte de ses caractéristiques, de ses besoins en eau et des cultures cultivées. Ceci, nous permettra de concevoir un système d'irrigation intelligent qui répond aux besoins des agriculteurs dans un processus répondant au triptyque EAU-ENERGIE-ENVIRONNEMENT. L'agriculture étant un secteur clé de l'économie, il est primordial d'optimiser les rendements tout en minimisant les coûts, notamment ceux liés à la consommation d'eau et d'énergie.

IV.1. Étude du milieu physique du site

IV.1.1. Présentation de la zone d'étude :

La Wilaya de Tlemcen est une région située dans le nord-ouest de l'Algérie, à proximité de la frontière marocaine. Elle est située à environ 600 kilomètres de la capitale Alger.

La zone d'étude est située à la commune de Hennaya qui est située dans la Wilaya de Tlemcen, à environ 25 kilomètres au nord-est de la ville de Tlemcen. Elle s'étend sur une surface d'environ 97,94 km². Selon les statistiques officielles, la superficie agricole de la commune représente environ un tiers de la superficie totale de la commune.

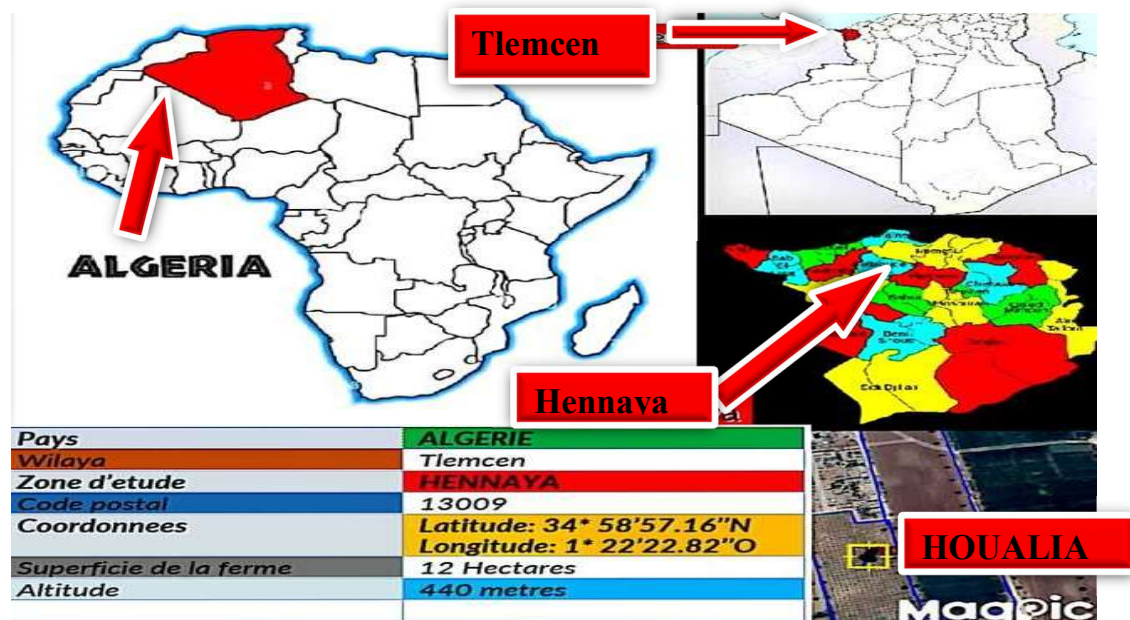


Figure IV.1 : Localisation de la zone d'étude et de la ferme HOUALIA (WIKIPEDIA, 2021).

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

IV.1.2. Identification et localisation du site d'étude.

Le périmètre de " ABDELJABAR " qui est notre zone d'étude relève de la commune de Hennaya.

La commune de Hennaya est limitée par :

- Au nord par la commune de Ain Youcef et Au nord-ouest par Remchi;
- Au sud par la commune de Beni Mester;
- À l'ouest par la commune de Zenata ;
- À l'est par la commune de Chetouane.

La ferme **HOUALIA** située aux coordonnées géographiques suivantes : Latitude : 34°58'54,00'' et longitude : -1°22'20,83''. Sur le plan administratif, elle relève de la daïra de Hennaya et s'étend sur une superficie totale de 12 hectares, son activité agricole a débuté dans les années 1991.

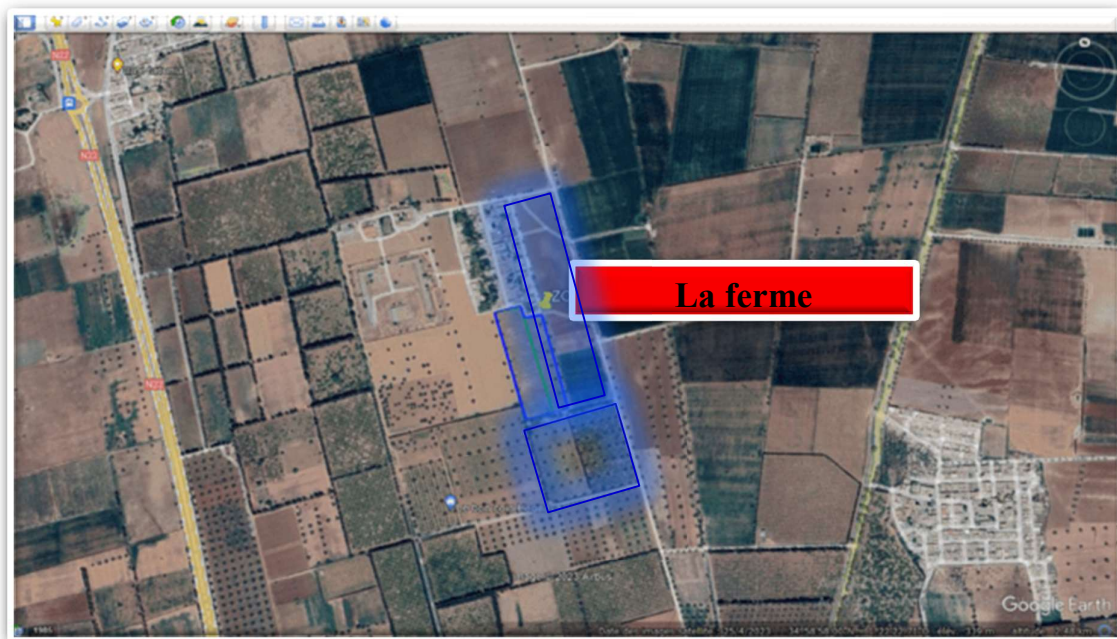


Figure IV.2: Localisation de la commune de Hennaya dans la wilaya de Tlemcen (Source : Google Earth).

IV.1.3. Situation agricole de la zone.

En termes d'irrigation, la commune de Hennaya compte plusieurs zones irriguées. Les canaux d'irrigation des eaux usées et les sources d'eau souterraines assurent la majorité de l'irrigation. Il est important de noter que dans cette région, qui est connue pour ses terres fertiles et son climat favorable à la croissance des cultures, l'irrigation est une pratique agricole essentielle. De plus, Hennaya est une ville dynamique avec une économie en expansion qui est célèbre non seulement pour son agriculture, mais aussi pour son artisanat et ses entreprises industrielles.

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

IV.1.4. Topographie et relief.

Le relief de Hennaya est principalement composé de montagnes, de vallées et de ruisseaux. La commune de Hennaya se trouve dans une zone montagneuse à une altitude moyenne d'environ 800 mètres au-dessus du niveau de la mer. La wilaya présente un paysage varié avec quatre ensembles physiques distincts qui se trouvent du nord au sud. Les Monts des Trara composent la partie nord et Sebâa Chioukh semble être un massif avec une érosion notable et des précipitations peu importantes (CLIMAMED EU, 2023).

IV.1.5. Situation géologique et hydrogéologique.

En termes de structure géologique, la commune de Hennaya est caractérisée par la présence de roches sédimentaires et métamorphiques, ainsi que par des formations volcaniques. La commune est également située dans une zone importante pour l'agriculture en raison de la présence de plusieurs vallées, ruisseaux et sources d'eau souterraine dans la région. Le sol dans la région de Hennaya est principalement constitué de sols argileux, limoneux et sablonneux. En termes d'hydrogéologie, la région de Hennaya est connue pour sa nappe phréatique importante, qui est située dans des formations de calcaire et de grès. Cette nappe phréatique fournit une source d'eau importante pour l'agriculture et les populations locales et ses sols ont une bonne capacité de rétention d'eau et sont donc adaptés pour l'agriculture.

IV.1.6. La nappe de Hennaya :

Selon HAYAN (1983) la partie transmise de la nappe ne parvient pas à atteindre les reliefs aquifères du Jurassique. Il a supposé l'existence d'une alimentation latérale faible (moins de 20 l/s) car : - les terrains situés entre les deux aquifères ont une faible perméabilité ; le débit total, aux exutoires de la nappe de Hennaya est tombé à 20 l/s durant ces dernières périodes (KHALDI, 2005).



Figure IV.3 : La situation hydrogéologique de la wilaya de Tlemcen (Google Earth, 2023).

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

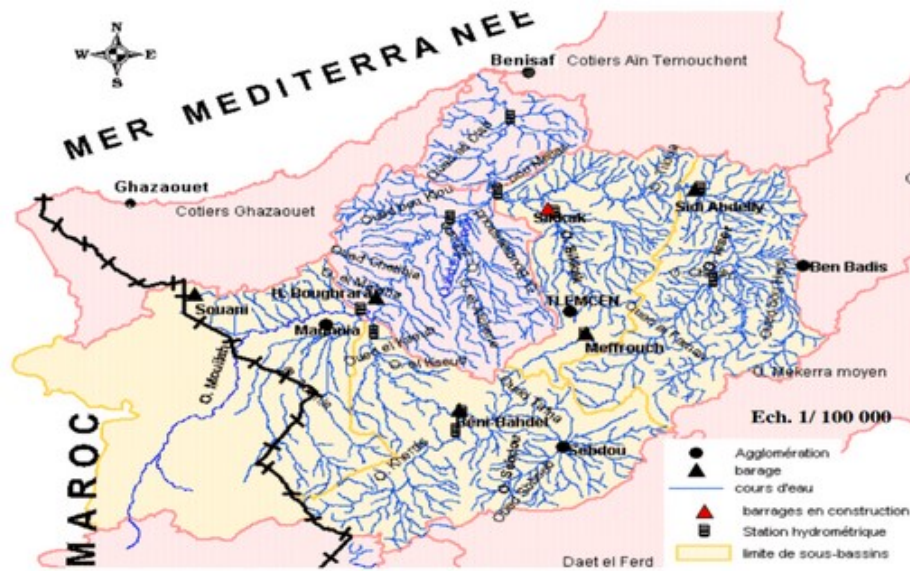


Figure IV.4 : Carte du réseau hydrographique de la Tafna (Source : A. BOUANANI, 2004)

IV.2. Propositions et choix de cultures associées à l'agrume clémentine.

Pour la suite de l'étude et le dimensionnement des ouvrages hydrauliques, nous proposons un système complémentaire qui permettra d'enrichir le sol. Nous proposerons une culture ayant un système racinaire superficiel qui n'endommage pas les racines des agrumes et qui contribuera à l'enrichissement du sol grâce à la décomposition de leurs feuilles et à la libération de nutriments, elle se fera entre les espacements (5 m) compris des agrumes clémentines, nous conseillerons d'établir la culture des fraises non remontantes qui dure moins de 3 mois.

Cette technique permettra pour notre parcelle d'utiliser l'espace ; enrichir le sol et d'autres part d'augmenter les revenus de l'agriculteur (c'est une suggestion).

L'importance principale de cet ajustement est de :

- Réduire l'espace agricole,
- Réduire l'évaporation de l'eau,
- Augmenter les rendements des deux cultures,
- Augmenter la qualité des fraises en évitant l'excès d'ensoleillement. Cela donne aux plantes toute la saison de croissance pour se développer et produire des fruits pendant l'été.

Cette étude doit tenir compte de l'aptitude agronomique des sols, des cultures existantes (l'arboriculture) et des cultures à introduire ou à développer.

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

Tableau IV.1 : Choix de cultures et leurs caractéristiques.

| <i>Cultures</i> | <i>Période de végétation</i> | <i>Superficie (ha)</i> | <i>Cultures (%)</i> | <i>Coefficient cultural (kc)</i> | <i>Profondeur des racines (m)</i> |
|-----------------|------------------------------|------------------------|---------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Agrume | Janvier – Mars | 3 | 80 | 0,85 | 1,20 |
| Fraise | Mars- Juin | 2 | 100 | 0,80 | 0.3 |

IV.3. Climat et bioclimat.

La wilaya de Tlemcen a un climat méditerranéen dominant, reposant sur l'opposition entre un hiver océanique où la wilaya est ouverte aux dépressions maritimes et un été désertique qui provoque la remontée et le stationnement d'une chaleur persistante durant toute la saison. La pluviométrie est d'une manière générale soumise à une double irrégularité inter-saisonnière et interannuelle. En outre, elle a deux autres climats semi-arides, un chaud et un autre froid. (ClimateDate, 2023). Le climat devient contraignant pour l'homme à travers ses différents facteurs (précipitations, humidité relative, température, etc., entraînant ainsi diverses pénuries et de sérieux problèmes sanitaires (GOUATAINE Seingue Romain et YMBA Maimouna, 2019).

L'étude du climat peut être réalisée à partir :

- Des méthodes de visualisation des périodes sèches et des périodes humides.
- Des indices climatiques annuels et mensuels.
- Des climatogrammes, nous retiendrons ici, celui d'EMBERGER bien adapté au domaine méditerranéen.

Le tableau N° IV.2 suivants est un résumé de la station météorologique sélectionnée :

Tableau IV.2 : Station météorologique de ZENNATA

| <i>Station</i> | <i>Coordonnées XY</i> | <i>Position</i> | <i>Situation</i> | <i>Période d'observation</i> |
|----------------|---------------------------------------|--------------------------------|---------------------|------------------------------|
| ZENNATA | Latitude 34.9525 Longitude -1.3704 | Wilaya de Tlemcen (Tlemcen) | 10 Km de Hennaya | 1981 - 2021 |

Pour déduire le modèle climatique il faut d'abord déterminer les facteurs climatiques ils sont comme suit :

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

IV.3.1. Précipitations :

La station sélectionnée étant celle de ZENATA qui par sa position semble être représentative de la région d'étude, on procède à l'analyse de la série des données pluviométriques comprise entre 1981 et 2021 soit 40 ans, les précipitations moyennes annuelles qui représentées dans la figure N°IV.5 ci-dessous :

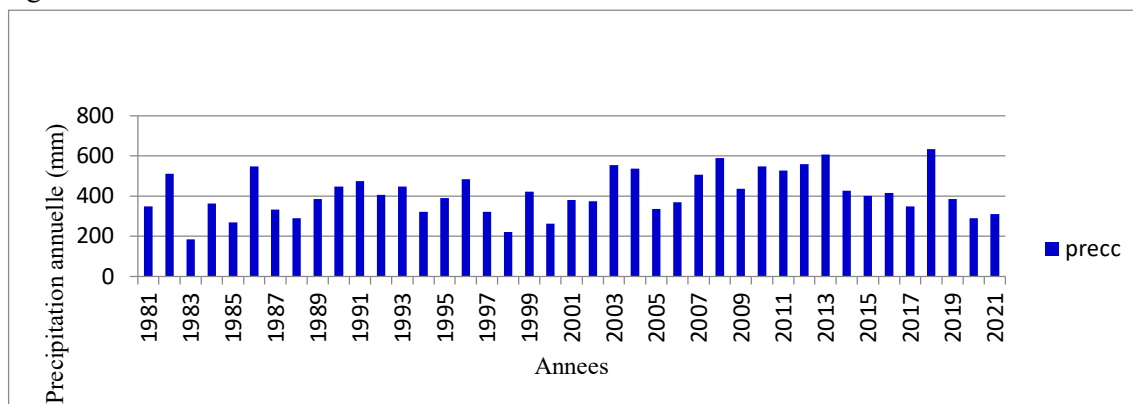


Figure IV.5 : Répartition annuelle des précipitations de la station de ZENATA 1981-2021 (NASA GOV, 2021)

Les précipitations de notre région d'étude sont caractérisées par des intensités très faibles. Sur une période comprise entre le 01 janvier 1981 et le 31 décembre 2021 soit une durée de 40 ans. Une précipitation moyenne annuelle de (414 mm) a été enregistrée.

La moyenne pluviométrique annuelle des 40 dernières années est de l'ordre de 414 mm pour une durée pluvieuse de 60 jours par an en moyenne. C'est une lame d'eau insuffisante pour la plupart des cultures.

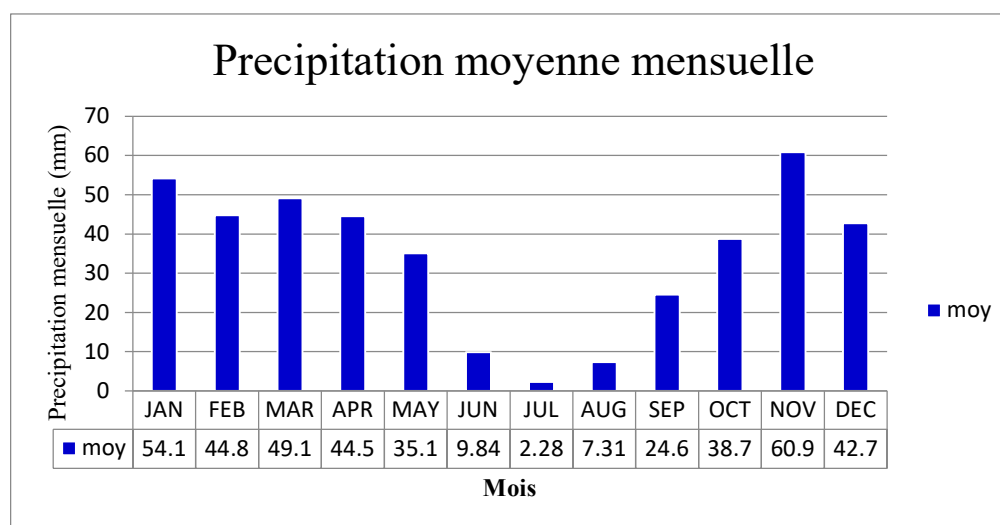


Figure IV.6 : Précipitations moyennes mensuelles de la station de ZENNATA 1981-2021 (NASA GOV, 2021)

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

L'analyse de l'histogramme de notre tableau ci-dessus, illustre les valeurs des précipitations moyennes mensuelles en mm, le mois de novembre avec une valeur de précipitation haute de 60,89 mm enregistrée est le mois le plus pluvieux et le mois de Juillet est le mois le plus sec de l'année avec une valeur de précipitation faible de 2.276mm.

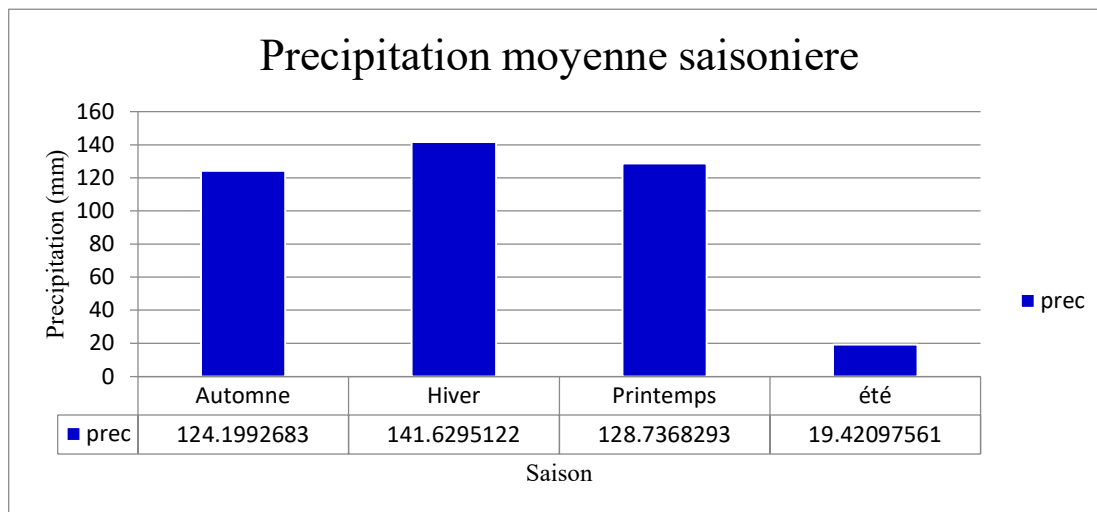


Figure IV.7 : Répartition saisonnière des précipitations (mm) (NASA GOV, 2021)

L'analyse de cette figure vient compléter les observations faites sur les précipitations moyennes mensuelles. La plus forte des précipitations est enregistrée durant novembre qui constitue le maximum enregistré pendant la saison d'hiver qui s'échelonne, et une moyenne observée du mois de Novembre au mois d'Avril qui constitue une forte quantité d'eau et un réservoir en eau du sol très appréciable qui peut être estimée.

IV.3.2. Températures

La maîtrise des données de températures et leurs variations dans une région sont des éléments fondamentaux qui conditionnent les potentialités hydriques, particulièrement par l'évapotranspiration en matière de bilan de l'eau.

IV.3.2.1. Températures moyennes maximales

La figure N°IV.8 montre la variation des Températures moyennes maximales de la série étudiée. On peut remarquer que la température moyenne maximale annuelle est autour de 29,86°C, la température moyenne maximale la plus basse apparaît au mois de janvier avec 20,7°C, alors que la plus élevée se présente en juillet où elle atteint 39,2°C.

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

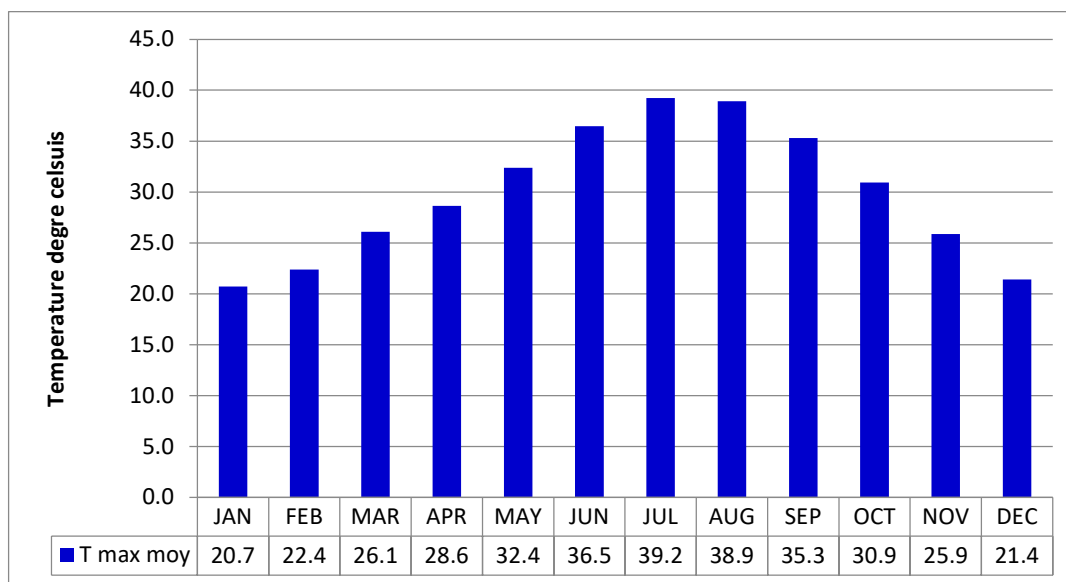


Figure IV.8 : Représentation des températures moyennes maximales de la Station ZENNATA (1981-2021) (NASA GOV, 2021)

IV.3.2.2. Températures moyennes minimale.

La figure N°IV.9 montre la variation des Températures moyennes minimales de la série étudiée. On peut remarquer que la température moyenne minimale autour de 8,18°C, la température moyenne minimale la plus basse apparait au mois de janvier avec 1,1°C, alors que la plus élevée se présente en aout où elle atteint 17,6°C.

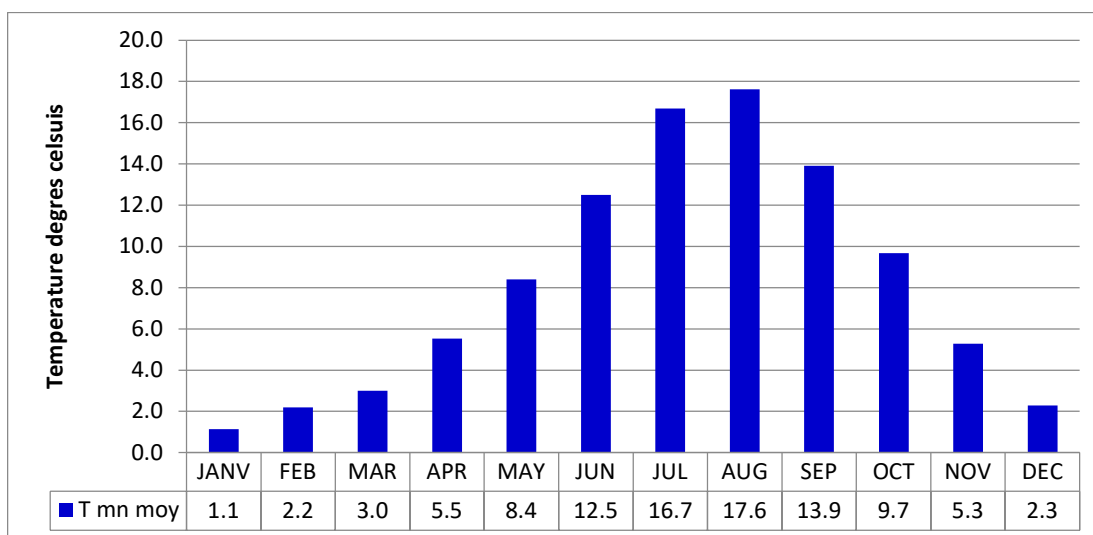


Figure IV.9 : Représentation des températures moyennes minimales (1981-2021) (NASA GOV, 2021)

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

IV.3.2.3. Température Moyenne mensuelle.

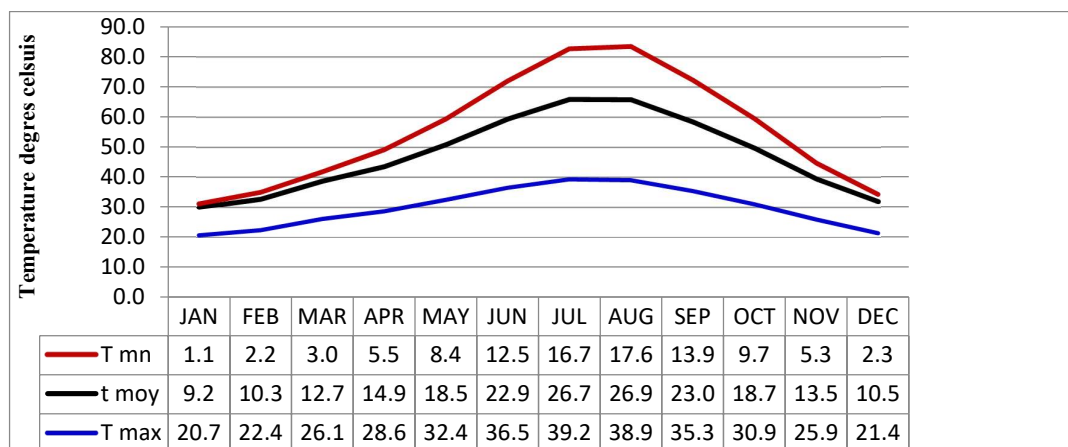


Figure IV.10: Représentation des températures moyennes mensuelles (1981-2021) (NASA GOV, 2021)

Dans notre étude les températures mensuelles moyennes pour une période d'observation de 40ans (1981-2021), permet de visualiser deux seuils distincts de par leur degrés divergent, la moyenne mensuelle des températures au cours de l'année est de l'ordre de 17,4 °C. La période froide se situe entre novembre et mars où la moyenne des minima est autour de 8 °C. Janvier est le mois le plus froid avec une moyenne des minima de 1,1°C, d'autre part la période chaude se situe entre La période des grandes chaleurs se situe entre juin et septembre où la moyenne des maximas est de l'ordre 37,46°C avec des pointes de près de 39,2°C en juillet. La saison chaude s'étend de juin à septembre, mois pendant lesquels les températures mensuelles sont supérieures à la moyenne annuelle.

IV.3.3. Autres paramètres climatiques

IV.3.3.1. Gelées :

La connaissance des dates de la gelé est nécessaire car elle influe négativement sur les cultures et dégradent la structure du sol, elles sont donc l'un des facteurs essentiels du choix des cultures.

Tableau IV.3 : Moyennes mensuelles des gelés de la station ZENATA 1981-2021 (NASA GOV, 2021)

| Mois | J | F | M | A | M | J | Jt | A | S | O | N | D |
|-------------|---|---|---|---|---|---|----|---|---|---|---|---|
| Gelé (Jour) | 6 | 4 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 |

Les gelés sont élevés en hivers et au printemps, et la moyenne annuelle égale 1.5 par mois.

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

Les gelées surviennent légèrement entre décembre et février, trimestre pendant lequel se concentre plus de 85% des occurrences. En début de printemps elles persistent notamment par des orages le long du mois de mars. Cette situation impose une grande prudence dans le choix des variétés qui devront avoir une floraison suffisamment tardive pour éviter les épisodes de gelée les plus fréquents.

IV.3.3.2. Grêle :

Pour les 40 dernières années, la station a enregistré une moyenne annuelle égale 0.6 fois de grêle par an. Celle-ci se manifeste exclusivement entre janvier une fréquence de 0,4 par jour (TUTTIEMPO, 2021).

IV.3.3.3. Orages :

La fréquence des orages est de 15 jours/an en moyenne généralement qui perdure dans le mois de mars. En considérant les jours de pluie, il apparait que les orages constituent près de 38% des jours pluvieux. D'autre part c'est un phénomène principalement estival (74%) mais il persiste encore en septembre et octobre. Les orages contribuent à l'érosion des sols notamment sur les terres de déclive en période d'absence de végétation. (TUTTIEMPO, 2021)

IV.3.3.4. Le vent.

Dans la commune de Hennaya, les vents soufflent du Nord et du Sud. Les vents les plus fréquents en hiver sont les vents d'Ouest, tandis qu'au printemps les vents du Nord-ouest dominant. En été, les vents soufflent du Nord et en automne du Nord et Sud-Ouest. (TUTTIEMPO, 2021)

D'après les données de la station de ZENNATA pour la période de 1981- 2021 (tableau II.3), Les vents sont fréquents sur toute l'année avec une moyenne mensuelle de 2,68 m/s. Cette vitesse peut produire une érosion éolienne dans la commune s'il n'y a pas beaucoup de couvert végétal.

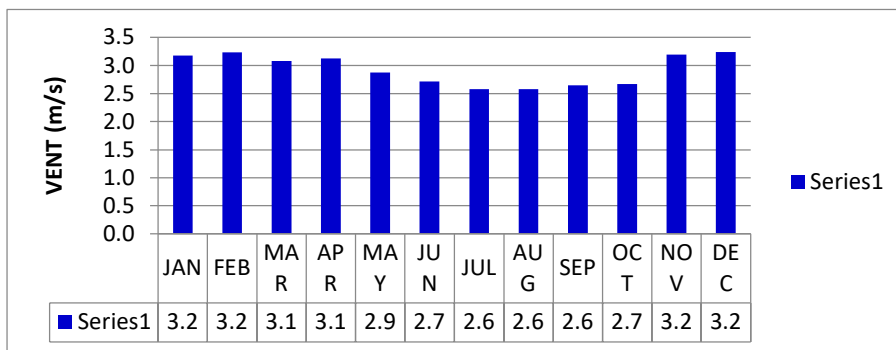


Figure IV.11 : Histogramme des fréquences mensuelles moyennes du vent 1981-2021 (NASA GOV, 2021)

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

D'après les données de la figure N°IV.11, nous avons tracé l'histogramme des fréquences mensuelles moyennes du vent ; d'après cet histogramme nous avons constaté que les vitesses du vent sont presque stables le long de l'année.

IV.3.3.5. Humidité relative.

C'est un élément important du cycle hydrologique contrôlant l'évaporation du sol et la couverture végétale et qui représente la quantité réelle de vapeur d'eau contenue dans l'air par rapport à celle que l'air pourrait contenir s'il était saturé à la même température.

La figure N°IV.12 présente les valeurs de l'humidité moyenne en pourcentage de la région de Tlemcen.

Au cours de l'année elle varie entre 72,28% en décembre et de 46,72% en juillet, moyennement annuelle, l'humidité de l'air est de 61,84% dans la commune de HENNAYA.

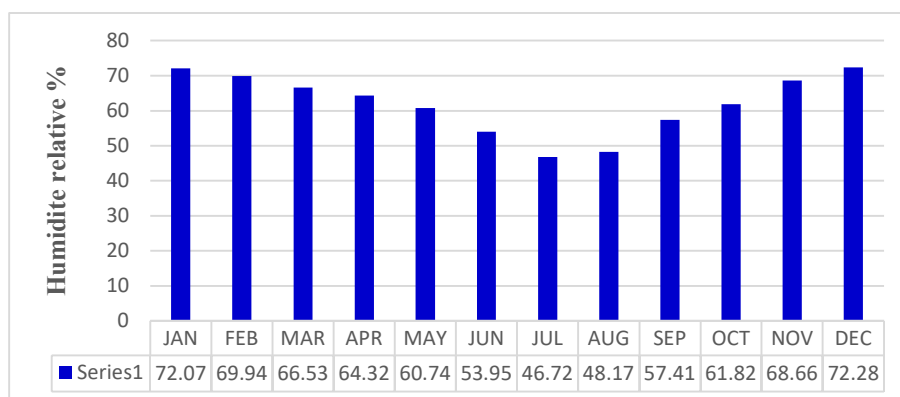


Figure IV.12 : Humidité relative 1981-2021 (NASA GOV, 2021)

Tableau IV.4. Répartition de l'humidité moyenne en % de la station ZENNATA (NASA GOV, 2021)

| Mois | Dec | Jan | Fev | Mars | Avril | Mai | Juin | Juil | Août | Sep | Oct | Nov |
|-----------------------|-------|-------|-------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|
| Station de ZENNATA | 72,28 | 72,07 | 69,94 | 66,53 | 64,32 | 60,74 | 53,95 | 46,72 | 48,17 | 57,41 | 61,82 | 68,66 |
| Moyenne trimestrielle | 71,43 | | | 63,85 | | | 49,61 | | | 62,63 | | |
| Saisons | Hiver | | | Printemps | | | Eté | | | Automne | | |

La valeur 49,61 % à l'Eté est la plus petite dans les quatre saisons mais l'Hiver prenant la première place avec la valeur de 71,43%.

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

IV.3.3.6. Insolation et éclairage

La commune de HENNAYA est caractérisée par une forte insolation. Cette dernière correspond à la durée d'éclairement du sol par le soleil. La durée moyenne d'insolation enregistrée est autour de 217 h/mois.

La figure N°IV.13 montre la variation mensuelle moyenne de l'ensoleillement au niveau de la station, Le maximum d'ensoleillement est relevé en juin avec 10,23 h, et le minimum au mois de décembre avec 4,12 h.

L'analyse de ce tableau montre l'importance de l'insolation dans cette région 7 heures/jour.

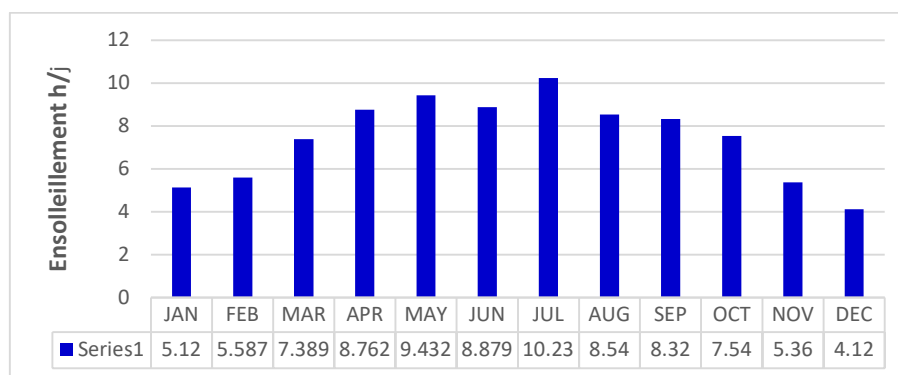


Figure IV. 13 : Ensoleillement moyen mensuel de la station 1981-2021 (NASA GOV, 2021)

IV.3.3.6.1. Evapotranspiration potentielle (E.T.P.)

L'évapotranspiration potentielle, représente un déficit en eau à compenser pour les cultures.

Tableau IV.5 : Evolution de l'ETP –Pen Mann (mm) moyenne journalière de la station de ZENNATA 1981-2021 (NASA GOV, 2021)

| Mois | S | O | N | D | J | F | M | A | M | J | JL | A | TOTAL |
|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-------|
| ETP (mm) | 6.5 | 5.1 | 4.1 | 3.2 | 3.1 | 3.5 | 4.5 | 5.6 | 6.6 | 7.34 | 8.1 | 7.7 | 5.44 |

L'évapotranspiration potentielle moyenne journalière enregistrée au niveau de la station de référence est de 5.44 mm ; elle est accentuée durant la période de juin à septembre avec un pic de 8.1 mm au mois de juillet.

IV.3.3.6.2. L'évapotranspiration.

Comme indiqué au chapitre 01, l'évapotranspiration (Etp) est calculée par les méthodes indirectes, suivant les relations de TURC.

En effet, l'Etp est rarement mesurée, elle est le plus souvent calculée par des formules à partir de données climatiques mesurées.

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

Tableau IV.6: Evapotranspiration TURC

| Mois | SEP | OCT | NOV | DEC | JAN | FEV | MAR | AVR | MAI | JUIN | JUIL | AOUT |
|------------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|------------|------------|--------------|
| Tmoy °C | 23.0 | 18.7 | 13.5 | 10.5 | 9.2 | 10.3 | 12.7 | 14.9 | 18.5 | 22.9 | 26.7 | 26.9 |
| I | 10.09 | 7.37 | 4.51 | 3.07 | 2.54 | 3.00 | 4.08 | 5.25 | 7.24 | 10.00 | 12.60 | 12.75 |
| A | 0.65 | 0.61 | 0.56 | 0.53 | 0.52 | 0.53 | 0.55 | 0.57 | 0.61 | 0.65 | 0.69 | 0.70 |
| Klat:35°N | 1.03 | 0.97 | 0.86 | 0.85 | 0.87 | 0.85 | 1.03 | 1.09 | 1.21 | 1.21 | 1.23 | 1.16 |
| ETP(mm) | 127.2 | 110.9 | 92.2 | 89.7 | 91.9 | 89.7 | 109.7 | 118.4 | 137.8 | 149 | 164 | 155.4 |

Ces deux formules ne sont pas toutes équivalentes, leur validité et leur représentativité varient selon les paramètres utilisés.

Nous adoptons pour notre étude la relations de PENMANN-MONTEITH, parce qu'elle intègre les conditions du milieu et les caractéristiques des plantes par l'intermédiaire du coefficient cultural K_c .

IV.3.4. Etude du régime climatique

IV.3.4.1. Méthode de visualisation

➤ **Diagramme Ombrothermique :**

Il s'agit d'établir un diagramme ombrothermique en adoptant une progression linéaire pour l'échelle de température en °C et une échelle logarithmique pour les précipitations.

Ce diagramme permet de donner une image assez synthétique d'étudier facilement l'intensité de la saison sèche, sa position dans le temps et dans l'échelle des amplitudes thermiques ou pluviométriques.

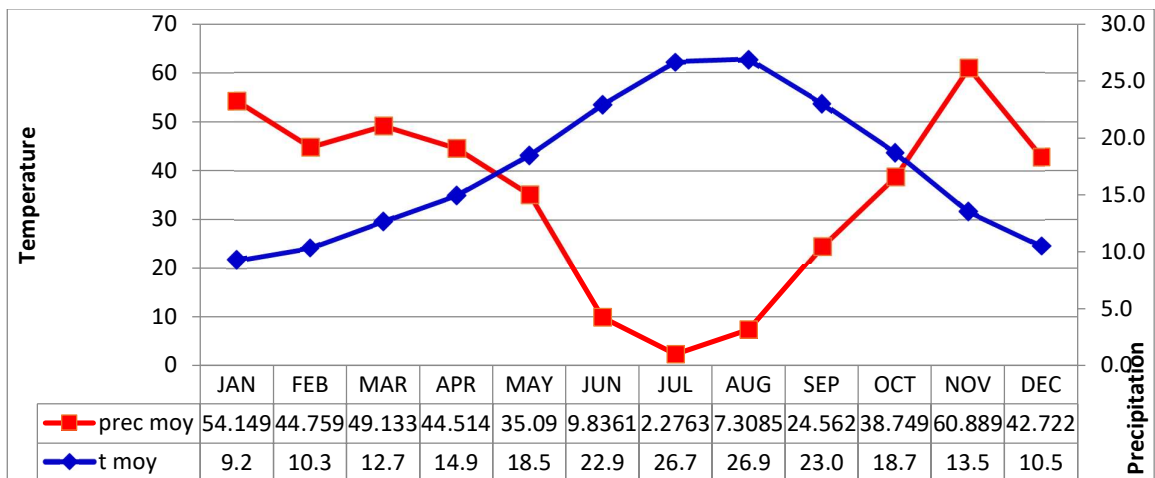


Figure. IV.14 : Diagramme pluviométrique (ombrothermique)1981-2021 (NASA GOV, 2021)

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

On remarque que la saison humide s'annonce en début octobre et atteint son pic en novembre avant de décroître continuellement jusqu'en fin avril avant d'être nul est juillet (la période de forte chaleur) au même moment la température s'élève à partir du mois de mai, c'est dans cette période précise de transition de saison que l'irrigation intervient le plus mais se fait face à un problème d'évaporation rapide et la cassure des feuilletts et fruits des cultures.

IV.3.4.2. Indices climatiques :

Une codification du climat par des formules dans le but de voir l'interférence des différentes variables de ce climat et leur action sur les plantes. Ces formules se basent principalement sur deux facteurs essentiels : Pluviométrie et température. Les indices les plus connus sont ceux de E. MARTONE (1926) et E. EMBERGER (1932)

P : Précipitation moyenne annuelles en mm

M : Moyenne des températures maximales du mois le plus chaud (°K).

m : Moyenne des températures minimales du mois le plus froid (°K)

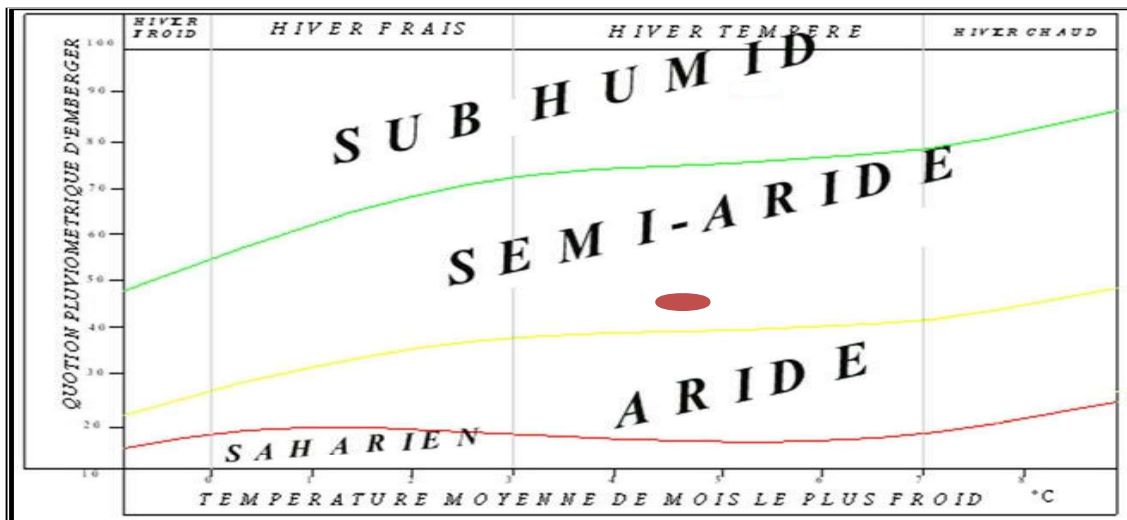


Figure. IV.15: Climatogramme d'Emberger (Louis Emberger, 1932)

IV.3.4.3. Quotient pluviométrique « D'EMBERGER ».

$$Q = \frac{1000 \times P}{\frac{M + m}{2}} \times (M - m)$$

Avec :

P : précipitation annuelle en mm ;

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

M : température moyenne du mois le plus chaud ; m : température moyenne du mois le plus froid ; (M et m en degré kelvin ' °K ').
 $T^{\circ}(K) = T^{\circ}c + 273 \text{ }^{\circ}C$

Les résultats obtenus dans le Tableau N°IV.7 sont pris en fonction d'un résumé lié au **Figure. IV.15**: Climatogramme d'Emberger ci-dessus :

Tableau IV.7 : Quotient d'Emberger (NASA GOV, 2021)

| Mois | Pluviométrie | T° Max en °C | T° Min en °C |
|-----------------------|--------------|--------------|--------------|
| Janvier | 54.15 | 20.7 | 1.1 |
| Février | 44.76 | 22.4 | 2.2 |
| Mars | 49.13 | 26.1 | 3.0 |
| Avril | 44.51 | 28.6 | 5.5 |
| Mai | 35.09 | 32.4 | 8.4 |
| Juin | 9.84 | 36.5 | 12.5 |
| Juillet | 2.28 | 39.2 | 16.7 |
| Août | 7.31 | 38.9 | 17.6 |
| Septembre | 24.56 | 35.3 | 13.9 |
| Octobre | 38.75 | 30.9 | 9.7 |
| Novembre | 60.89 | 25.9 | 5.3 |
| Décembre | 42.72 | 21.4 | 2.3 |
| Pluviométrie annuelle | | M (en °C) | m (en °C) |
| 414 mm | | 29.9 | 8.8 |
| | | M (en °K) | m (en °K) |
| | | 302,9 | 281,8 |
| Quotient (Q) | | 67.11 | |

En se reportant au quotient pluviométrique trouvé sur le climatogramme d'Emberger, on détermine la zone climatique de la région considérée.

Nous remarquons que notre périmètre, la ferme HOUALIA appartient à une zone d'un climat « humide » ; Présentant des Hivers tempérés.

D'après le climatogramme d'Emberger, le périmètre d'ABDEL JABAR est caractérisé par un climat **Semi-aride**. Présente des **Hiver- tempérés**.

IV.3.4.4. Indice d'aridité de Demartone.

DEMARTONE propose la formule suivante :

$$I = \frac{P}{T + 10}$$

Avec :

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

I : indice climatique.

P : hauteur moyenne annuelle (mm).

T : température moyenne annuelle (°C).

Tableau IV.8 : Limite des climats d'après l'indice climatique de DEMARTONE.

| Valeur de I | Type de climat | Irrigation |
|------------------|----------------|-----------------------|
| $I \leq 5$ | Désertique | Indispensable |
| $5 < I \leq 10$ | Aride | Indispensable |
| $10 < I \leq 20$ | Sec | Souvent indispensable |
| $20 < I \leq 30$ | Semi-aride | Parfois utile |
| $I > 30$ | Semi humide | Inutile |

Le tableau suivant illustre les résultats sur le type de climat de notre zone d'étude.

Tableau IV.9 : Valeur de l'indice d'aridité annuelle.

| <i>P</i> annuelle | <i>T</i> moy°C | <i>I</i> annuelle |
|-------------------|----------------|-------------------|
| 414 mm | 17.4 | 15.11 |

D'après le Tableau IV.8, cette valeur traduit un climat sec donc l'irrigation est souvent indispensable.

IV.3.4.5. Indice d'aridité mensuelle :

Pour plus de précision, on utilise l'indice d'aridité mensuel donné par :

$$I_{mens} = \frac{12 * P_{moy\ annuelle}}{(T + 10)}$$

I_{mens} : indice d'aridité mensuelle.

P_i : précipitation moyenne mensuelles de chaque mois en (mm).

T_i : température moyenne mensuelles de chaque mois en (°C).

Tableau IV.10 : Indice d'aridité mensuelle

| Mois | <i>P</i> moyenne | <i>T</i> moy | <i>I</i> mens |
|------|------------------|--------------|---------------|
| SEP | 24.56 | 23.01 | 8.93 |
| OCT | 38.75 | 18.71 | 16.20 |
| NOV | 60.89 | 13.51 | 31.07 |
| DEC | 42.72 | 10.50 | 25.01 |
| JAN | 54.15 | 9.23 | 33.76 |
| FEB | 44.76 | 10.33 | 26.43 |
| MAR | 49.13 | 12.65 | 26.03 |
| APR | 44.51 | 14.94 | 21.42 |
| MAY | 35.09 | 18.48 | 14.78 |
| JUN | 9.84 | 22.89 | 3.59 |
| JUL | 2.28 | 26.66 | 0.75 |
| AUG | 7.31 | 26.87 | 2.38 |

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

IV.3.4.6. Comparaison du résultat du type du climat obtenu par les différentes méthodes :

Cette comparaison, nous permettra de définir le type du climat de notre région, afin de connaître l'étendue et la nécessité de l'irrigation. Le tableau IV.12 résume les résultats des deux méthodes (EMBERGER et DEMARTONE annuelle) utilisées dans notre étude.

Tableau IV.11 : Comparaison des différentes méthodes utilisées.

| Méthodes | EMBERGER | DEMARTONE |
|-----------|------------|-----------|
| Paramètre | | |
| Climat | Semi-aride | Sec |

D'après le tableau IV.11, nous constatons que les deux méthodes de calcul se situent à un climat de type semi-aride en moyenne mais avec plus de précision l'indice d'aridité DEMARTONE montre d'avantage que la région commence à avoir une diminution de la pluviométrie annuelle due à une mauvaise répartition en temps et en espace et des températures qui varient poussant la région de zone semi-aride vers une zone a climat sec, en conséquent l'irrigation est souvent indispensable dans cette région.

IV.4. Etude du sol de la parcelle d'essai (L'étude pédologique).

L'objectif de l'évaluation de la capacité des sols du secteur à l'étude est d'assurer un bon développement végétatif des cultures attendues, d'augmenter les rendements et d'ajouter une valeur économique pour l'agriculteur en premier mais ensuite à toute la chaîne de valeurs.

Les exigences comparatives de production possible sont utilisées pour évaluer les compétences pratiques ; selon ces sciences du sol, il y a une limite à la division territoriale.

L'étude du sol a pour but de :

- Estimer dans quelle mesure le sol environnant contribue à l'approvisionnement en eau
- Les plantes à arroser.
- Choisissez la technique d'arrosage qui convient le mieux aux conditions du sol et de la culture (Saupoudrer ; égoutter ; tremper).

Mais aussi facilite la connaissance de la couche géologique afin de protéger les eaux des nappes phréatiques et du réseau hydrographique contre les risques de pollution.

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.



Figure IV.16 : La zone d'étude.

IV.4.1. Prélèvement échantillonnages du sol.

Pour l'étude de notre périmètre, il est essentiel de connaître les caractéristiques physiques du sol, nous avons donc prélevé des échantillons du sol de notre exploitation agricole. Dans cette étude de dimensionnement du système d'irrigation, les caractéristiques physiques et chimiques du sol seront déterminées grâce à ces analyses du sol. Le prélèvement est effectué à l'aide d'une tarière de 120 cm, comme indiqué ci-dessous.



Figure IV.17 : La tarière ayant servi pour le prélèvement de l'échantillon du sol

Les échantillons ont été prélevés à l'aide d'une tarière manuelle empruntée au laboratoire de la faculté de Technologie de l'université ABOU BEKR BELKAID de Tlemcen.

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

Pour les protéger et les conserver au champ, les échantillons sont enveloppés en plastique et renfermés dans des boîtes. Les prélèvements ont été pris à partir de deux endroits du périmètre de Hennaya, correspondant aux différentes catégories pédologiques identifiés à l'œil nu (selon la couleur du sol) lors de mes sorties sur le site.

Dans le tableau N°IV.12 nous mentionnons les échantillons prélevés et leurs profondeurs correspondantes, et dans la Figure. N°IV.17 nous avons mentionné la localisation des endroits des prélèvements sur une photo prise.

Tableau IV. 12 : Les échantillons et leurs profondeurs.

| N° du site | N° de l'échantillon | Profondeur (cm) |
|------------|---------------------|-----------------|
| I | 1 | 0-40 |
| | 2 | 40-80 |
| | 3 | 80-120 |
| II | 1 | 0-40 |
| | 2 | 40-80 |
| | 3 | 80-120 |

Tableau IV.13 : Les caractéristiques de l'échantillonnage

| | |
|-----------------------------|----------------------------|
| Date de prélèvements | 31/05/2023 |
| Topographie | Pente raide |
| Situation | Hennaya |
| Temps | Nuageux 16% |
| Occupation du sol | AGRUME (clémentine) |
| Saison d'étude | Printemps. |
| Humidité | 32% |

Les échantillons prélevés ont servi à des analyses de perméabilité, d'humidité relative et de granulométrie au niveau laboratoire de mécanique de sol et géotechnique à l'université AbouBekr Belkaid de Tlemcen.

IV.4.2. Analyse physique :

Des analyses au laboratoire sur les échantillons prélevés nous ont permis de déterminer quelques caractéristiques importantes du sol :



Figure IV. 18 : Mesure de la masse totale de l'échantillon de sol.

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

IV.4.2.1. Humidité de sol :

La teneur en eau (Te) de ces échantillons est le rapport du poids d'eau (Pe) au poids sec (Ps) donnée en%.

$$\text{La teneur en eau (\%)} = \frac{(Pe)}{Ps} * 100$$

Avec :

Pe = Ph – Ps : Masse de l'eau dans le sol (échantillon) ;

Ph : Masse des particules humide du sol (échantillon) ;

Ps : Masse des particules solides du sol (échantillon).

Dans notre étude de cas la valeur 1kg est le poids du sol prélevé au champs, pesé et mis à l'étuve à 105°C puis mesurer de nouveau qui devient ainsi la valeur du poids du sol sans eau estimé à 0,8835 kg.

Le tableau ci-dessous résume l'humidité au champ de l'échantillon après étude sur l'ensemble des différents calculs et le cumul obtenu.

Tableau IV.14 : Les résultats d'humidité de sol.

| Echantillon | Masse totale (1000g) |
|-------------|-----------------------|
| Profondeur | 0 - 120 |
| Pe (g) | 0,1165 |
| Ps (g) | 0,8835 |
| Te (%) | 13,19 |

IV.4.2.2. Analyse granulométrique par tamisage :

Les échantillons ont été séchés pendant une journée à 105 °C avant de commencer les essais de granulométrie. L'analyse granulométrique est réalisée au laboratoire de la faculté de technologie en utilisant des tamis de différents diamètres de 8 mm à 0.08mm, représentés dans la figure IV.19.

D10, D30 et D60 étant respectivement les diamètres correspondant à 10%, 30% et 60% d'éléments de dimension inférieure.

$Cu = D_{60}/D_{10}$

Le coefficient d'uniformité ou de Hazen

$$Cc = (D_{30})^2 / (D_{10} * D_{60})$$

Le coefficient de courbure

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.



Figure IV.19: Une batterie de 18 tamis.



Figure IV.20 : Le vibrotamis électrique et les refus obtenus des tamis utilisés.

➤ **Analyse de la courbe granulométrique**

Le coefficient d'uniformité de Hazen donne : $\frac{5,5}{0,17} = 32,35$, d'où $C_u = 32,35$; $C_u > 3$ alors la granulométrie est variée ou étalée. En poussant l'analyse de la courbe avec la détermination du coefficient de classement (Cc) donné par : $\frac{(0,7)^2}{0,17 \times 5,5} = 0,52$. Selon le tableau ci-dessous extrait de la norme NF EN ISO 14688-2 :2018 donne le qualificatif utilisé en fonction du coefficient d'uniformité CU et du facteur de courbure CC.

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

Tableau IV.15: Type de courbe en fonction de Cu et de Cc.

| Cu | Cc | Qualificatif |
|--------|-------|---------------------------|
| <3 | <1 | Uniforme gradué |
| 3 à 6 | <1 | Mal gradué |
| 6 à 15 | <1 | Moyennement gradué |
| >15 | 1 à 3 | Bien gradué |
| >15 | <0,5 | Granulométrie discontinue |

La courbe de l'analyse granulométriques est discontinue.

D'après la classification universelle des sols selon la granulométrie,

- 5% de limon
- 37% sable
- 58% gravier

Les résultats sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.16 : Résultats des coefficients de HAZEN et de courbure.

| | Ech 01 |
|-------------|--------------|
| D10 | 0,17 |
| D30 | 0,7 |
| D60 | 5,50 |
| Cu % | 32,35 |
| Cc | 0,52 |

Les résultats de l'analyse granulométriques sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau IV.17 : Analyse physique du sol (Granulométrie)

| Granulométrie | Limon | Sable | Gravier |
|-------------------|-------|-------|---------|
| Fraction % | 5 | 37 | 58 |

En comparant les résultats d'analyse granulométriques avec la classification du sol par le triangle textural, le sol expérimental de notre étude est de texture **Sableux limoneux** qui est caractérisée par une faible rétention d'eau, en conséquent une perméabilité trop élevée.

IV.4.2.3. Granulométrie par sédimentation.

La sédimentometrie complète l'analyse granulométrique par tamisage ; elle donne la répartition des grains de diamètre inférieur à 80µm.

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.



Figure IV.21: Les matériaux utilisés

Lors de la décantation de grains solides en suspension dans l'eau, les grains les plus gros chutent plus rapidement que les plus petits. La vitesse de chute est directement liée à leur diamètre (loi de Stokes). Cette relation s'écrit :

$$V = g * \frac{\delta_s - \delta_w}{18 \cdot \eta} * D^2$$

Avec :

$$D = K \cdot \sqrt{\frac{Hr}{t}}$$

Et

$$K^2 = \frac{18 \cdot \eta}{\delta_s - \delta_w}$$

Et

$$H_r = H - 100 \cdot H_1 \cdot (R_c - R_t) - H_c$$

Avec :

V : La vitesse de décantation de la particule ;

G : Accélération de la pesanteur ;

δ_s : Poids spécifique de la particule (valeur moyenne 26,5 kN/m³) ; δ_w : Poids spécifique de l'eau = 10 kN/m³ ;

η : Viscosité du liquide de décantation c'est en fonction de la température de liquide ;

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

D : Diamètre de la particule ;

H_r: Profondeur du centre de poussée dans la suspension à l'instant t; T : le temps de lecture ;

R_c : La lecture de densimètre dans l'éprouvette A à l'instant t ;

R_t : La lecture de densimètre dans l'éprouvette B (témoin)

; Les calculs sont résumés dans les tableaux dans annexe.

IV.4.2.4. Analyse de perméabilité.

Le dispositif utilisé est composé de :

- Perméamètre à charge constante ;
- Cylindre gradué ;
- Thermomètre ;
- Tubes en caoutchouc ;
- Chronomètre.



Figure IV.22: Essai de perméabilité à charge constante puis a charge variable

La perméabilité est égale à :

$$K = \frac{Q \cdot L}{A \cdot h \cdot t}$$

Avec :

K : perméabilité (cm/s)

A : la surface de l'échantillon (cm²)

Q : débit moyen (cm³)

t : le temps (s)

h : la hauteur de la charge (cm)

L : longueur de l'échantillon (cm)

Les résultats obtenus des analyses de laboratoire des caractéristiques du sol sont résumés et rangés dans les tableaux **IV.18** et **IV.19** suivants :

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

Tableau IV.18 : Les résultats des Essais à charge constante

| <i>Essai à charge constante</i> | Temps non défini | | Temps défini | | |
|----------------------------------|------------------|----------------------------------|--------------|----------------------------------|-------|
| | <i>N° ESSAI</i> | 1 | 2 | 3 | 4 |
| <i>V m3</i> | | 500 | 500 | 370 | 440 |
| <i>Q m3/s</i> | | 0,45 | 0,36 | 0,33 | 0,31 |
| <i>temps s</i> | | 1108 | 1408 | 1108 | 1408 |
| <i>L cm</i> | | 11,66 | 11,66 | 11,66 | 11,66 |
| <i>h cm</i> | | 105 | 105 | 105 | 105 |
| <i>A cm2</i> | | 64,22 | 64,22 | 64,22 | 64,22 |
| <i>k cm/s</i> | | 7,78.10 | 6,23 | | |
| <i>Kmoy cm/s</i> | | 7,01.10⁻⁴ cm/s | | 5,54.10⁻⁴ cm/s | |
| <i>W1 Moule + Poreuse</i> | | 3 Kg | | | |
| <i>W1 +Echantillon + Poreuse</i> | | 3,355 Kg | | | |

Tableau IV.19 : Les résultats des Essais à charge variable

| <i>Essai a charge variable</i> | | | |
|---|--------------------------------|---------|---------|
| <i>N° ESSAI</i> | 1 | 2 | 3 |
| <i>temps s</i> | 52,65 | 32,15 | 44,24 |
| <i>L cm</i> | 11,66 | 11,66 | 11,66 |
| <i>h cm</i> | 94 -75 | 75 - 66 | 66 - 54 |
| <i>h cm</i> | 19 | 9 | 12 |
| <i>A cm2</i> | 14,01 | 8,25 | 10 |
| <i>k cm/s</i> | 0,040 | 0,063 | 0,059 |
| <i>Kmoy cm/s</i> | 0,054 cm/s | | |
| <i>Kmoy m/s</i> | 5,4.10⁻⁸ m/s | | |
| <i>W1 Moule + Poreuse</i> | 3 Kg | | |
| <i>W2 Moule + Echantillon + Poreuse</i> | 3,355 Kg | | |

Les résultats obtenus dans les deux essais, pour l'étude de perméabilité, nous ont donné les valeurs du coefficient moyen. Lorsque nous prenons avec l'ajout des pertes les valeurs dans le tableau des ordres de grandeurs du coefficient de perméabilité on remarque que notre sol étudié se situe entre 10^{-7} et 10^{-3} ce qui vient éclaircir le type de perméabilité de notre sol tout en donnant le type de sol a un détail près, à savoir un de Sables argileux-slit-limons, étant donné que 10^{-6} cm/s représente une vitesse de 30cm par an, on voit que les sols argileux ont une vitesse de perméabilité inférieure a 3cm par an pour un gradient hydraulique par unité.

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

IV.5. Les paramètres clés des besoins en eau d'une culture

IV.5.1. Évaluation théorique :

Dans des conditions optimales d'approvisionnement en eau nous comparons la quantité d'eau disponible naturellement pour les végétaux et les prélèvements de ces mêmes végétaux supposés.

Besoin net = prélèvement – fraction des précipitations stockée dans la zone racinaire- réserve éventuelle

$$\text{Besoin net} = ETM - Pu - Kc \cdot RFU$$

En manière d'irrigation, on cherche à placer les plantes dans des conditions de production optimales et on base l'irrigation sur la valeur de l'évapotranspiration maximale ETM.

IV.5.1.1. Evaluation des besoins des cultures ETM

C'est la quantité d'eau à donner pendant toute la période de végétation ou les besoins en eau des cultures ou moment de déficit.

$$ETM = ETP * Kc$$

L'ETP : L'évapotranspiration de référence en (mm/mois).

Kc : Le coefficient culturel entre (0 et 1)

(Pu) (mm) : Pluie utile

RFU : La réserve facilement utilisable).

N.B : 1 mm d'eau de pluie tombé sur une superficie de 01 hectare correspond à 10 m³

IV.5.1.2. Calcul du bilan hydrique du sol

Le calcul du bilan hydrique estime l'écoulement et l'évapotranspiration sur un pas de temps décadaire ou mensuelle en fonction du sol et de la météorologie.

IV.5.1.2.1. Déficit en eau

Déficit en eau est la comparaison entre les besoins mensuelles des plantes avec la quantité d'eau disponible par le sol au cours de la période de végétation.

IV.5.1.2.2. Déficit pluviométrique (climatique)

Déficit pluviométrique ou climatique est la différence entre l'ETM et le module pluviométrique correspondant :

$$dp = ETM - P$$

- P correspond à la pluviométrie, exprimée en millimètres.
- ETM est l'évapotranspiration potentielle en millimètres,

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

Il est important de noter que les excédents de précipitation sont perdus par infiltration et ruissellement et ne viennent pas de compenser les déficits des autres mois, et on résulte que le déficit pluviométrique annuelle évaluée mois par mois.

IV.5.1.2.3. Déficit agricole

Il n'est pas nécessaire de fournir au sol chaque mois la totalité de déficit pluviométrique si le sol peut mettre à la disposition de la plante une certaine quantité d'eau prise par sa réserve utilisable

$$da = ETM - P - Kc \cdot RFU$$

- La réserve utile des sols : La réserve utile (RU) est la quantité d'eau stockée dans le sol qui peut être absorbée par les racines des plantes (entre la capacité de rétention et le point de flétrissement)

Elle est donnée par la formule :

$$RU = \sum_0^h \left(\frac{Hr - Hf}{100} \right) \cdot dz$$

Avec :

RU : réserve utile.

h : profondeur des racines.

Hr : capacité de rétention.

Hf : point de flétrissement.

dz : tranches de sol.

$$\text{En général : } Hf = 0.55 \times Hr$$

Soit :

$$RU = \sum_0^h \left(\frac{0,45 * Hr}{100} \right) \cdot dz$$

Remarque :

On a pris les valeurs d'humidité équivalente H_e obtenue par l'essai « HUMIDITÉ DU SOL » égale à Hr .

IV.5.2. La dose d'irrigation.

La dose d'irrigation est la quantité d'eau nécessaire d'amené pour assurer le déficit de l'humidité du sol pendant la période de végétation.

La dose réelle d'irrigation ' dr ' (volume d'eau) qu'il faut apporter à chaque irrigation dépend de la profondeur explorée par les racines et de la nature du sol :

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

Dose réelle = RU X (RFU / RU) x profondeur enracinement

Tableau IV.20: La réserve utile des sols

| <i>Type des sols</i> | <i>RU%</i> |
|---------------------------------------|------------|
| Sols sableux | 6 |
| Sols moyens (limoneux-sablo/argileux) | 12 |
| Argiles | 16 |

IV.5.3. La dose pratique d'arrosage (dp)

RFU est la réserve facilement utilisable, c'est-à-dire la réserve d'eau dans le sol disponible pour les plantes, exprimée en millimètres. Elle est considérée à 2/3 de la RU qui est égale au taux d'humidité multiplié par la profondeur atteinte par les racines.

Cette valeur est communément admise dans le bassin méditerranéen (En m³/ha)

$$RFU = \frac{2}{3}RU$$

Pour notre zone d'étude, les calculs de la RU et la RFU sont donnés par le tableau suivant :

Tableau IV.21: Réserves utiles et Reserve facilement utilisable du sol

| <i>Cultures</i> | | <i>Profondeur des racines h (cm)</i> | <i>RU (%)</i> | <i>RFU (%)</i> |
|-----------------|---------|--------------------------------------|---------------|----------------|
| Arboriculture | Agrume | 180 | 110,33 | 73,55 |
| | Pommier | 90 | 110,68 | 73,78 |

Mais en réalité, les sols argileux sont souvent compacts et moins bien explorés par les racines que les sols sableux et on recommande les rapports suivants :

Tableau IV.22 : la réserve facilement utilisable

| <i>Type des sols</i> | <i>RFU/RU</i> |
|----------------------|---------------|
| Sols argileux | 0.5 |
| Sols limoneux | 0.65 |
| Sols sableux | 0.75 |

En pratique, on déconseille d'attendre que le sol soit revenu au point de flétrissement avant de pratiquer une irrigation. On déclenche l'irrigation dès que la "réserve facilement utilisable" (RFU) a été consommée. Il s'agit d'une estimation très approximative, car on a pu montrer que le rapport RFU/RU dépend des cultures. Dans un même sol les cultures résistantes à la sécheresse disposent d'une RFU plus importante que les cultures sensibles.

Kc coefficient cultural [0,1] : Kc, le coefficient cultural dépend de la nature de culture, de la phase de végétation et des conditions climatiques ; les valeurs de Kc dans la période de pointe s'écartent de l'unité donc nous prendrons Kc = 1.

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

IV.5.4. Module d'arrosage m.

Ou débit pratique, c'est le débit d'eau dont l'irrigation dispose pour le déverser sur le sol de parcelle à irriguer. Il est choisi selon :

- La méthode ou la technique d'arrosage.
- La topographie de la parcelle.
- La perméabilité du sol.

m : varie entre 20 et 120 l/s

Le module (m) est fonction de la perméabilité du sol (K). Il faut donner autant d'eau que le sol est capable d'en absorber par infiltration. Il conviendrait cependant de relier le module (m) à la vitesse d'infiltration (K) :

$$m = K \times S \text{ (En m}^3\text{/s)}$$

Où S : la superficie à irriguer ;

IV.5.5. Bilan eau-énergie

Le bilan hydrique est corrélé au bilan énergétique dans les régions arides et semiarides. Il est donc clair que **ETR** dans les régions humides est habituellement inférieur à **P**, c'est-à-dire **P > ETR > 0**, c'est-à-dire **ETR = ETP**.

Cependant, dans les régions semi-arides et arides ETP est dépendant des ressources énergétiques et ETR est dépendant des ressources hydriques, c'est-à-dire **ETR < ETP**.

L'énergie requise pour le changement de la phase liquide à la phase gazeuse (évaporation) est très importante et joue un rôle substantiel dans les échanges énergétiques du système climatique. (Fsnv Univbba, 2018)

IV.5.6. Évaluation du débit de pointe :

Le calcul des besoins en eau permettra la détermination débits de pointe de champ. Le débit de pointe est en général basé sur la satisfaction des besoins en eau de la culture la plus exigeante dans la période où la consommation est maximale.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau ci-dessous mais avant de présenter le Tableau IV.15 des Besoins en eau d'irrigation des Agrumes de type clémentine à Hennaya, présentons le logiciel de calcul utilisé Cropwat :

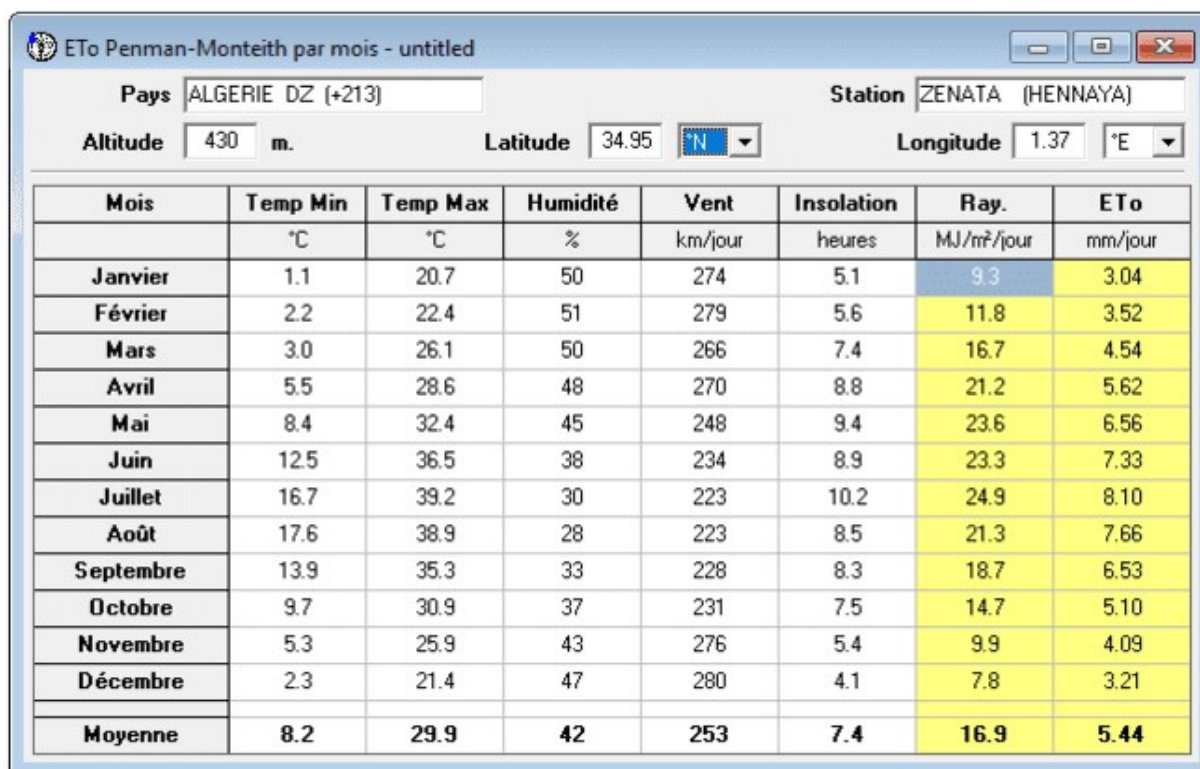
Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

IV.6. Présentation du logiciel Cropwat :

Le CROPWAT 8.0 est un logiciel d'aide à la gestion de l'irrigation. Il a été mis au point par la FAO en 1992, il est basé sur la formule de Penman - Monteith modifiée. Il permet de calculer et de donner les besoins en eau des cultures, les calendriers d'irrigation et l'approvisionnement en eau du système ; CROPWAT 8.0 peut également être utilisé pour évaluer les pratiques d'irrigation des agriculteurs et pour estimer les performances des cultures dans des conditions pluviales et irriguées, basés sur les Bulletins d'irrigation et de drainage FAO-24 et 33.

Cropwat 8.0 accepte d'entrer jusqu'à 30 cultures en même temps, existant dans une même parcelle d'un hectare pour donner les besoins en eau d'un hectare moyen (All crop) et le graphe cropping pattern de l'ensemble des cultures entrées.

Tableau IV.23: Les résultats obtenus par le logiciel CROPWAT



| Mois | Temp Min °C | Temp Max °C | Humidité % | Vent km/jour | Insolation heures | Ray. MJ/m ² /jour | ETo mm/jour |
|----------------|----------------|----------------|---------------|-----------------|----------------------|---------------------------------|----------------|
| Janvier | 1.1 | 20.7 | 50 | 274 | 5.1 | 9.3 | 3.04 |
| Février | 2.2 | 22.4 | 51 | 279 | 5.6 | 11.8 | 3.52 |
| Mars | 3.0 | 26.1 | 50 | 266 | 7.4 | 16.7 | 4.54 |
| Avril | 5.5 | 28.6 | 48 | 270 | 8.8 | 21.2 | 5.62 |
| Mai | 8.4 | 32.4 | 45 | 248 | 9.4 | 23.6 | 6.56 |
| Juin | 12.5 | 36.5 | 38 | 234 | 8.9 | 23.3 | 7.33 |
| Juillet | 16.7 | 39.2 | 30 | 223 | 10.2 | 24.9 | 8.10 |
| Août | 17.6 | 38.9 | 28 | 223 | 8.5 | 21.3 | 7.66 |
| Septembre | 13.9 | 35.3 | 33 | 228 | 8.3 | 18.7 | 6.53 |
| Octobre | 9.7 | 30.9 | 37 | 231 | 7.5 | 14.7 | 5.10 |
| Novembre | 5.3 | 25.9 | 43 | 276 | 5.4 | 9.9 | 4.09 |
| Décembre | 2.3 | 21.4 | 47 | 280 | 4.1 | 7.8 | 3.21 |
| Moyenne | 8.2 | 29.9 | 42 | 253 | 7.4 | 16.9 | 5.44 |

IV.7. Dimensionnement.

Le réseau d'irrigation goutte à goutte N 1 proposé pour notre verger d'agrumes se composera d'un puits équipé d'une pompe immergée qui alimente un réservoir surélevé. Ce dernier assurera la mise en charge d'un réseau de distribution par l'intermédiaire d'une tête morte, de 2 portes rampes et plusieurs rampes (figure IV.1). Notre verger d'agrumes est subdivisé en deux parcelles identiques. Chaque parcelle comportera une porte rampe qui alimentera 18

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

rampes et chacune est équipée de 64 goutteurs. Chaque rampe aura à son entrée une vanne d'ouverture et de fermeture automatique mais qui peut être fermée manuellement (figure IV.2).

IV.7.1. Dimensionnement d'un réseau goutte à goutte (PREMIÈRE MÉTHODE)

IV.7.1.1. Données générales

Le dimensionnement du réseau d'irrigation localisée nécessite la connaissance de données de base comme la surface de la parcelle, les besoins journaliers et le temps maximum journalier de travail.

Le réseau d'irrigation sera installé sur une exploitation de 3 hectares.

- **Culture** : Agrumes
 - Espacement entre arbres : 5 m
 - Espacements entre rangs : 5 m
 - **Besoins de pointe 157.55mm**
- **Caractéristique du goutteur**
 - Débit nominal : 8l/h
 - Pression nominale : 10 m.c.e
 - Espacement des goutteurs : 2 m
 - Le nombre de goutteurs par arbre : 2

IV.7.1.1.1. Besoins d'irrigation des cultures en irrigation localisée

IV.7.1.1.1.1. Besoins journaliers

En eau d'irrigation localisée pour le pommier sont calculés par les formules suivantes :

B_j = Besoin du mois de pointe (mm).

$$B_j = \frac{\text{Besoin du mois de pointe}}{\text{Nombre de jours}}$$

IV.7.1.1.1.2. Besoin journalier en tenant compte de la réduction K_r

En micro-irrigation, les apports d'eau étant localisés sur une portion très faible de la surface du sol située au voisinage des plantes, On applique alors à L'ETM un coefficient de réduction :

K_r tel que : $ETM_r = ETM * K_r$

K_r dépend du taux de couverture du sol ($C_s = 60\%$) par les plantes adultes et peut être calculé par :

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

IV.7.1.1.1.3. La formule de Freeman et Garzoli :

$$K_r = C_s + 0,5(1 - C_s)$$

Pour notre cas, on considère un taux de couverture égale à 60% (pour les arbres adultes) donc :

$K_r = 0.71$ selon Keller et Karmeli

$K_r = 0.80$ selon Freeman et Garzoli

$K_r = 0.70$ selon Decroix (CTGREF)

Selon (Freeman et Garzoli) C_s : Couverture du sol ; pour l'abricotier : $C_s = 60\%$

D'où :

$$B_{jl} = B_j * K_r$$

IV.7.1.1.2. Dose d'irrigation nette pratique

Le besoin d'irrigation, **Bnet** est le volume d'eau d'irrigation théoriquement nécessaire pour obtenir une production normale sur l'ensemble de la surface cultivée.

$$D_{np} = (H_{cc} - H_{pf}) \cdot Da \cdot Y \cdot Z \cdot P\% = RFU * P\%$$

Où :

H_{cc} : humidité à la capacité au champ ($H_{cc}=27\%$)

H_{pf} : humidité au point de flétrissement ($H_{pf}=13\%$)

Y : degré d'extraction de l'eau du sol ($Y=2/3$)

Z : profondeur d'enracinement en ($Z= 1800$ mm)

Da : est la densité apparente du sol ($Da=1.4$)

P : Pourcentage du sol humidifié

$$P\% = \frac{\eta \times Spd \times Sh}{Sa \times Sr}$$

Où

P : Volume du sol humidifié

η : Nombre de point de distribution par arbre (2 par arbre)

Spd : Distance entre deux points de distribution voisins du même arbre (2m)

Sh : Largeur de la bande humidifiée (2m)

Sr : Ecartement entre rangs d'arbre (5m)

Sa : espacement des arbres sur les rangs (5m)

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

IV.7.1.1.3. Fréquence des arrosages

La fréquence d'arrosage est donnée par la formule suivante : $Fr = \text{Dose nette} / Bjr$

Après la détermination de la fréquence d'arrosage, on recalcule :

La dose réelle : $Dr = Fr * Bjl$

La dose brute : $D_{brute} = Dr / (Cu * Eff)$

Cu : coefficient d'uniformité $Cu = 90\%$

Eff : efficacité du réseau d'irrigation $Eff = 90\%$

IV.7.1.1.4. Durée d'arrosage par mois

$$\theta = \frac{D\eta \times Sa \times Sr}{\eta \times qg}$$

IV.7.1.1.5. Durée d'arrosage journalier

$$Dj = \frac{\text{Duree d'arrosage}}{Fr}$$

- Débit : $Qr = Qg * Nr$

$Qpr = Qr * Nr$

Où :

Qr : Débit de rampe

Qg : Débit des goutteur

Ng/r : Nombre des goutteurs par rampe

Nr : Nombre des rampes

qg : débit choisit des goutteurs

Qpr : Débit de porte rampe

Avec :

La longueur de la rampe (Lr) : 165 m

La longueur de la porte rampe (Lpr) : 95 m

Débit de la rampe : $Qr = Ng * Qg$

Débit de la porte rampe : $Qpr = Qr * Nr$

Diamètre de la rampe et porte rampes

Pour le calcul des dimensions des canalisations (rampe et porte rampe), on propose que les rampes soient en PEHD.

Le diamètre de rampes ainsi que des portes rampes est calculé d'après les formules suivantes :

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

$$\varnothing r(cal) = \left[\frac{P.d.c(r) * 2.75}{0.478 * Q(r)^{1.75} L(r)} \right]^{\frac{1}{4.75}}$$

$$\varnothing pr(cal) = \left[\frac{P.d.c(pr) * 2.75}{0.478 * Q(pr)^{1.75} L(pr)} \right]^{\frac{1}{4.75}}$$

Où :

- Pdc(r) : la perte de charge dans la rampe
- Q(r) : le débit de la rampe en l/h
- L(r) : la longueur de la rampe en m
- Ør(cal) : le diamètre de rampes
- Øpr(cal) : le diamètre de porte rampe

Tableau IV.25 : Résultats des calculs des besoins net mensuelles en eau.

| Mois | Pluie (mm) | Peff (mm) | ETO (mm/mois) | Kc | ETM | RFU | B net (mm) |
|---------|------------|-----------|---------------|------|--------|-------|------------|
| Sep | 24.6 | 23.6 | 127.18 | 0.90 | 114.46 | 73.55 | 90.86 |
| Oct | 38.7 | 36.3 | 110.87 | 0,90 | 99.78 | 73.55 | 0 |
| Nov | 60.9 | 55 | 92.15 | 0,90 | 82.94 | 73.55 | 0 |
| Dec | 42.7 | 39.8 | 89.71 | 0.80 | 71.77 | 73.55 | 0 |
| Jan | 54.1 | 49.4 | 91.92 | 0,80 | 73.54 | 73.55 | 0 |
| Feb | 44.8 | 41.6 | 89.70 | 0,80 | 71.76 | 73.55 | 0 |
| Mar | 49.1 | 45.2 | 109.65 | 0,80 | 87.72 | 73.55 | 0 |
| Avril | 44.5 | 41.3 | 118.41 | 0.75 | 88.81 | 73.55 | 0 |
| Mai | 35.1 | 33.1 | 137.82 | 0.70 | 103.37 | 73.55 | 15.11 |
| Juin | 9.8 | 9.6 | 149.04 | 0.70 | 111.78 | 73.55 | 47.02 |
| Juillet | 2.3 | 2.3 | 163.97 | 0,70 | 114.78 | 0 | 60.99 |
| Août | 7.3 | 7.2 | 155.35 | 0,70 | 108.75 | 0 | 50.07 |

Un besoin élevé dans le mois de septembre dû à l'épuisement totale de la RFU du mois de juillet et d'aout rendant ainsi la demande en eau de la plante élevé d'où le besoin net du mois de septembre s'élève à 90,86mm.

IV.7.1.1.6. Calcul du débit spécifique

Besoin max mensuel =90,86mm

qsp =1.42 (l/s /ha)

IV.7.1.1.7. Calcul du débit caractéristique

Sachant que : S = 3 ha

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

S : la superficie nette à irriguer = 3 ha

$Q_{car} = q_{sp} \cdot S = 1.42 \cdot 3$

Q caractéristique= 4,26 l/s

Ce débit est un débit régulier convenable pour notre système afin de combler les besoins en eau des plantes, ce qui évite un surdimensionnement du réseau.

IV.7.1.1.8. Estimation des volumes d'irrigation

Tableau IV.26 : Estimation des volumes d'irrigation

| Culture | Surface occupée (ha) | Besoin brute (m ³ /ha) | Volume (m ³ /an) |
|---------|----------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Agrumes | 3 | 908,6 | 15000 |

IV.7.1.1.9. Dimensionnement hydraulique d'un réseau goutte à goutte

Nous résumons l'ensemble des résultats des calculs hydrauliques dans le tableau

IV. 27 Suivant :

Tableau IV.27: Calcul hydraulique du réseau goutte à goutte

| Indice | Valeur |
|--|-------------------|
| <i>Besoin de mois de point (Septembre)</i> | B=90,86 mm |
| <i>Kr coefficient de reduction</i> | Kr=0.8 |
| <i>Besoin journalier en tenant compte de la réduction Kr</i> | Bj= 3,03 mm/j |
| <i>P : Pourcentage du sol humidifié</i> | P= 32 % |
| <i>Fr : La fréquence d'arrosage</i> | Fr= 8 jours. |
| <i>D_p La dose nette</i> | Dp=23,54 mm |
| <i>La dose réelle</i> | Dr=24,24 mm |
| <i>La dose brute</i> | Db= 29,93 mm |
| <i>Durée d'arrosage par mois</i> | Θ= 40 h/mois |
| <i>Durée d'arrosage journalier</i> | Dj= 5 h/jour |
| <i>Le nombre d'arbres par rampe</i> | N arbres=33arbres |
| <i>Nombre de goutteurs par rampe</i> | Ng=66 goutteurs |
| <i>Le nombre de rampes</i> | Nr= 18 rampes |

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

| | |
|---|---------------|
| Débit de la rampe | Qr= 160 l /h |
| Diamètre de la rampe | Dn= 20 mm |
| Débit de la porte rampe | Qpr=10008 l/h |
| Diamètre de la porte rampe | Dn= 75 mm |
| Vitesse corrigée de la porte rampe | Vc= 0,63 m/s |

IV.7.2. Dimensionnement d'un réseau goutte à goutte (DEUXIÈME MÉTHODE)

IV.7.2.1. Choix du gouteur :

Dans cette étude, nous allons choisir le gouteur autorégulant parce qu'il est facile à nettoyer dans un terrain limon sableux. Il réalise une pression sur une plage de 1 à 3 bar.

Aussi pour le débit on doit d'abord régler les gouteurs, et on fixe les différents débits : 4l/h ou 8l/h et potentiellement le 16l/h. Nous avons calculé aussi le volume par jour de chaque débit avec formule suivante :

$$V = q \times 24$$

Tableau IV.28 : Caractéristiques des gouteurs proposés

| Débit des gouteurs (l/h) | 4 | 8 | 16 |
|---------------------------------|----------|----------|-----------|
| Volume par jour (l/jour) | 96 | 192 | 384 |

Pour notre exploitation nous avons initialement opté pour un gouteur d'un débit de 8 l/h.

En conséquence, nous avons installé deux (2) gouteurs par arbre en fonction de l'espacement entre les rampes et entre les gouteurs qui est de 5m × 2,5m.

Pour chaque gouteur, nous procéderons aux calculs de sa surface correspondante en utilisant l'équation suivante :

$$S = E \times e$$

En utilisant la dose journalière obtenue à partir du tableau des besoins réduits (mm/jour), on obtient le volume :

$$V = S \times \text{dose journaliere}$$

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

IV.7.2.2. Paramètres de la micro irrigation :

Afin de procéder aux études des besoins en eaux, nous avons calculé les besoins réduits mensuelles :

Le tableau suivant représente les quelques paramètres permettant d'estimer les besoins en eaux des agrumes et plus exactement les besoins réduits pour les agrumes clémentines.

Tableau IV.29 : Les besoins réduits pour les AGRUMES

| Calendrier d'irrigation des cultures | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|------|------------------|-------|--|-----|-----------------|-----------|----------------------------------|-------|------------|--------|------------|--|--|--|
| Station ETo | | ZENATA (HENNAYA) | | Culture | | AGRUME | | Date de plantation | | 17/06 | | Baisse Rdt | | | |
| Station Pluie | | ZENATA (HENNAYA) | | Sol | | argilo-limoneux | | Date de récolte | | 15/06 | | 0.0 % | | | |
| Format Tableau | | | | Échéance: Irriguer à l'épuisement maximum | | | | | | | | | | | |
| <input checked="" type="radio"/> Calendrier irrigation | | | | Apport: Recharger sol à la capacité au champ | | | | | | | | | | | |
| <input type="radio"/> Bilan hydrique journalier | | | | Eff. au champ 70 % | | | | | | | | | | | |
| Date | Jour | Phase | Pluie | Ks | Etr | Épuis. | Irr. Net. | Déficit | Perte | Irr. Brut. | Débit | | | | |
| | | | mm | fract. | % | % | mm | mm | mm | mm | l/s/ha | | | | |
| 17 Jui | 1 | Init | 1.2 | 1.00 | 100 | 33 | 60.3 | 0.0 | 0.0 | 86.2 | 9.98 | | | | |
| 27 Jui | 11 | Init | 1.0 | 1.00 | 100 | 31 | 63.1 | 0.0 | 0.0 | 90.1 | 1.04 | | | | |
| 9 Jui | 23 | Init | 0.0 | 1.00 | 100 | 31 | 73.2 | 0.0 | 0.0 | 104.6 | 1.01 | | | | |
| 22 Jui | 36 | Init | 0.0 | 1.00 | 100 | 31 | 83.4 | 0.0 | 0.0 | 119.1 | 1.06 | | | | |
| 6 Aoû | 51 | Init | 0.0 | 1.00 | 100 | 31 | 92.9 | 0.0 | 0.0 | 132.7 | 1.02 | | | | |
| 25 Aoû | 70 | Croiss. | 0.0 | 1.00 | 100 | 32 | 113.0 | 0.0 | 0.0 | 161.4 | 0.98 | | | | |
| 19 Sep | 95 | Croiss. | 0.0 | 1.00 | 100 | 34 | 139.0 | 0.0 | 0.0 | 198.6 | 0.92 | | | | |
| 31 Oct | 137 | Croiss. | 0.0 | 1.00 | 100 | 39 | 197.9 | 0.0 | 0.0 | 282.7 | 0.78 | | | | |
| Totaux | | | | | | | | | | | | | | | |
| Irrigation brute totale | | | | 2204.9 mm | | | | Précipitations totales | | | | 414.0 mm | | | |
| Irrigation nette totale | | | | 1543.5 mm | | | | Précipitations efficaces | | | | 406.2 mm | | | |
| Pertes totales d'irrigation | | | | 0.0 mm | | | | Pertes totales de précipitations | | | | 7.8 mm | | | |
| Utilisation réelle d'eau par culture | | | | 1851.4 mm | | | | Déficit d'eau à la récolte | | | | 63.7 mm | | | |
| Utilisation potentielle d'eau par culture | | | | 1851.4 mm | | | | Besoins en eau réels | | | | 1445.2 mm | | | |
| Efficience calendrier d'irrigation | | | | 100.0 % | | | | Efficience des précipitations | | | | 98.1 % | | | |
| Inefficacités calendrier d'irrigation | | | | 0.0 % | | | | | | | | | | | |
| Baisses du rendement | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | Phase | | A | | B | | C | | D | | Saison | | | |

Pour dimensionner un réseau de goutte-à-goutte, plusieurs paramètres rentrent en jeu notamment :

- Les données de base comme la surface de la parcelle, les besoins journaliers et le temps maximal journalier d'arrosage.
- La superficie de la zone agricole qui est de 12ha.
- L'étude a défini le nombre de secteur d'arrosage ; Chaque ligne de plante sera irriguée à partir d'une rampe de longueur $L_r=165m$ portant des gouteurs espacés de $E_g=5m$

Le réseau d'irrigation sera installé sur la surface totale de notre zone à irriguer d'une valeur de $29700m^2$ soit 3 hectares en fonction du nombre de gouteurs repartis sur la parcelle on a le nombre d'arbre exact égale à 1188 arbres d'agrumes clémentines.

Démontrons la valeur de la surface à irriguer selon les dimensions choisit :

$$\text{Surface Parcelle (A + B)} = L_{\text{rampe}} \times 2 \times (N \text{ rampe} \times 5)$$

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

$$\text{Surface Parcelle (A + B)} = 165 \times 2 \times (18 \times 5) = 29700 \text{ m}^2$$

Les résultats de calcul liés au réseau d'irrigation sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau IV. 30 : Nombre et longueur de rampe par porte rampe et nombre de goutteurs

| Parcelle | 1 | 2 | Totaux |
|--|-------|-------|--------|
| Nombre de rampes | 18 | 18 | 36 |
| Longueur de chaque rampe (m) | 165 | 165 | 330 |
| Nombre de goutteur/rampe | 64 | 64 | 128 |
| Nombre de goutteurs dans chaque parcelle | 1188 | 1188 | 2376 |
| Surface de chaque parcelle(Lr*Nr*Es) m2 | 14850 | 14850 | 29700 |

IV.7.2.3. Dimensionnement du réseau

Le réseau d'irrigation goutte à goutte proposé pour notre verger d'agrumes se composera d'un puits équipé d'une pompe immergée qui alimente un réservoir surélevé. Ce dernier assurera la mise en charge d'un réseau de distribution par l'intermédiaire d'une tête morte, de 2 portes rampes et plusieurs rampes (figure IV.23). Notre verger d'agrumes est subdivisé en deux parcelles identiques. Chaque parcelle comportera une porte rampe qui alimentera 18 rampes et chacune est équipée de 64 goutteurs, chaque rampe aura à son entrée une vanne d'ouverture et de fermeture automatique mais qui peut être fermée manuellement.

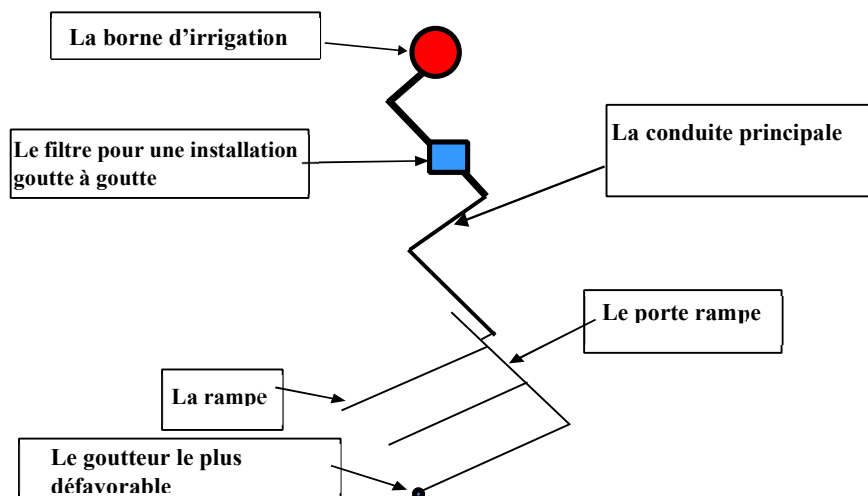


Figure IV.23 : Schéma des différents composants du système d'irrigation.

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

IV.7.2.3.1. Dimensionnement des rampes, porte, rampes et tête morte :

Dans le cadre de notre étude, nous avons mis en place un réseau d'irrigation goutte à goutte pour notre verger d'agrumes. Sachant les informations sont liées aux nombres tête morte, de porte rampes, de rampe et des goutteurs fournissant un débit de 16 l/h à chaque pied d'arbre. Nous signalons que la rampe sera considérée comme une conduite assurant un service en route (Les détails relatifs à la conduite assurant un service en route sont développés par DUPONT, elle sera dimensionnée pour un débit évalué par la relation :

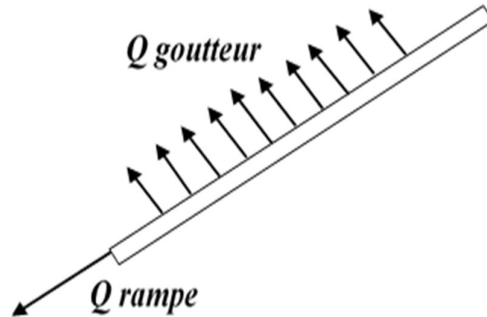


Figure IV.24 : schéma d'une conduite assurant un débit en route (DUPONT Bernard, 1979)

Notre dimensionnement portera principalement sur un débit évalué par les relations différentes caractéristiques des débits des rampes, des portes rampes et de la tête morte :

$$Q_{rampe} = 0,55 \times P$$

Avec :

$$P = Q_g \times N_g$$

Q_g : Débit de goutteur en m^3/s

$$P = \frac{16 \cdot 10^{-3} * 66}{3600} \quad P = 2,93 \cdot 10^{-4} \frac{m^3}{s}$$

$$Q_r = 0,55 \times P = 1,62 \cdot 10^{-4} \quad m^3/s$$

Calcul du diamètre : Nous prendrons la valeur de la vitesse V égale à 1m/s

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{\pi V}}$$

$$DN = 0,014m = 16 \text{ mm} \quad \text{On prend la valeur } DN = 20 \text{ mm}$$

Calcul de la vitesse corrigée :

On calcule la nouvelle vitesse après avoir déterminé le diamètre normalisé DN

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

$$V = \frac{Qv*4}{\pi DN^2}$$

$$Vc = 0,52 \text{ m/s}$$

Pour calculer le diamètre de la porte rampe ; tout comme la rampe, la porte rampe sera aussi considéré comme une conduite qui assure un débit de route dans la suite de notre travail.

$$Q_{\text{porte rampe}} = Q_{\text{rampe}} + 0,55 \times P$$

Déterminons premièrement P

$$P = Q_{\text{rampe}} \times N_{\text{goutteurs}}$$

$$P = 1,62.10^{-4} \times 66 = 1,06.10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{\text{porte rampe}} = 1,62.10^{-4} + 0,55 \times 1,06.10^{-3} = 1,76.10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

Calcul du diamètre

Le diamètre normalisé de la porte rampe sera alors :

$$DN = 0,043\text{m} = 52 \text{ mm} \text{ on prend la valeur du DN} = 52 \text{ mm}$$

Calcul de la vitesse :

On calcule la nouvelle vitesse après avoir déterminé le diamètre normalisé DN

$$V = \frac{Qv*4}{\pi DN^2}$$

$$Vc = 0,53 \text{ m/s}$$

Nous résumons les calculs précédents dans le tableau suivant :

Tableau IV.31 : Dimensionnement des rampes et portes rampes

| | <i>Rampe</i> | | | | <i>Porte rampe</i> | | | |
|-------------------|--------------|------------------------|---------|----------|--------------------|-------------------------|--------|----------|
| Paramètre | L (m) | Qr (m ³ /s) | DN (mm) | Vc (m/s) | L (m) | Qpr (m ³ /s) | DN(mm) | Vr (m/s) |
| Parcelle 1 | 165 | 1,62.10 ⁻⁴ | 20 | 0,52 | 95 | 1,75.10 ⁻³ | 52 | 0,53 |
| Parcelle 2 | 165 | 1,62.10 ⁻⁴ | 20 | 0,52 | 95 | 1,75.10 ⁻³ | 52 | 0,53 |

Les besoins en eaux annuels des agrumes obtenus d'après nos calculs via le logiciel Cropwat sont estimés à 1527mm, il faut noter que d'après la FAO, cette valeur est comprise entre 1400 mm et 1700 mm en Algérie. Pour la suite du travail j'utiliserai 1527mm afin d'éviter d'éventuel sous dimensionnement du réseau.

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

En effet, sachant que 1mm de pluie (eau) sur 1m² équivaut à 1l d'eau donc 1527mm = 1527 l d'eau, multiplions cette valeur par 10.000 m² pour avoir 15.270.000 l/ha/an = 41.835,62 l/jour/ha

Afin de répartir cette valeur sur notre périmètre d'étude d'une valeur exacte de 3 hectares, on aura

$$41.835,62 \text{ l/ha/jour} * 3 \text{ ha} = 125506,85 \text{ l/ha /jour} = 5229,45 \text{ l/heure pour 3 ha}$$

Tableau IV.32 : Résultats des besoins en eaux annuels de la culture d'agrumes clémentines obtenu à partir du logiciel Cropwat.

| | Jan | Fév | Mar | Avr | Mai | Jui | Jui | Aoû | Sep | Oct | Nov | Déc |
|------------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| Déficit Précipitations | | | | | | | | | | | | |
| 1. AGRUME | 50.0 | 70.0 | 111.7 | 135.0 | 167.7 | 152.0 | 172.1 | 161.6 | 141.0 | 120.6 | 81.5 | 74.1 |
| Bes. Ir. Net. du périmètre | | | | | | | | | | | | |
| en mm/jour | 0.9 | 1.3 | 1.8 | 2.3 | 2.7 | 2.5 | 2.8 | 2.6 | 2.4 | 1.9 | 1.4 | 1.2 |
| en mm/mois | 29.4 | 35.0 | 55.9 | 67.9 | 83.9 | 76.4 | 86.1 | 80.8 | 70.5 | 60.3 | 40.7 | 37.1 |
| en l/s/ha | 0.11 | 0.14 | 0.21 | 0.26 | 0.31 | 0.29 | 0.32 | 0.30 | 0.27 | 0.23 | 0.16 | 0.14 |
| Surface irriguée | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 |
| (% de la surface totale) | | | | | | | | | | | | |
| Bes. en Ir. pour surf. réél. | 0.22 | 0.29 | 0.42 | 0.52 | 0.63 | 0.59 | 0.64 | 0.60 | 0.54 | 0.45 | 0.31 | 0.28 |
| (l/s/ha) | | | | | | | | | | | | |

IV.7.2.3.2. Dimensionnement de la tête morte et calage de la cote réservoir :

Suivant le nombre de goutteurs implantés dans chaque parcelle, nous déterminons le débit total (Débit de la tête morte) et le débit de chaque parcelle (débit de la porte rampe), Le tableau suivant donne les calculs des débits pour chaque parcelle

Tableau IV.33 : Débit à apporter pour chaque parcelle.

| Parcelle | 1 | 2 |
|----------|---|---|
| Q (l/s) | 4 | 4 |

Nous irriguerons notre verger d'agrumes séparément dans la même tête selon les circonstances qui prennent en compte le temps d'arrosage, la perméabilité et surtout la saison dans le débit total QT=4l/s alors nous avons besoin de dimensionner le diamètre de la tête morte mais parfois en même temps.

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{\pi V}}$$

On pose $V = 1 \text{ m/s}$

$$D = \sqrt{\frac{4 \times 4.10^{-3}}{3,14}} = 0,071 \text{ m} = 75 \text{ mm}$$

$DN = 0,071\text{m}$ On prend la valeur $DN = 90 \text{ mm}$

La vitesse sera alors de :

$$V = \frac{4Q}{\pi d^2}$$

$$V = \frac{4 \times 0,004}{\pi \times 0,075^2} = 0,63 \text{ m/s} \quad (\text{vitesse est convenable puisque : } \ll 0,5\text{m/s} < V < 2,5\text{m/s} \gg)$$

Côte du réservoir :

Pour s'assurer une pression de fonctionnement pour tous les goutteurs et dans toutes les parcelles, le calcul se fait pour le cheminement le plus défavorable.

Pour ΔH_h nous ajoutons $0,5\text{bar} = 5\text{mce}$ pour une installation en tête du réseau du réseau goutte à goutte (filtres).

En appliquant l'équation de Bernoulli entre le point P2 et P1, on obtient :

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_{p1} = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_{p2}$$

NB : Les vitesses $V < 1 \text{ m/s}$ donc $\frac{V^2}{2g}$ est négligable avec $P_1 =$ pression au niveau du goutteur le plus défavorable étant de 1 bar et avec $P_2 =$ pression à la sortie du dernier port rampe.

$$\Delta H_t = P_2 - P_1$$

Avec : $j = 0.0069 \text{ m/m}$ (d'après les tables de COOLBROUK)

$$\Delta H_t = j \times L$$

$$\Delta H_t = 0.0069 \cdot 100 = 0,69 \text{ mm}$$

$$P_2 = 10,69 \text{ mm}$$

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

Nous appliquons également l'équation de Bernoulli entre le point P3 et P2 :

$$\frac{P_3}{\rho g} + \frac{V_3^2}{2g} + Z_{p3} = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_{p2}$$

Avec : $V_3 \approx 0$ donc $\frac{V_3^2}{2g}$ négligable

$$H_r = \frac{P_2}{\rho g} + \Delta H_t$$

La valeur estimée des pertes de charges est de 2 m

$$H_r = 8 \text{ m}$$

Pour éviter que le réservoir d'eau soit trop surélevé, ce qui rendra plus coûteux le système de pompage solaire. Donc pour assurer une pression minimale de 1 bar aux goutteurs les plus mal placés pour chaque parcelle, le réservoir de mise en charge doit être porté à une hauteur supérieure ou égale à 7 m et donc assurer la mise en charge adéquate de notre réseau de distribution.

Les services de l'ANRH indiquent l'existence d'un potentiel hydrique souterrain appréciable, avec des débits prévisionnels entre 10 et 15 l/s, à des profondeurs allant de quelques mètres à 200 m au niveau de la commune de Hennaya.

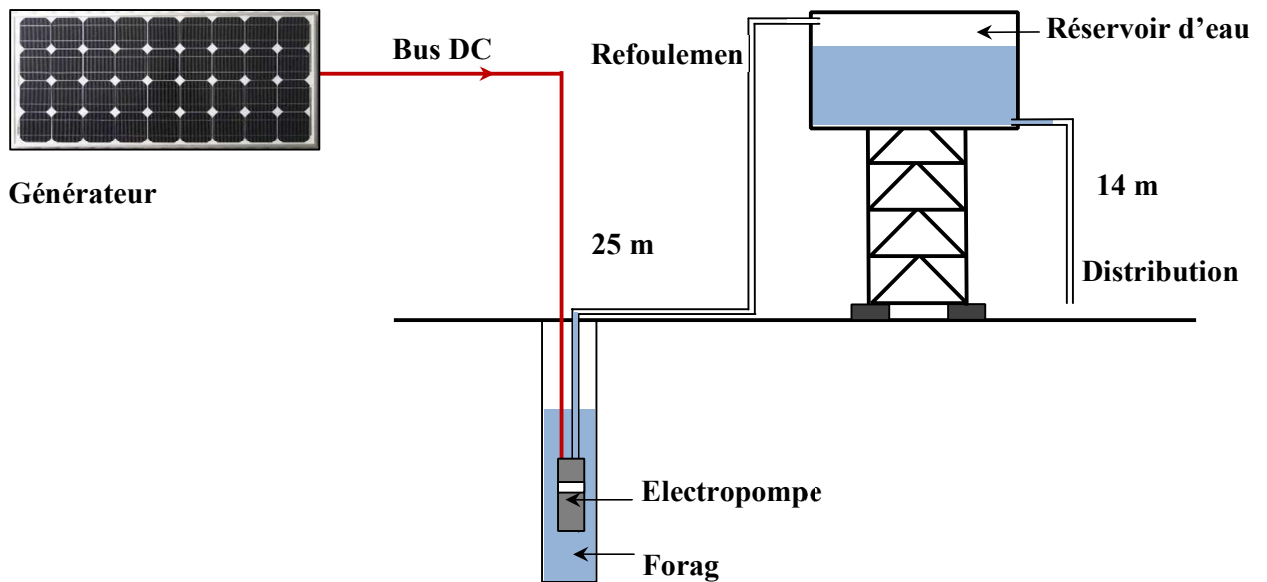


Figure IV.25 : Schéma du principe de pompage au fil du soleil.

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

IV.7.2.3.3. Dimensionnement du réservoir : (1ere option)

Le débit journalier nécessaire pour couvrir les besoins est de 4 l/s pour notre verger d'agrumes et 10 l/s pour toute la ferme agricole car sachant que nous avons une parcelle identique qui doit être irriguée selon les mêmes paramètres des besoins en eau et d'autre part des cultures existantes dans notre périmètre agricole. Nous proposerons de pomper un débit de 20 m³/h qui est supérieur au débit demandé car avec ce débit nous assurerons une réserve supplémentaire dans le réservoir nous permettant une autonomie sans pompage durant un temps d'environ 4,12 heures et sachant que les jours irrigables divergeront parfois. Le débit de 20 m³/h constituera une première approximation, qui peut être modifier suivant les impératifs du pompage lors du dimensionnement de la pompe de refoulement.

Nous dimensionnons le réservoir comme suit :

$$Q_s = Q_p - Q_d$$

Avec :

Q_s : débit stocké

Q_p : débit pompé

Q_d : débit distribué

$$\text{Donc : } Q_s = 5 \text{ l/s}$$

Sachant que la durée de pompage est de 4,12 heure soit 5 heure le débit pompé peut couvrir les besoins pendant 4 h il reste alors 12 min du pompage le débit distribué qui donne un volume de 57,6 m³ qui est additionné au volume pompé de 144 m³ et donc nous aurons besoin d'un réservoir d'une capacité minimale (sans débordement) de 200 m³, qui peut être arrondie à 205 m³ ce qui nous permettra d'avoir un certain confort et sécurité pour l'irrigation en cas d'un problème dans l'installation de pompage.

Finalement, avec cette capacité de stockage nous pouvons assurer une autonomie d'arrosage pour les deux différents terrains d'agrumes l'un le matin l'autre l'après-midi.

IV.7.2.3.4. Capacité du bassin (2eme option réelle sur le terrain)

Afin de l'utiliser pendant la nuit ou dans le cas d'insuffisance d'ensoleillement. Cette opération est plus pratique puisque le coût est très bas et la construction de réservoir ne nécessite pas beaucoup de dépense pour le changement ou l'entretien. C'est une citerne en béton armé

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

installée au sol sur une surface de 100 m² et une hauteur d'eau de 2 m, donc sa capacité est de 200 m³ et la distance entre le puit de forage et le bassin est environ de 25 m. (Voir la figure N°IV.26)

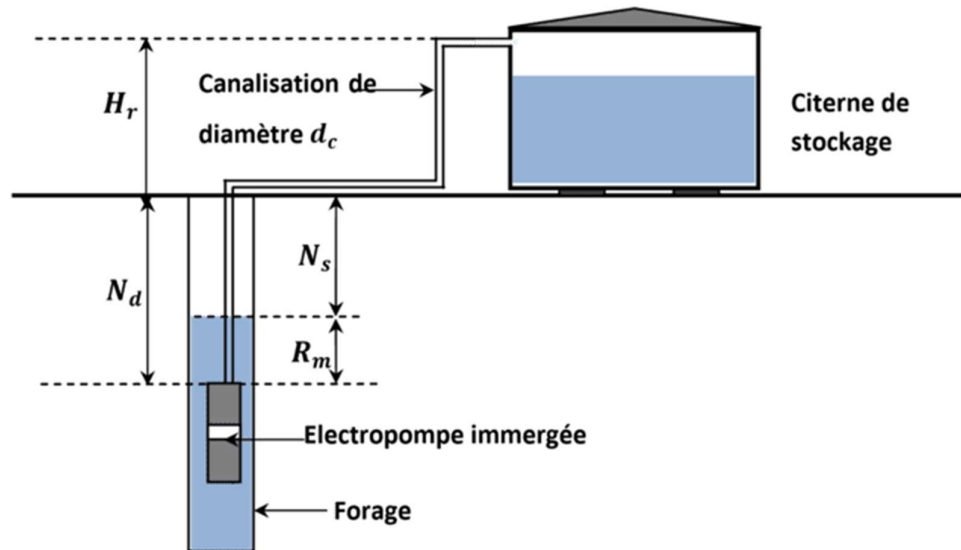


Figure IV.26 : Système de pompage avec stockage (Ismail Hamit, 2018)

IV.7.2.3.5. Dimensionnement de la conduite de refoulement :

Le débit total est de 4 (l/s) demandé mais nous utiliserons un débit à 10 l/s (le débit requis pour la ferme de 12 ha) comme expliqué plus haut pour le refoulement vers le réservoir. Alors, nous avons dimensionner le diamètre de la conduite de refoulement par la formule de BRESSE et la formule de BONIN et nous avons choisi celui qui donne une vitesse proche de 1 m/s.

IV.7.2.3.5.1. La formule de BRESSE : on utilise 4l/s juste pour la parcelle d'étude d'agrumes clémentine.

$$D = 1.5 \cdot Q^{\frac{1}{2}}$$

D = 0,095 m

DN=100 mm

❖ La vitesse est $V = \frac{4Q}{\pi d^2} = 0,51$ m/s

IV.7.2.3.5.2. Par la Formule de Bonnin :

$$D = Q^{\frac{1}{2}}$$

D = 0,063 mm DN = 80 mm d'où la vitesse V = 0,80 m/s

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

Alors, nous choisissons le diamètre DN = 80mm qui assure la vitesse la plus proche de 1 m/s (vitesse convenable)

IV.7.2.3.6. Calcul de la hauteur manométrique totale :

$$HMT = Hg + Hr + Nd + Pt$$

Hr = 8 m : Hauteur du réservoir.

Nd = 32 m : Niveau dynamique de la nappe.

Pt estimé à 1 bar.

Hg : hauteur géométrique d'aspiration et du refoulement, dans notre cas on a une pompe immergée, donc la hauteur d'aspiration égale 0

ΔHt : Perte de charge totale ; qui est égale à la somme des pertes de charge linéaires et singulières :

$$\Delta HT = \Delta Hl + \Delta Hs \dots (1)$$

$$\text{Avec : } \Delta Hs = 15\% \Delta hl \dots (2)$$

$$\Delta Hl = j \cdot L \dots (3)$$

Avec : j : perte de charge unitaire

On a un débit de 4 l/s et un diamètre normalisé de 80 mm ; la perte de charge unitaire est déterminée à partir des tables de COOLBROCK WHITE.

On prend $kk = 2 \cdot 10^{-3}$ et on obtient $j = 0.0021$

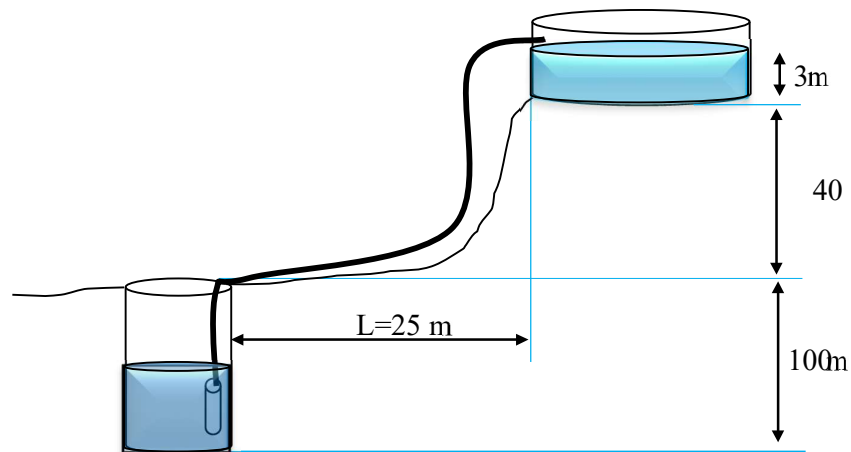


Figure IV.27 : Système de pompage hydraulique (hauteur manométrique totale)

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

Pour un bon dimensionnement d'un système de pompage, il faudrait d'abord identifier les besoins ; tels que : la quantité d'eau nécessaire (le débit), la profondeur à laquelle l'eau doit être pompée, la hauteur à laquelle l'eau doit être remontée, la distance à laquelle l'eau doit être transportée.

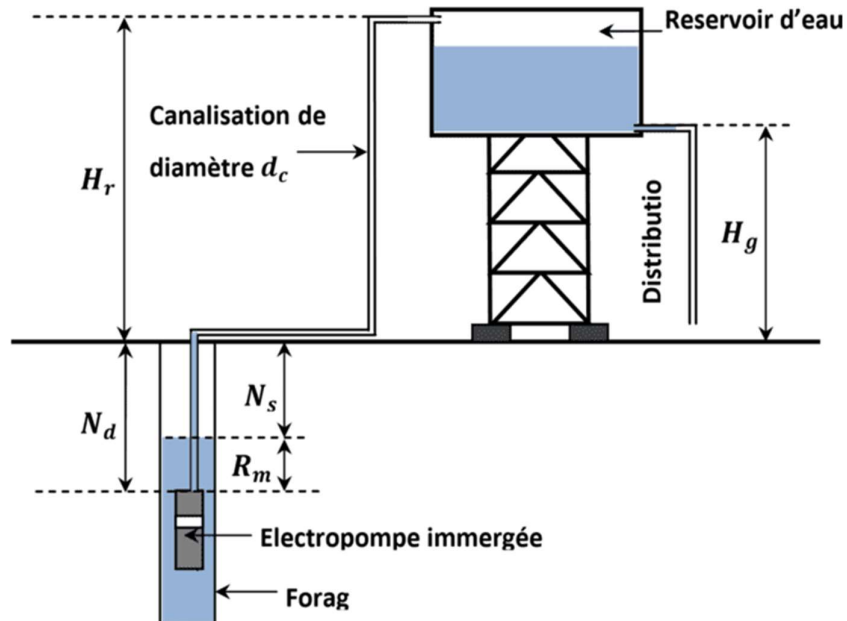


Figure IV.28 : Système de pompage d'eau avec stockage (Ismail Hamit, 2018)

IV.7.2.4. Dimensionnement de la station de pompage :

Le dimensionnement du système de pompage PV concerne la puissance crête du générateur photovoltaïque, le choix de la pompe et le choix de l'onduleur répondants au service requis dans les conditions de référence.

Dans cette partie, nous allons dimensionner deux types de pompes, la pompe immergée et la motopompe. Le choix des pompes sur le marché dépend des critères mentionnés dans le chapitre précédent.

Notre exemple est une ferme de 3 hectares. Son besoin journalier est de l'ordre de 10 l/s avec 50m de profondeur du puits comme il est illustré dans la figure N°IV.28 sachant que le débit exploitable est environ de 20m³/h.

IV. 7. 2. 4. 1. Choix de la pompe :

Le débit qui assurera les besoins et le stockage est un débit de 10 l/s sur une hauteur manométrique de 50 m. Le logiciel PV syst nous a aidé à dimensionner le système de pompage de chaque pompe est disponible avec un nombre de roues dans le but d'avoir le point de fonctionnement suivant :

Débit : Q=10 l/s et Hmt=50 m

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

Notre choix est fait selon le catalogue LORENTZ, où nous avons retenus la pompe immergée de type PSk2-7 C-SJ30-6, capable d'aspirer le débit voulu et plus sur une hauteur manométrique maximale égale à Hmt =150 m. (Solar Store, 2023)

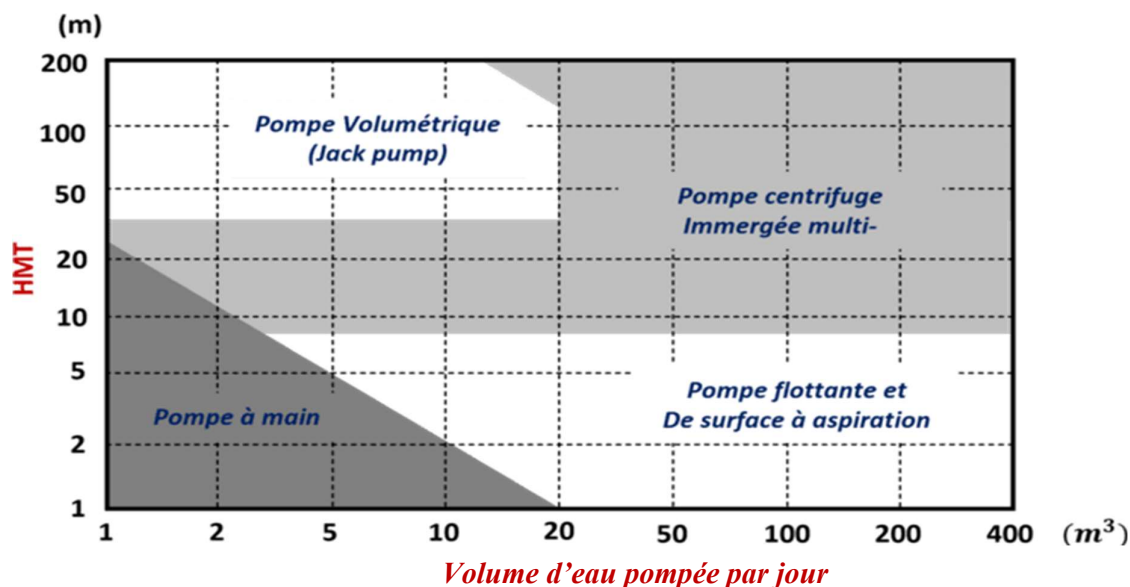


Figure IV.29 : Critères de choix de pompe selon besoin journalier et HMT (BAKRI M, 2005).

Tableau. IV.33 : Caractéristiques électriques de la pompe

| Marque LORENTZ | |
|-------------------------------|----------------------------------|
| Type : Pompe solaire immergée | PSk2-7 C-SJ30-6 |
| Débit maximum | 42 m ³ /h |
| Chute | 0-50 mCE |
| Diamètre de forage | Min 4,0 in (10.16cm) |
| Moteur AC DRIVE SUB 6'' | |
| Puissance nominale | 5,5 kW |
| Efficacité maximale | 85 % |
| Immersion maximale | 150 m |
| Vitesse du moteur | 1400 – 2905 tr/mn |
| Facteur de puissance | 0,88 |
| Contrôleur PSk2-7 | |
| Type : | Pompe a scanner pour Android App |
| Puissance maximale | 8,0 kW |
| Tension nominale | > 575 V |

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

| | |
|---------------------------------|-------------|
| Tension d'entrée maxi | 850 V |
| Intensité du moteur maxi | 13 A |
| Efficacité maximale | 98 % |
| Température ambiante | 30 à 50 ° C |
| Classe de protection | IP66 |

Le débit nécessaire que doit fournir la pompe est de 14,4 m³/h. De ce fait, nous devons trouver une pompe capable de fournir un tel débit.

IV.7.2.5. Dimensionnement du Générateur Photovoltaïque (PV) :

La méthode de dimensionnement d'une installation d'un système de pompage photovoltaïque pour un site donné se procède comme suit : déterminer la taille de chaque composante d'un système photovoltaïque pour satisfaire les besoins en énergie bien déterminée.

Les différentes étapes pour le dimensionnement d'une installation photovoltaïque sont :

- Calcul des besoins en énergie électrique de la station de pompage.
- Calcul du rayonnement global sur un plan horizontal.
- Calcul du rayonnement global sur un plan quelconque.
- Calcul de la surface du panneau solaire.
- Calcul de la capacité de stockage.

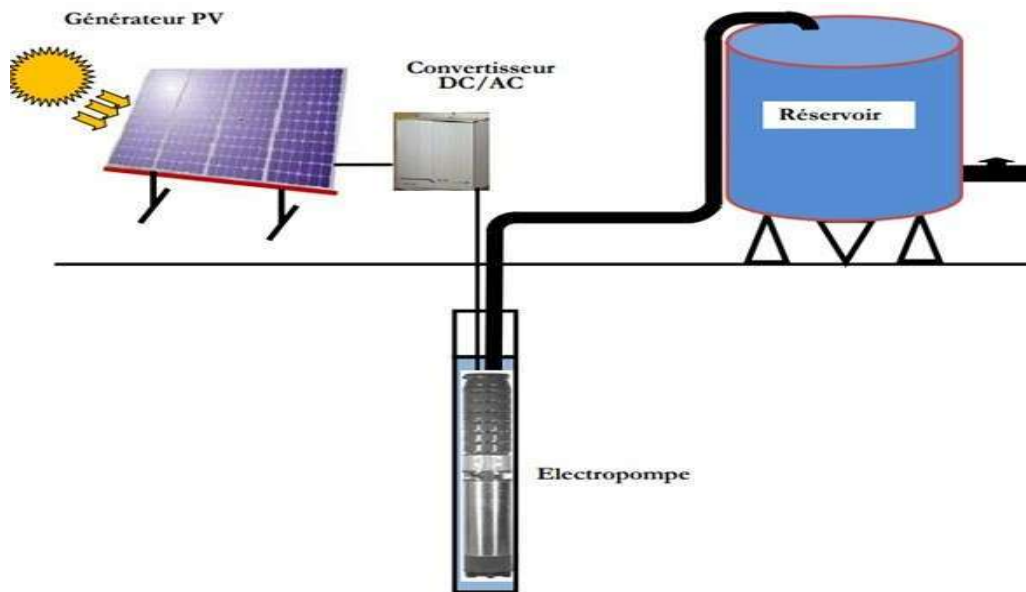


Figure IV.30: Schéma synoptique simplifié de pompage PV

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

IV.7.2.5.1. Convertisseur DC/AC (onduleur)

Bien que les panneaux solaires produisent du courant continu, la pompe nécessite du courant alternatif pour fonctionner. Par conséquent, un onduleur, ou un dispositif de conversion DC/AC, est nécessaire pour effectuer cette tâche. Le choix de l'onduleur dépend de la puissance et de la tension de la pompe alimentée.

Les onduleurs pour pompes ont généralement une fréquence variable, ce qui permet de varier la vitesse de rotation de la pompe. Le rapport de la tension alternative (U) et de la fréquence - U/f - est constant dans ce cas. La fréquence du courant alternatif est directement proportionnelle à l'intensité de l'ensoleillement. La tension nominale du courant alternatif peut être réglée à 220 V ou 380 V.

Tableau IV.34 : Caractéristiques électriques de l'onduleur

| Onduleur | Puissance MAX (W) | Tension Entrée (V) | Tension Sortie (V) | Fréquence (Hz) |
|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|----------------|
| ROSEN HF-4850S80-H | 5000 | 220 | 120-500 | 50-60 |

IV.7.2.5.2. Taille du générateur PV :

Deux méthodes sont utilisées pour le dimensionnement des systèmes de pompage photovoltaïque :

1. Une méthode analytique.
2. Une méthode graphique.

Ces deux méthodes permettent de dimensionner une installation de pompage photovoltaïque pour satisfaire les besoins en eau d'une consommation bien déterminée

Nous avons choisi un modèle de module photovoltaïque algérien, de chez Condor Electronique du catalogue de 2018. Il s'agit du CEM300P-72. La série CEM de Condor fournit une puissance photovoltaïque rentable destinée à un usage général par exploitation directe de charges courant continu, ou de courant alternatif sur les systèmes munis d'onduleur. Le module est composé de 72 cellules solaires de silicium poly cristallin, connectées en série pour produire une puissance nominale de 300 W. Les caractéristiques électriques de ce module photovoltaïque sont données dans le tableau IV.22, suivant :

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

Tableau IV.35: Caractéristiques électriques et mécaniques du module photovoltaïque CEM300P-72 (Condor, 2023)

| Type de module | Unité | CEM300P-72 |
|---|--------------------|------------|
| Puissance maximale (Pmax) | W | 300 |
| Tension à P max (Vmp) | V | 36,80 |
| Courant à P max (I mp) | A | 8,15 |
| Courant de court-circuit (Icc) | A | 8,88 |
| Tension de court-ouvert (Vco) | V | 45,60 |
| Coefficient de température de Icc | %/°C | 0,06 |
| Coefficient de température de Vco | %/°C | -0,33 |
| Coefficient de température de puissance | %/°C | -0,39 |
| NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) | °C | 45+/-2 |
| Caractéristiques physiques de la fabrication | | |
| Température d'utilisation | -40 a +95 | |
| Nombre de cellule par module | 72 cellules (6×12) | |
| Poids | 23,5 Kg | |

IV.7.2.5.3. Calcul de la puissance crête du système photovoltaïque

Dans notre application, le panneau solaire choisi est de type Poly cristallin 300 Wc est cela suivant ces caractéristiques électriques et physiques.

Ce panneau solaire bénéficie d'une fabrication à la pointe de la technologie, qui lui confère un rendement élevé et une excellente durée de vie (Garantie 25 ans). (90% de la puissance nominale annoncée) et une garantie de 3 ans du constructeur, pièces et main d'œuvre.

L'ensoleillement moyen de site d'installation : $E = 4.7 \text{ Kw/ m}^2/\text{j}$

IV.7.2.5.3.1. Calcul de l'énergie électrique nécessaire par jour

D'après la littérature, le rendement du moteur de la pompe immergée ($u_{vwx'yg}$) est de 75% à 85% et le rendement de la pompe est 45 % à 65% (u_{wv}), **Usyst = 48 V.**

Dans notre cas, on prendra la valeur médiane pour chaque rendement, soit respectivement 80% et de 55%.

$$u_z = u_{vwx'yg} \times u_{wv} = 0.80 \times 0.55 \Rightarrow u_z = 0.44 \text{ Soit } 44\%$$

$$E_{elec} = \frac{Ch \times Qp \times HMT}{\eta G}$$

$$E_{elec} = \frac{2,725 \times 30 \times 40}{0,44} = 7431,82 \frac{Wh}{j} = 7,4 \text{ Kwh} \dots$$

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

$$P_{cr} = \frac{E_{elec}}{F_c \times E_{ns}} = \frac{7431,82}{0,6 \times 4,7} = 2636 \text{ Wc}$$

$U_{syst} = 48 \text{ V}$

IV.7.2.5.3.2. Calcul de nombre de panneaux W

$$N_{panneau} = \frac{P_{cr}}{P_p} = \frac{2636}{300} = 10 \text{ panneaux}$$

Afin de combler les besoins en énergie de notre ferme, les calculs estiment que nous aurons besoin de 10 panneaux photovoltaïques de 300 W.

IV.7.2.5.4. Calcul du nombre de panneaux en série - Nombre de modules en série :

Pour trouver la tension convenable à l'alimentation d'une charge donnée par la mise en série de plusieurs modules PV, le nombre de ces modules est calculé par l'expression suivante :

$$N_p \text{ série} = \frac{U_{syst}}{V_{mp}} = \frac{48}{36,8} = 1,3 \text{ panneaux}$$

on prend la valeur $N_p \text{ serie} = 2 \text{ panneaux en série}$

IV.7.2.5.5. Calcul de nombre de panneaux en parallèle

Pour trouver le courant convenable à l'alimentation d'une charge donnée par la mise en parallèle de plusieurs modules PV, le nombre de ces modules est calculées par l'expression.

$$N_p \text{ parallèle} = \frac{N_{panneau}}{N_p \text{ serie}} = \frac{10}{2} = 5 \text{ panneaux}$$

On prend la valeur $N_p \text{ parallèle} = 5 \text{ panneaux en parallèle}$

Donc nous avons 5 strings chacun comporte 2 panneaux.

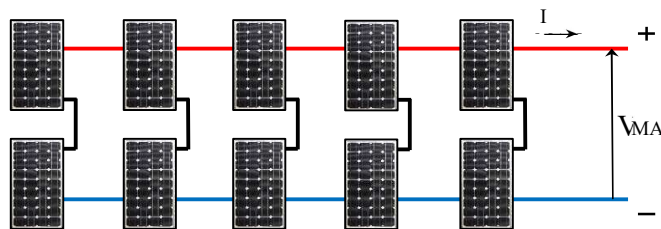


Figure IV.31 : Schéma de la configuration des panneaux PV.

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

En fonction de la tension de notre système, nous allons monter 2 panneaux en série et 5 panneaux en parallèle.

IV.8. Automatisation du réseau d'irrigation :

Pour l'automatisation de notre ferme Agricole HOUALIA voici la liste des appareils et outils qui seront utilisés. Ces composants sont conçus par notre Structure ATAFILAH. Ils se compose de :

1. Des capteurs :

- Capteurs d'humidité du sol
- Capteurs de température
- Capteurs d'humidité de l'air
- Capteurs de luminosité
- Capteurs de mouvement (pour la surveillance des ravageurs)

2. Des actionneurs :

- Vannes électriques (pour le contrôle de l'irrigation)
- Pompes doseuses (pour la fertilisation)
- Relais (pour le contrôle des équipements électriques)

3. Systèmes de contrôle :

- Arduino ou autres microcontrôleurs pour la programmation et le contrôle des périphériques
- Raspberry Pi ou autres mini-ordinateurs pour la gestion centrale et la surveillance à distance

4. Équipements d'irrigation :

- Système d'irrigation goutte-à-goutte ou système d'irrigation par aspersion
- Tuyaux et raccords d'irrigation
- Réservoirs d'eau

5. Équipements d'éclairage :

- Lampes LED horticoles
- Minuterics ou capteurs de luminosité pour le contrôle de l'éclairage

6. Systèmes de fertilisation :

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

- Pompes doseuses
- Réservoirs de stockage des solutions nutritives
- Tuyaux et raccords pour la distribution des solutions nutritives

7. Caméras de surveillance :

- Caméras IP pour la surveillance visuelle des cultures
- Détecteur de mouvement professionnel

8. Outils de gestion et de surveillance à distance :

- Applications mobiles ou logiciels de gestion agricole
- Plateformes IoT (Internet des objets)
- Services cloud pour le stockage et l'analyse des données

N.B : Il est important de noter que la liste ci-dessus est indicative et peut varier en fonction des besoins spécifiques de notre ferme et des choix technologiques que nous utilisons pour l'automatisation.

IV.9. Analyse économique et financière des systèmes de pompage photovoltaïque :

Il est nécessaire de respecter certaines règles technicoéconomiques lors de la sélection d'un système énergétique. Le système énergétique choisi doit d'abord démontrer qu'il est compétitif par rapport aux autres systèmes pour le même service rendu. Il doit donc être basé sur des fondements économiques et techniques. Le calcul du coût d'un système photovoltaïque requiert la connaissance des éléments suivants :

- Sa durée d'utilisation,
- Le capital initial,
- Les coûts annuels de maintenance pour les systèmes photovoltaïques,
- Les dépenses nécessaires pour remplacer les différents sous-systèmes,
- Les bénéfices générés.

Le coût du kWh consommé dépendra des profits engendrés mais également de l'énergie photovoltaïque consommée par l'utilisation. (Alain Innocent LEKA, 2012)

Le tableau IV.36, ci-dessous représenté, va nous donner le coût de l'investissement d'un système d'irrigation goutte à goutte par puisage solaire photovoltaïque, au fil du soleil d'une oliveraie dans le périmètre de HOUALIA dans la Wilaya de Tlemcen.

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

Tableau IV.36 : Devis quantitatif et estimatif d'un système d'irrigation goutte à goutte, par puisage solaire PV, au fil du soleil d'une verger d'agrumes clémentine à Hennaya, Wilaya de Tlemcen.

| Équipements | Quantité | Coût unitaire Équipements (DA) | Coût de La pose (DA) | Montant (DA) | Total |
|------------------------|----------|--------------------------------|----------------------|--------------|-------------------|
| Pompe + contrôleur (u) | 01 | 126 000 | 42 000 | | 168 000 |
| Générateur PV (u) | 10 | 27 000 | 30 000 | | 300 000 |
| Onduleur (u) | 01 | 65 000 | 10 000 | | 75 000 |
| Câblerie (u) | 01 | 25 000 | - | | 25 000 |
| Goutteurs (u) | 2376 | 65 | - | | 152 000 |
| Filtre (u) | 1 | 30 000 | - | | 30 000 |
| ATAFILAH | 1 | 50 000 | | | 50 000 |
| TOTAL | | | | | 750 000 DA |

Les résultats des besoins utiles pour la réalisation de notre système sont estimés à 750 000 DA. C'est donc un coût onéreux.

➤ **L'énergie consommé par la pompe :**

La pompe doit transmettre de l'énergie au liquide pour transporter une certaine quantité d'eau d'un point à un autre. Quelle que soit la technologie, cette quantité d'énergie sera la même et sera donnée par la puissance de la pompe. Les paramètres tels que l'altitude de pompage, l'altitude de refoulement, la longueur et le diamètre des tuyaux sont pris en compte pour calculer cette puissance en utilisant le théorème de Bernoulli et le bilan énergétique du système. Cependant, les praticiens utilisent deux paramètres qui caractérisent tout système de pompage dans un réseau afin de simplifier au maximum tous ces calculs : Débit (Q) et Hauteur Manométrique Totale (HMT). (Clicours, 2022)

La puissance absorbée par l'arbre de pompe est alors donnée par la formule suivante

$$P = \frac{Q \cdot HMT}{367 \cdot \eta}$$

Où :

P : Puissance consommée par la pompe en kw.

Q : Débit en (m³/h.)

HMT : Hauteur manométrique totale (mCE)

η : Rendement donné par le constructeur au point de fonctionnement. (Entre 0.8 et 0.9)

$367 = \frac{3600}{g}$ g étant l'accélération de la pesanteur a la surface de la terre

Chapitre IV : Etudes d'un système d'irrigation goutte à goutte par pompage solaire photovoltaïque dans les zones semi-arides et arides en Algérie.

$$P = \frac{20 \times 40}{367 \times 0,85} = 2,57 \text{ Kwatt}$$

$$Et = 2,57 \times 86400 = 222\ 048 \text{ Kwh}$$

Tableau IV.37 : Estimatif du cout du système photovoltaïque et énergétique.

| Équipements | Quantité | Coût unitaire Équipements (DA) | Coût de La pose (DA) | Montant Total (DA) |
|---|----------|--------------------------------|----------------------|--------------------|
| Générateur PV (u) | 10 | 27 000 | 30 000 | 300 000 |
| Onduleur (u) | 01 | 65 000 | 10 000 | 75 000 |
| Câblerie (u) | 01 | 25 000 | - | 25 000 |
| Investissement initial (It) | | | | 400 000 DA |
| Dépenses des opérations et maintenances par an | | | | 5000 DA |

Nous utiliserons à partir des paramètres en notre disposition la formule du cout actualise d'électricité par la formule suivante

$$LCOE = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} * \left(\frac{It + Mt + Ft}{(1+r)^t} \right)}{\sum_{n=1}^{\infty} * \left(\frac{Et}{(1+r)^t} \right)}$$

LCOE = 2.03 DA

Avec :

It =Dépenses d'investissement durant la période t (en année)

Mt =Dépenses d'opération et de maintenance durant la période t (en année)

Ft = Dépenses des combustibles durant la période t (en année) ≈ 0 DA

Et = Electricité produite durant la période (en année)

n = Durée de vie du système ...20 ans

Conclusion :

Tout au long de ce chapitre IV, nous avons procédé à partir de l'analyse jusqu'à l'interprétation des caractéristiques du sol en passant par l'études des paramètres climatiques, hydrauliques et énergétiques, tout estimant les besoins en eau de notre verger d'agrumes à 4l/s qui sera irrigué selon les besoins en eau de l'agrumes et le niveau de perméabilité du sol donné par ATAFILAH. D'autre part la valeur du bilan énergétique et les calculs du taux de rentabilité sont beaucoup plus rentables avec l'énergie solaire à un taux de 50% avec **LCOE = 2.03 DA** et comparé au prix de 1Kwh de la société nationale Algérienne Sonelgaz qui est de **5,34 DA** (GLOBAL PETROL, 2023). De cela, nous concluons que le pompage solaire photovoltaïque est plus économique par rapport au pompage via le réseau de Sonelgaz d'environ plus de 50% à long terme.

CHAPITRE V :

**LA CARTE ARDUINO ET
LES COMPOSANTS DE
NOTRE SYSTÈME DE
CONTRÔLE ATAFILAH
AINSI QUE SA
PROGRAMMATION.**

Introduction

L'irrigation intelligente est la déclinaison des approches smart systèmes et de la théorie cybernétique (Norbert Wiener, 2014) à l'arrosage des espaces verts.

Pour établir une structure non onéreuse du système à réaliser, les éléments sont choisis en tenant compte des paramètres économiques tels que la taille et la consommation énergétique très réduites.

À travers ce chapitre, nous allons d'abord détailler l'architecture globale du système à réaliser, puis expliquer son fonctionnement en l'occurrence celui des différentes composants et le rôle de chaque élément

V.1. Logiciel

Le logiciel de programmation pour les modules Arduino est une application Java gratuite et multiplateforme qui fonctionne comme compilateur et éditeur de code et peut transférer des programmes via une liaison série (RS232, Bluetooth ou USB, selon le module). Il est également possible de compiler le programme sans utiliser l'interface Arduino depuis la ligne de commande. C++ est le langage de programmation utilisé. (Wixsite, 2023)

Les principales fonctions du logiciel Arduino sont :

- ✓ Modifier (écrire) et compiler des programmes pour la carte Arduino.
- ✓ Connectez la carte Arduino pour y transférer le programme.
- ✓ Communiquer avec la carte Arduino

V.2. Matériel.

Dispositifs permettant l'automatisation de l'irrigation par heures, secteurs ou zones. Ils sont généralement placés à côté des électrovannes au début de chaque unité ou sous-unité d'irrigation. Il existe de nombreux types de programmeurs d'irrigation. Les électrovannes de contrôle et les réservoirs d'engrais les plus élémentaires, ainsi que les plus complexes, peuvent gérer l'ensemble du système de fertilisation pour plusieurs secteurs d'irrigation, démarrer et arrêter les pompes, automatiser le nettoyage des filtres, des engrais et des nutriments selon les conditions extérieures, contrôle du pH, de la conductivité électrique, etc. (Prakor, 2023)

V.2.1. Définition

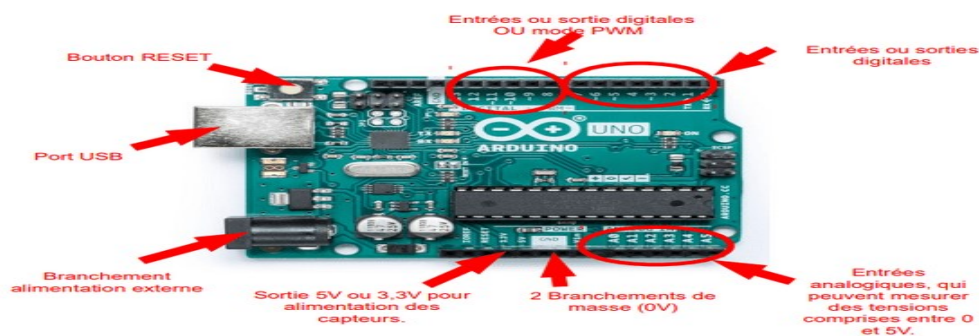
Le module Arduino est un circuit imprimé qui peut être utilisé avec du matériel libre. Un microcontrôleur programmé peut effectuer une variété de tâches en analysant et en produisant des signaux électriques.

En règle générale, des capteurs sont connectés à l'Arduino et le logiciel de l'Arduino traite les données recueillies par ces capteurs et initie diverses actions telles qu'allumer ou éteindre, augmenter ou diminuer.

Chaque module d'Arduino contient un régulateur de tension +5 V et un oscillateur à quartz 16 MHz (ou, dans certains modèles, un résonateur céramique). Le logiciel IDE Arduino est utilisé pour programmer cette carte. (Landrault & HippolyteWeisslinger, 2014).

V.2.2. Carte Arduino UNO

Une carte à microcontrôleur appelée Arduino Uno est construite autour de l'ATmega 328. Elle dispose de 14 broches d'entrée/sortie numériques, dont 6 peuvent être utilisées comme sorties PWM, de 6 broches analogiques, d'un connecteur USB, d'un jack d'alimentation et d'un bouton d'initialisation. Tout ce dont le microcontrôleur a besoin pour fonctionner est inclus dans la carte Arduino Uno. Il suffit de la connecter à un ordinateur avec un câble USB (5V jusqu'à 500mA) ou de l'alimenter à l'aide d'un bloc secteur externe ou de piles pour l'utiliser. La carte choisit automatiquement la source d'alimentation. La carte peut être alimentée par une source d'alimentation externe de 6 à 20 volts. Cependant, la broche (5V) pourrait fournir moins de (5V) si la carte est alimentée à moins de (7V). (Jean-Noël Montagne, 2006)



Les bornes 3,5,6,9,10 et 11 (avec le symbole ~) peuvent servir de sorties analogiques (PWM)

Figure V.1 : La carte Arduino UNO (ARDUINO, 2023)

V.2.3. Ethernet Shield

Le module Ethernet Shield permet à une carte Arduino de se connecter à internet. Il est basé sur le composant Wiznet 5500 et communique via le bus SPI.

On parle alors d'un système agissant comme un serveur de transmission (ASCH, 2017)

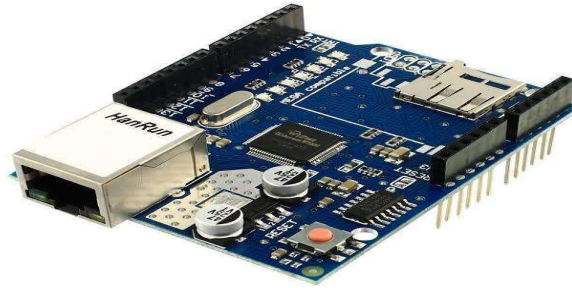


Figure V.2: Le module Ethernet Shield (AMAZON, 2023)

Les principales fonctionnalités sont :

- Le stockage des données sur carte mémoire SD.
- L'envoi des données vers le site web

V.3. Architecture du système

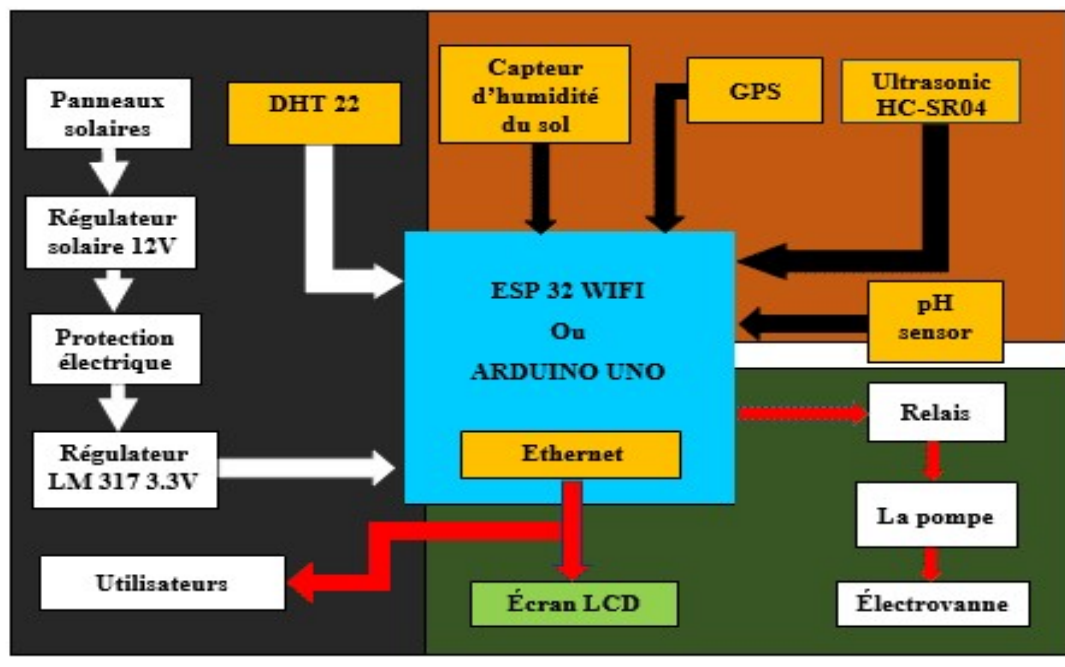


Figure V.3 : Structure de l'architecture du système d'irrigation automatisée, intelligente.

V.4. Fonctionnement de système d'irrigation

Le but du système à concevoir et à mettre en œuvre est d'optimiser la ressource en eau et en énergie tout en améliorant la production agricole. Le système est basé sur la connaissance des

paramètres du terrain agricole considéré, tels que la température, la qualité de l'eau d'irrigation et le taux d'humidité du sol, afin de les comparer aux valeurs fixées au préalable, selon la littérature, des besoins en eau de la culture par rapport aux données climatiques.

Le système gère deux blocs : une zone de collecte d'informations à partir d'un réseau de capteurs composé d'un capteur de température, d'un PH-mètre, d'un capteur d'humidité du sol, d'un capteur de mesure du niveau d'eau du réservoir (ultrasonique) et d'un capteur de pluie. Il suffit de connecter ces capteurs à une carte Arduino. Ces capteurs de mesures se chargent de la récolte des données des paramètres du terrain agricole en temps réel. Ces données sont transmises par la suite via le module WIFI intégré de l'ESP 32 Wroom ou le module Ethernet (transmission sans fil) vers la centrale de contrôle. Cette dernière a pour objectif de traiter et contrôler les données reçues par le module récepteur. Elle est interconnectée à la carte Arduino Uno. Le buzzer d'alarme nous informe dans le cas de la détection d'une augmentation ou d'un abaissement de la température et/ou du taux d'humidité.

Le contrôle se fait par une commande (Relay) qui actionne la pompe et l'électrovanne permet de contrôler le débit réel à fournir ou à utiliser. Nous avons aussi écran LCD pour l'affichage des valeurs paramétriques de notre système.

Ces deux composants sont également connectés à un boîtier d'alimentation électrique qui fournit l'énergie nécessaire aux divers dispositifs électroniques qui composent notre système. Le système en cours de développement, jouera un rôle d'outil d'aide à la décision pour nos utilisateurs.

Les deux principales fonctions de notre système sont l'irrigation automatique basée sur les données recueillies par les capteurs et les besoins en eau de la culture en question, en temps réel. La deuxième est la prise de décision personnelle pour irriguer la culture conformément aux données, soit par interruption des opérations de maintenance ou par défaillance du système.

V.4.1. Irrigation en zone sans internet ni GSM (arrosages aux besoins fixés).

Dans ce système, l'opérateur détermine quand et combien d'eau donner à la culture. Le contrôleur programme au préalable ces informations et l'eau est appliquée selon le programme souhaité. Ceci utilise soit la durée d'irrigation ou le volume spécifique utilisé pour le contrôle.

L'arrêt de l'irrigation peut être basé sur un temps prédéterminé ou sur le volume d'eau qui passe par un compteur de débit.

En général, ce système est simple à mettre en œuvre et peu coûteux. Cependant, ce système ne peut pas répondre automatiquement à l'évolution du climat et de l'environnement.

V.4.2. Irrigation automatisée (Via GSM ou via WIFI).

Dans ce système, l'opérateur prépare une stratégie de contrôle générale en fonction du terrain et de la culture à irriguer. Une fois la stratégie générale établie, le système de contrôle assure et prend les décisions nécessaires concernant le moment d'irrigation et la quantité d'eau à donner à la plante en question.

Ce type de système d'irrigation intelligente détermine la quantité d'eau nécessaire pour la culture dans l'environnement en question. Les données des capteurs sont utilisées pour déterminer ce qui doit être fait pour la culture en question et la quantité d'eau nécessaire.

Les contrôleurs en boucle fermée ont besoin de données environnementales telles que l'humidité du sol, la température, le rayonnement solaire, la vitesse du vent, etc.

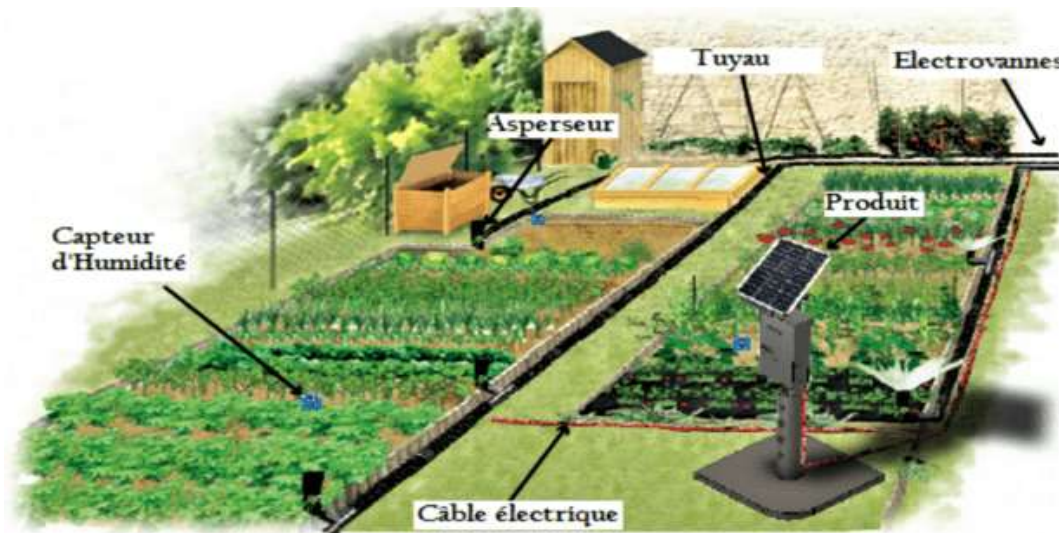


Figure V.4: Projet type Système d'irrigation intelligente (Arezki Abderrahim Chellal, 2021)

La capacité d'un arrosage intelligent à modifier régulièrement la quantité d'eau apportée est ce qui garantit qu'il fonctionne bien. Cela nécessite des sondes d'humidité connectées et des contrôleurs d'électrovanne pilotés à distance.

Le système d'arrosage peut être agi à distance grâce aux réseaux Sigfox et LoRaWAN. Ils calculent la quantité d'eau d'irrigation nécessaire à la culture chaque jour en temps réel et en fonction de la météo. Au-delà des économies d'eau, l'irrigation intelligente évite le lessivage du sol, ce qui augmente sa fertilité. (Norbert Wiener, 2014).

V.5. Résultats et interprétations

Les essais réalisés ont débuté au mois de mai sur le capteur d'humidité du sol. Premièrement son calibrage selon son environnement avant de prendre en compte le type de sol, les résultats des analyses obtenus au laboratoire en ce qui concerne l'analyse granulométrique, l'analyse de sédimentation du sol et l'analyse de perméabilité. Ces différentes analyses nous ont permis de cerner comment évolue notre milieu et surtout le débit d'infiltration qui nous a permis de programmer notre capteur d'humidité du sol, rendant ainsi l'irrigation très raisonnable et optimisée selon les besoins en eau des plantes et surtout selon la réserve d'eau facilement utilisable de la plante. Ceci dans le but d'apporter la dose réelle que nécessite la plante.

Et d'autre part on remarque que la caractéristique réelle du sol de notre ferme est argileuse en profondeur (1 m) seule la surface superficielle est sablo limoneuse compte tenu des pertes lors des cultures et le passage des tracteurs.

A cause de la forte chaleur et un ensoleillement maximal, l'essai a été interrompue vers fin juillet 2023 car le prototype risque de brûler sous les 45 degrés Celsius continues et surtout les cultures (courgettes, maïs, loubia) étaient semées de contre saison sous un ensoleillement élevé.

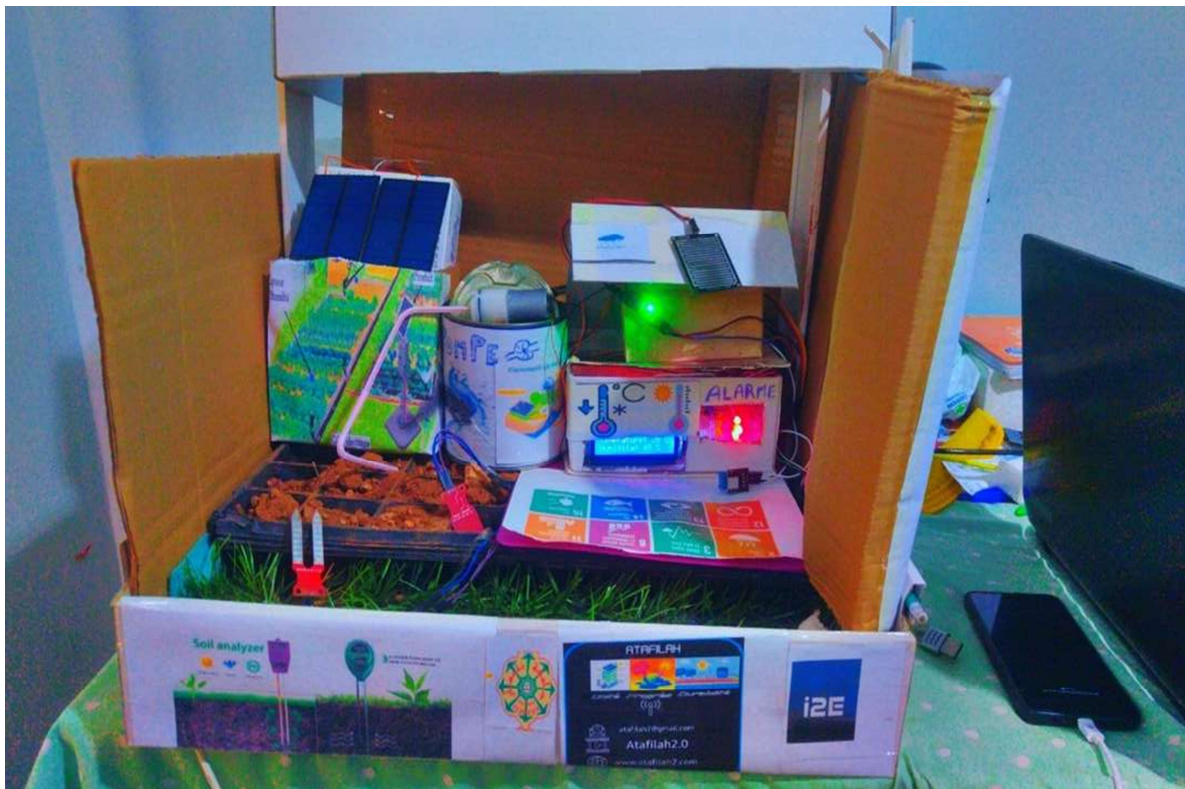


Figure V.5 : Prototype expérimental réalisé



FigureV.6 : Prototype final réalisé



FigureV.7 : Prototype final réalisé

Conclusion

L'utilisation de l'irrigation intelligente, utilisant des cartes Arduino avec un Webservice en tant qu'interface et des capteurs qui permettent la collecte des données (température, humidité, débit, etc.), offre une solution pratique, économique et conviviale pour les utilisateurs, et particulièrement les non-initiés.

CONCLUSION GÉNÉRALE
ET
PERSPECTIVES

CONCLUSION GÉNÉRALE

Tout au long de la préparation de notre projet de fin d'étude, nous avons mis en pratique les connaissances acquises durant nos cinq années d'études universitaires et cela dans le but de réaliser un système d'irrigation automatique commander à distance par un smartphone.

Ce mémoire présente une étude complète et approfondie sur l'utilisation de l'irrigation goutte-à-goutte par pompage photovoltaïque, intégrée à un système automatique intelligent basé sur Arduino Mega et contrôlé par smartphone dans un verger d'agrumes clémentines en zone semi-aride.

Tous les indicateurs d'efficacité sont également pris en compte, tels que l'efficacité hydraulique, agronomique, économique, ainsi que l'impact social du périmètre, ce qui exige une parfaite connaissance des données, agro-pédologiques et climatique.

L'étude Climatologique montre que la commune de Hennaya a une période pluvieuse qui s'étend de la fin octobre au début de mai avec une moyenne de 414 mm/an et une température moyenne mensuelle de 8 °C en hiver et 39,2 °C en été. L'étude hydrologique révèle que la région d'étude est caractérisée par un climat semi-aride et avec des caractéristiques futures sec, ce qui rend l'irrigation indispensable.

L'analyse du sol nous a permis de déterminer la qualité du sol en place, qui est sablo-limoneux, et les valeurs de sa caractéristique physique (teneur en eau (13,19 %)), qui nous ont permis après étude statistique des précipitations et estimation de l'évapotranspiration par le logiciel (Cropwat) de calculer les besoins en eau de la culture. Grâce à des bilans hydriques mensuels, l'étude montre que le mois nécessitant plus d'eau d'irrigation étant Septembre (90,86 mm) comme besoin brut. Le débit d'exploitation disponible pour le pompage est d'environ 15 l/s dans la commune de Hennaya.

Cette étude a été initiée pour apporter une contribution à l'amélioration des conditions de vie, à identifier les opportunités liées à la culture des clémentines., à l'atténuation des activités des agriculteurs de cette région.

L'ensemble des investigations menées dans cette étude contribue à fournir des solutions novatrices et une gestion durable de l'eau et de l'énergie durables pour l'agriculture dans des environnements climatiques difficiles, une augmentation de la productivité agricole, tout en contribuant à la préservation de l'environnement.

En outre, l'évaluation économique du projet de l'automatisation de ce système estimée à presque 750 000 dinars montre bien que l'investissement initial peut sembler substantiel,

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

cependant, les avantages à long terme, tels que l'augmentation de la productivité, la réduction des coûts de main-d'œuvre et l'utilisation plus efficace des ressources, justifient amplement cette démarche, donc rentable à court terme et à long terme, si l'agriculteur arrive à avoir le premier apport de l'investissement, car il aura une énergie verte à zéro centime et dont le coût d'exploitation et d'entretien est quasi nul sans oublier le retour sur investissement en de 10 ans. Cependant, il reste encore pas mal de freins à son développement. Le point « faible » de ce type de production électrique est le coût élevé de l'investissement initial.

Cette approche technologiquement avancée ouvre la voie vers une agriculture plus intelligente et plus résiliente, capable de faire face aux défis du changement climatique tout en assurant la sécurité alimentaire et la prospérité économique des régions semi-arides.

En outre, un élément crucial pour le bon fonctionnement du système est le calibrage précis du capteur d'humidité du sol.

Perspectives

Comme suite et perspectives, plusieurs travaux futurs pourraient être poursuivis à partir de nos résultats et de nos recherches. Nous proposons particulièrement :

- La réalisation de logiciels spécialisés pour le dimensionnement des systèmes d'irrigation photovoltaïques. Ceci, permettrait de faire plusieurs simulations possibles en fonction des tracées de réseaux pour ne pas se tromper dans les calculs et surtout de comparer plusieurs solutions afin d'optimiser les systèmes.
- Amélioration de l'efficacité énergétique et l'intégration de la technologie de l'intelligence artificielle (IA).
- Extension à d'autres régions et cultures : Pour évaluer le système intelligent d'irrigation solaire et leurs avantages dans des contextes différents.

À cet effet, il est proposé à ce que l'État et les banques Intègrent l'irrigation solaire dans les politiques agricoles pour les agriculteurs qui utilisent ces techniques modernes d'irrigation par un prêt sans intérêts pour l'investissement initial. Ce prêt sera remboursé à partir de la cinquième année (05), pour les cultures de production annuelle (céréales, pomme de terre, ...), et après dix années (10) pour l'arboriculture sur une période de trente ans.

Ce mémoire a ainsi contribué à mettre en évidence les avantages et la faisabilité d'un projet d'irrigation goutte à goutte par pompage photovoltaïque, piloté par un système intelligent, pour un verger d'agrumes clémentines en zone semi-aride. Il ouvre la voie à de futures recherches et à des projets similaires, visant à étendre cette approche novatrice à d'autres cultures et régions du monde, contribuant ainsi à la sécurité alimentaire et à la préservation de l'environnement.

I Références bibliographiques

- A.S.HUMPHERYS. (1987). <<Automatisation des systèmes d'irrigation de surface à la parcelle à travers le monde>> Consulté le 28 février 2023. New Delhi: CIID.
- AB Conservation. (2022). Récupéré sur <https://www.abconservation.org/fr/blog/2022/11/09/le-rechauffement-climatique/> Consulté le 27 Mars 2023
- ABBASENL. (2011). <<Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale Photovoltaïque>> Consulté le 26 Février 2023. Université de Tizi ouzou.
- ADOBE. (2023). Récupéré sur https://stock.adobe.com/ch_fr/image/underground-or-in-ground-drip-irrigation-system-water-
- Agronomie. (2023, Mars 6). Récupéré sur <https://agronomie.info/fr/importance-de-lirrigation/>
- Ahmed Skhiri. (2015). <<Les bases de l'irrigation : calcul des besoins en eau>>.
- Ahmed Skhiri. (2015). <<LES BASES DE L'IRRIGATION: Calcul des besoins en eau,>> Consulté le 25 Février 2023. Universtaire Européenne. Récupéré sur <https://www.researchgate.net/publication/332233446>
- Ahmed Skhiri. (2019). <<L'IRRIGATION DE SURFACE: Conception, fonctionnement et evaluation de performance>> Consulté le 2 Mars 2023.
- Alain Innocent LEKA. (2012). Récupéré sur https://www.memoireonline.com/10/13/7484/m_Strategie-de-croissance-des-unites-territoriales-du-cameroun-production-decentralisee-d-electr
- AMAZON. (2023). <<Ethernet Module>>.
- AMAZON M, .. (2019). <<Cellfast Arroseur a pulsation >> Consulté le 5 Mars 2023. Récupéré sur <https://www.amazon.fr/ARROSEUR-AGRICOLE-r%C3%A9glable-Atteingnez-Filetage/dp/B07Y5K9ZPW>
- ANATOLE Bosse. (2017). Récupéré sur <https://docplayer.fr/45822672-Conception-et-realisation-d-une-installation-de-pompage-solaire-au-fil-du-soleil-portail> >> Consulté le 4 Mai
- ARDUINO. (2023). Récupéré sur <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>
- Arezki Abderrahim Chellal. (2021). <<Flexible and automated Watering System Using Solar Energy>>.
- ASCH, G. (2017). << Les capteurs en instrumentation industrielle, Dunod>> Consulté le 16 Mars 2023.
- Ashraf, M. (2010). <<Inducing drought tolerance in plants. Recent advances. Biotechnol. Adv. 28, 169-183.>> Consulté le 28 février 2023.

Références bibliographiques

- ATEE. (2023). Récupéré sur <https://atee.fr/energies-renouvelables/club-biogaz/methanisation-et-biogaz>
- Ayars, J. (1999). <<*Subsurface drip irrigation of row crops: a review of 15 years of research at the Water Management Research Laboratory. Agric. Water Manag.* 42, 1-27.>> Consulté le 04 Mars 2023.
- AZOUÏ. (2020). <<*Notes de cours, , Chapitre 2, Systèmes photovoltaïques, pp. 2.1-2.7,*>> Consulté le 25 Avril 2023. Récupéré sur http://staff.univbatna2.dz/sites/default/files/azzoui_boubaker/files/chapitre2_système_photovoltaïque-partie1.pdf
- B. Flèche, D. D. (2023). <<*Production d'énergie électrique : énergie solaire photovoltaïque,*>> Consulté le 23 Mars 2023. Récupéré sur https://www.docdeveloppementdurable.org/file/Energie/Solairephotovolta%C3%AFque/Energie_solaire_photovoltaïque.pdf
- BAKRI M. (2005). <<Le pompage solaire photovoltaïque :Manuel de cours>>.
- BAKRI M. (2005). <<Le pompage solaire photovoltaïque manuel de cours>>.
- Bars, P. Z.-M. (1997). <<*L'agriculture de précision*>> Consulté le 25 Mars 2023. Ingénieries EAT no 12, p. 67 à 79. Récupéré sur ↑ Revenir plus haut en : a b c d e f g h i et j Philippe Zwaenepoel & Jean-Michel Le Bars (1977), *L'agriculture de précision* [archive] ; Ingénieries EAT no 12, décembre 1997, p. 67 à 79
- BEN Ahmed B. (2015). <<*Dimensionnement d'un Système de Pompage Photovoltaïque, mémoire de master professionnel : instrumentations*>>.
- BENSACI W. (2012). <<*Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par commande MPPT*>>.
- Bensafi, H. (2021). <*Etude d'un système hydraulique intelligent pour l'irrigation d'un périmètre de multiculture*> Consulté le 12 Avril 2023.
- BIO enligne. (2023). <https://www.bio-enligne.com/fertilisation/173-elements-nutritifs.html>. Récupéré sur <https://www.bio-enligne.com/fertilisation/173-elements-nutritifs.html> >> Consulté le 22 Avril 2023
- Blog. (2023). <<*tout-savoir-sur-la-culture-hydroponique*>> Consulté le 13 Mars 2023. Récupéré sur [cour-et-jardin.fr/](https://www.cour-et-jardin.fr/): <https://www.cour-et-jardin.fr/blog/post/7-tout-savoir-sur-la-culture-hydroponique>
- boudjellal_samia. (2023). http://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/boudjellal_samia/files/chapitreiii.pdf. Récupéré sur http://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/boudjellal_samia/files/chapitreiii.pdf > Consulté le 18 Avril 2023
- BOYERI, C. S. (2013). <<IRRIGATION GOUTTE à GOUTTE en arboriculture et culture maraichères>> Consulté le 12 Mars 2023. *Article d'ARDEPI*.
- C. Fröhlich. (1978). <<*World radiometric reference. World Meteorological Organization*>> Consulté le 15 Avril 2023.

Références bibliographiques

- C.BROWER. (1990). <<GESTION DES EAUX EN IRRIGATION , manuel de formation Méthode d'irrigation. FAO n°5>> Consulté le 28 Février 2023.
- Cai, X. &. (2003 ,). <<World water productivity: current situation and future options. In: Kijne, J.W., Barker, R., Molden, D., Water Productivity in Agriculture: Limits and Opportunities for Improvement. International Water Management Institute >> Consulté le 5 Mars 2023.
- Calzadilla, A. R. (2010). <<The economic impact of more sustainable water use in agriculture: A computable general equilibrium analysis. J. Hydrol. 384, 292-305.>> Consulté le 22 Mars 2023.
- CARI FAO, W. F. (2015). Consulté le Mars 22, 2023, sur <https://www.wfp.org/publications/consolidated-approach-reporting-indicators-food-security-cari-guidelines>
- CDER.DZ. (2015). <<Atlas des Ressources Energetiques Renouvelables de l'Algerie Renewable Energy Ressource Atlas>> Consulté le 29 Avril 2023. Récupéré sur <https://www.cder.dz/spip.php?article4444>
- Chalmers, D. (1989). <<A physiological examination of regulated deficit irrigation. New Zealand J. Agric. Sci. 23, 44-48.>> Consulté le 24 Avril 2023.
- Chalmers, D. M. (1981). <,(Control of peach tree growth and productivity by regulated water supply, tree density and summer pruning. J. Am. Soc. Hortic.> Consulté le 28 Avril 2023.
- Changsa Dawning. (2022). <<The composition of water and fertilizer integration system>>. Récupéré sur <https://www.irricdfs.com/the-composition-of-water-and-fertilizer-integration-system>
- Charles Chauviagnet. (1981). <<L'énergie solaire dans le bâtiment, P22, 32>> Consulté le 19 Avril 2023. Editions Eyrolles.
- Cherifi Younes. (2015). <<Etude et réalisation d'un suiveur de soleil à base d'un microcontrôleur,>> Consulté le 29 Mars 2023. UMMTO. Récupéré sur www.ummtto.com
- Claude Falgon. (1988). *Politiques de Prix and d'Intervention sur les Marches Agricoles en Afrique.*. Food & Agriculture Org .FAO.
- Clicours. (2022). Récupéré sur <https://www.clicours.com/le-pompage-et-les-pompes-motorisees/>
- CLIMAMED EU. (2023). <<Réduction d'échelle et modélisation climatique avec une ...>> Consulté le 22 Mai 2023. Récupéré sur <https://www.climamed.eu/wp-content/uploads/files/Reduction-D%E2%80%99%C3%89chelle-et-Modelisation-Climatique-avec-une-Application-a-la-gestion-des-forets-en-Agerie.pdf>
- Climate.ec.europa. (2023). Récupéré sur https://climate.ec.europa.eu/climate-change/consequences-climate-change_fr
- Condor. (2023). Récupéré sur <https://www.condor.dz>

Références bibliographiques

- Couture I. (2006). <<(a) Analyse d'eau pour fin d'irrigation MAPAQ Montérégie-Est MAPAQ M>> Consulté le 12 Mars 2023. Montérégie-Est: AGRI-VISION 2003-2004. 8p.
- Couture I. (2006). <<(b) Principaux critères pour évaluer la qualité de l'eau en micro-irrigation Colloque sur l'irrigation d'eau, Source de qualité et de rendement>>. Hôtel Mortagne, Boucherville.
- De Fraiture, C. a. (2010). <<Satisfying future water demands for agriculture.>> Consulté le 9 Mars 2023.
- DIIL. (2020). *Diagnostic d'une installation d'irrigation localisée, édition, Compagnie marocaine de.*
- DRIDI Yacine, B. (2015). <<Potentiel de la biomasse en Algérie.>>.
- DUPONT Bernard. (1979). <<Revu sur les debits distribues>>.
- Dwight H. Perkins, S. R. (2008). <<Économie du développement, De Boeck Supérieur,..>>Consulté le 22 Mars 2023.
- Ebel, R. P. (1995). <<Deficit irrigation to control vegetative growth in apple and monitoring fruit growth to schedule irrigation. HortScience, 3, 12291232.>>.
- Eciedu. (2020). Récupéré sur <https://www.eciedu.ma/pompage-solaire/> >> Consulté le 2 Mai 2023
- EcoInfos. (2023). Récupéré sur <https://www.Le fonctionneme nt de l'énergie éolienne.com>(consulté le 10/04/2023)
- Elmercurio. (2015). <<Comment effectuer un entretien correct du materiel d'irrigation>>. édition,.
- énergie, G. b. (2022). Récupéré sur <http://www.Géothermie basse énergie.com>
- ERO. (2020). Récupéré sur http://www.ero-energies.com/Files/isf_240_245_250_fr.pdf>> Consulté le 2 Mai 2023
- FAO. (2012). Récupéré sur www.fao.com
- FAO. (2023). *FAO.fr*. Consulté le Février 15, 2023, sur <<<https://www.fao.org/3/s8684f/s8684f.pdf>>> Consulté le 5 Mars 2023
- Fertival Maroc. (2023). <https://www.fertivalmaroc.net/>. Récupéré sur <https://www.fertivalmaroc.net/> >> Consulté le 25 Avril 2023
- Fsnv Univbba. (2018). <<IRRIGATION ET DRAINAGE>> Consulté le 26 Mai 2023. Récupéré sur https://fsnv.univ-bba.dz/wp-content/uploads/2018/10/Irrigation_et_drainage
- FSPV. (2023). Récupéré sur <https://Fonctionnement d'un panneau solaire photovoltaïque.com> (consulté le 10/04/2023)
- Girona, J. G. (2005). <<Peach tree response to single and combined deficit irrigation regimes in deep soils. Agric. Water Manage. 72, 97-108.>>.

Références bibliographiques

- GLOBAL PETROL. (2023). Récupéré sur <https://fr.globalpetrolprices.com/Algeria/>
- González-Altozano, P. a. (1999). <<*Regulated deficit irrigation in 'Clementina de Nules' citrus trees. I. Yield and fruit quality effects. J. Hort. Sci. Biotech. 74, 706-713.*>> Consulté le 27 Mars 2023.
- Google Earth. (2023).
- Graine de Paix. (2016). <<Objectifs du developpement durable(2016-2030)>>.
- HELLOWATT. (2023). <<Batterie panneau solaire : fonctionnement, prix et conseils>> Consulté le 12 Mars 2023. Récupéré sur <https://www.hellowatt.fr/panneaux-solaires-photovoltaiques/batterie>
- HELPFUL. (2021). <<Les systèmes d'irrigation HELPFUL(micro irrigations) page 40, 41, 42>> Consulté le 15 Mars 2023.
- Horizons, L. (2019). *cest-quoi-agriculture-de-precision*. Récupéré sur leshorizons.net: <https://leshorizons.net/2019/01/14/cest-quoi-agriculture-de-precision/>. >> Consulté le 16 Mars 2023
- HORNING H M. (1973). <<*Rôle de l'aménagement rationnel de l'eau d'irrigation au niveau des exploitations. Séminaire régional Fao/pnud damas. 7-13 décembre 1971. 10-21p.*>> Consulté le 19 Mars 2023. (PLAUCHU. 2004. Economies de l'environnement.).
- Hydroélectricité. (2023). Récupéré sur <http://Hydroélectricité : définition, fonctionnement, chiffres clés, acteur.com> (consulté le 10/04/2023)
- HYDROPONIE. (2023). <<HYDROPONIE:Culture durable. Récupéré sur <https://culture-durable.fr/hydroponie>
- IDEA. (2022). <<COMMENT L'EAU EST-ELLE EPUREE DANS UNE STATION D'EPURATION>>. Récupéré sur <https://www.aquawal.be/fr/comment-l-eau-est-elle-epuree-dans-une-step>
- Ingénierie Bleue. (2023). <<*Blue Ingénierie Forage d'eau, Adduction d'eau, Energie et construction*>>. Récupéré sur <https://m.facebook.com/story.php?story-fbid=2153477824717769>
- Iniesta, F. T. (2009). <<*The effects of regulated and continuous deficit irrigation on the water use, growth and yield of olive trees. Eur. J. Agron. 30, 258-265.*>> Consulté le 26 Mars 2023.
- INRAE. (2023). Récupéré sur <https://www.inrae.fr/actualites/sols-reservoirs-deau-temoraires-essentiels-vegetaux>
- Ismail Hamit. (2018). <<Etude technico économique>>.
- Jean-Noël Montagne. (2006). « *livret Arduino en français* » Consulté le 14 Février 2023. centre de ressource Art sensitif.
- K. Gairaa. (2010). <<Renewable Energy Bulletin,>> Consulté le 17 Avril 2023. CDER.DZ.

Références bibliographiques

- KHALDI, A. (2005). <<Impacts de la secheresse sur le regime des ecoulements dans les massifs calcaires de l'ouest Algerien*Mont de Tlemcen-Saida>> Consulté le 25 Mai 2023.
- L'Économie de la Réunion, INSEE, Service départemental de la Réunion.*, (1987). INSEE.
- Landrault, S., & Hippolyte Weisslinger. (2014). <<Arduino : Premiers pas en informatique embarquée>> Consulté le 17 Février 2023.
- Lauger A. et Roger A. (1981). <<Les photopiles solaires techniques et documentation,>>. Edition Français.
- Lazizi ALdjia. (2019). « Modélisation, contrôle et gestion énergétique d'une installation de pompe solaire>> Consulté le 29 Mars 2023. université M'hamed Bougara-Boumerdes: université M'hamed Bougara-Boumerdes.
- Léopold. R et Pierre, R. (1995). <<La filtration dans le système goutte a goutte>> Consulté le 11 Mars 2023. (Antony) : cémagref, 140 pages.
- Lesolaire. (2023). Récupéré sur <https://lesolairepourtous.fr/branchementen serie> consulte le 10/04/2023
- Louis Emberger. (1932). <<L indice d'EMBERGER ,Climatogramme d'EMBERGER>>.
- maison des agrumes. (2012). <https://maisondesagrumes.com/2012/07/18/evaluation-des-besoins-en-eau-des-agrumes/>. Récupéré sur <https://maisondesagrumes.com/2012/07/18/evaluation-des-besoins-en-eau-des-agrumes/> >> Consulté le 12 Avril 2023
- MAPAQ GOUV. (2023). Récupéré sur <https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Regions/monteregie/articles/production/Pages/Parlo nspotassium.aspx> >> Consulté le 27 Avril 2023
- MEBTOUL, A. (2019). <<Professeur des universités, expert international, docteur d'État 1974- Directeur d'études ministère Industrie-Énergie 1974/1979-1990/1995- 2000/2006-2013/2015 -Président de la commission transition énergétique des 5+5>> Consulté le 17 Mars 2023. Allemagne.
- MEFLAHA. (2012). <<Modélisation et commande d'une chaine de pompage>> Consulté le 27 Février 2023. Université Abou Bekre Belkaide Tlemcen.
- MEM, M. o. (2017). Récupéré sur <http://www.energy.gov.dz/francais/uploads/2016/Energie/energie-renouvelable.pdf> >> Consulté le 28 Avril 2023
- MemoireONline. (2023). Récupéré sur https://www.memoireonline.com/05/09/2066/m_Les-pompe-solaires--Dimensionnement-dune-station-de-pompage-en-zone-maracher0.html
- MERSC, M. d. (2019). <<Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales-cahier 7-Méthodes de mesure du débit>> Consulté le 8 Mars 2023. Québec: page 321.

Références bibliographiques

- Messaitfa. (2007). Consulté le Février 17, 2023, sur <https://agronomie.info/fr/irrigation-localise/>
- Michel Elkan. (2017). <<L'irrigation a la raie>> Consulté le 02 Mars 2023. Récupéré sur <http://toutcequiconcernelagriculture.blogspot.com/2017/11/1-la-raie>
- Mohamed Taabni et Moulay-Driss El Jihad. (2012, Octobre-Décembre). « *Eau et changement climatique au Maghreb : quelles stratégies d'adaptation ?* », *Les Cahiers d'Outre-Mer [En ligne]*, 260 | mis en ligne le 01 octobre 2015, consulté le 20 mars 2023. Consulté le Mars 26, 2023, sur <http://journals.openedition.org/com/6718>
- Molden, D. M.-R. (2003). <<*A Water-productivity Framework for Understanding and Action*. In: Kijen, J. W., Barker., R., Molden, D. (Eds.), *Water productivity in agriculture: limits and opportunities for improvemen, 1->> Consulté le 21 Mars 2023.*
- Monney, P. (2011). <<*Fiche technique: Pratique de l'irrigation des vergers. Revue suisse Vitic.*>> Consulté le 26 Février 2023.
- MOREAU DEFARGES, P. (2017). <<*La géopolitique pour les Nuls en 50 Notions clés*>> Consulté le 17 Mars 2023. 7 septembre 2017: edi8.
- Moriana, A. O. (2003). <<*Yield responses of a mature olive orchard to water deficits. J. Am. Soc. Hortic. Sci. 128, 425-431.*>>.
- NASA GOV. (2021). Récupéré sur <https://power.larc.nasa.gov/> >> Consulté le 25 Mai 2023
- Norbert Wiener. (2014). « *La cybernétique : Information et régulation dans le vivant et la machine* » Consulté le 12 Mars 2023. Seuil.
- Normandie. (2017). <<Evolution de la consommation d'eau>>. Récupéré sur <https://blogs.ac-normandie.fr/EPI-5e/index.php/post/2017/03/03/1-%C3%A9volution-de-la-consommation-d-eau2>
- OLLIER. CH, P. M. (1983). <<*Irrigation ; Les réseaux d'irrigation théorie ; technique et économique des arrosages*>> Consulté le 27 Février 2023. Paris: Eyrolles 6èmeédition.
- OOREKA, A. (2020). Récupéré sur <<arrosage.ooreka.fr>> Consulté le 2 mars 2023: <https://arrosage.ooreka.fr/comprendre/systeme-irrigation>
- Openedition. (2023). Récupéré sur <https://journals.openedition.org/com/6718> > Consulté le 15 Mars 2023
- P. Patil, B. (2013). <<*Intelligent Irrigation Control System by Employing Wireless Sensor Networks ,In International Journal of Computer Applications,*>> Consulté le 19 Mars 2023.
- Pantes-et-eau. (2023). <<*etats-et-transferts-hydriques-dans-et-a-travers-la-plante/22-la-transpiration-foliaire/32-introduction-generalites*>> Consulté le 1 Mars 2023. Récupéré sur <https://www.plantes-et-eau.fr/documentation/etats-et-transferts-hydriques-dans-et-a-travers-la-plante/22-la-transpiration-foliaire/32-introduction-generalites>

Références bibliographiques

- Poirée M. et Ollier Ch. (1986). <<Irrigation. Les réseaux d'irrigation. Théorie, technique et économie des arrosages 408 pages>> Consulté le 23 Mars 2023. Paris: Edition Eyrolles.
- Prakor. (2023). *prakor.com/fr*. Consulté le Mars 21, 2023, sur <<<https://prakor.com/fr/composants-dun-systeme-dirrigation-localise-partie-ii/>>> Consulté le 16 Mars 2023
- Prixelec. (2022). Récupéré sur <https://prix-elec.com/energie/solaire/panneaux-nouvelle-generation> >> Consulté le 25 Mars 2023
- PSEAU. (2005). Récupéré sur https://www.pseau.org/outils/ouvrages/cder_le_pompage_solaire_photovoltaique_man >> Consulté le 3 Mai 2023
- Redaction BANGKOK. (2023). <<Le prix du riz devraient continuer à augmenter >> Consulté le 4 mars 2023. Récupéré sur <https://www.thailande-fr.com/economie/125072-les-prix-du-riz-devraient-continuer-a-augmenter>
- REMINI, B. (2005). <<LA PROBLEMATIQUE DE L'EAU EN ALGERIE, office des publications universitaires 09-2005. Page 77 et 78, 142, 89>> Consulté le 8 Mars 2023. Alger: 2.02.4807.
- RIEUL LEOPOLD, R. P. (2003). <<La filtration dans le système goutte à goutte>> Consulté le 9 Mars 2023. 3^{ème} édition: Antony : Crémage " Léopold R. et Pierre R. page 140.
- RNED-HA. (1992). <<Problématique de l'irrigation sur l'exploitation>> Consulté le 03 Mars 2023.
- Romero, P. B. (2004). <<(Effects of regulated deficit irrigation under subsurface drip irrigation conditions on water relations of mature almond trees. *Plant Soil*, 260, 155-168.>> Consulté le 24 Mars 2023.
- S. BELAIDI LALOUNI. (2015). <<Cours Energie Solaire Photovoltaïque, >> Consulté le 30 Mars 2023.
- S. FABRÉGAT, 2. (2021). Récupéré sur , <https://www.actu-environnement.com/ae/news/technologie-panneaux-solaires-photovoltaiques-bifacial-37358.php4>
- Salvador UNMUNDO. (2023). <<Manuel de formation pour l'Installation et la Maintenance de petits systèmes>> Consulté le 25 Avril 2023. Récupéré sur https://unmundosalvadorsoler.org/_Files/foro/Manuel%20Pratique%20de%20petits%20syste%CC%80mes%20photovoltai%CC%88ques.pdf
- Solar Store. (2023). Récupéré sur <https://www.solaris-store.com/1749-pompe-immeree-lorentz-psk2-7>
- Sulaiman A. (2020). <<[slideshare.net/SulaimanAlgerian/](https://www.slideshare.net/SulaimanAlgerian/)>> Consulté le 25 Février 2023. Consulté le Février 25, 2023, sur <https://fr.slideshare.net/SulaimanAlgerian/cours-l3->

Références bibliographiques

sol-amp-eau-eau-et-environnement-module-techniques-modernes-d-irrigation-et-de-fertigation

- Sunearthtools. (2023). Récupéré sur www.sunearthtools.com >> Consulté le 19 Avril 2023
- The Global food Security Index, T. E. (2023). Récupéré sur <https://foodsecurityindex.eiu.com/>
- Total Energies. (2022). Récupéré sur <https://www.totalenergies.fr/particuliers/nosservices/autoconsommation-solaire/fonctionnement-panneaux-photovoltaiques/panneaux-solaires-nouvelle-generation> >> Consulté le 25 Mars 2023
- TUTIEMPO. (2021). Récupéré sur <https://fr.tutiempo.net/climat/ws-605310>
- TUTIEMPO. (2023). <<Site internet, donnée climatique Algérie _ GHARDAÏA>> Consulté le 15 Mars 2023.
- TUZET, A. P. (1990). <<Approche theorique du continuum sol plante-atmosphere Traite d'rrigation J.R TIERCELIN>>. Lavoisier. Récupéré sur <https://books.openedition.org/editionscnrs/9887>
- URBINATI. (2020). <<Chariot d'arrosage mobile suspendu Monorail>>.
- Wiki Lowtechlab. (2023). Récupéré sur <https://wiki.lowtechlab.org/w/index.php?title=Water-Biosand-Filter>
- WIKIPEDIA. (2021). <<La commune de Hennaya>>.
- Wixsite. (2023). Récupéré sur <https://www.pecquery.wixsite.com/arduino-passion/ide-arduino>
- Wixstatic. (2022). <<Traitement de l'eau:Filtration/Filtre>>.
- Worldwater. (2017). <<Livre Bleu EAU et CLIMAT page 6 et 7>> Consulté le 19 Mars 2023. worldwatercouncil.org. Récupéré sur www.worldwatercouncil.org
- Yohan Hubert. (2014). <Cultiver ses legumes hors sol>Hydroponie_Wikipedia-Fr.pdf> Consulté le 9 Mars 2023. Récupéré sur doc-developpement-durable.org: https://www.doc-developpement-durable.org/file/Culture/Agriculture/articles-Wikipedia/Hydroponie_Wikipedia-Fr.pdf
- YOUMATTER World. (2023). <https://youmatter.world/fr/definition/energies-renouvelables-definition/>. Récupéré sur <https://youmatter.world/fr/definition/energies-renouvelables-definition/> >> Consulté le 19 Mars 2023

ANNEXES

ANNEXE A : Les différents besoins de la plante selon le débit, la qualité de l'eau et du sol.

Tableau A.A.1 : Des gammes de diamètres extérieurs disponible chez le Groupe CHIALI (Algérie) et quelques pays partenaires à l'international (Afrique)

| Diamètre extérieur nominal d_(mm) | Diamètre extérieur moyen | |
|--------------------------------------|--------------------------|--------|
| | d_(mm) | d_(mm) |
| 16 | 16 | 16.3 |
| 20 | 20 | 20.3 |
| 25 | 25 | 25.3 |
| 32 | 32 | 32.3 |
| 40 | 40 | 40.4 |
| 50 | 50 | 50.4 |
| 63 | 63 | 63.4 |
| 75 | 75 | 75.5 |
| 90 | 90 | 90.6 |
| 110 | 110 | 110.7 |
| 125 | 125 | 125.8 |
| 140 | 140 | 140.9 |
| 160 | 160 | 161.0 |
| 180 | 180 | 181.1 |
| 200 | 200 | 201.2 |
| 225 | 225 | 226.4 |
| 250 | 250 | 251.5 |
| 280 | 280 | 281.7 |
| 315 | 315 | 316.9 |
| 355 | 355 | 357.2 |
| 400 | 400 | 402.4 |
| 450 | 450 | 452.7 |
| 500 | 500 | 503.0 |
| 560 | 560 | 563.4 |
| 630 | 630 | 633.8 |
| 710 | 710 | 716.4 |
| 800 | 800 | 807.2 |
| 900 | 900 | 908.1 |
| 1000 | 1000 | 1009.0 |
| 1200 | 1200 | 1210.8 |
| 1400 | 1400 | 1412.6 |
| 1600 | 1600 | 1614.4 |



ZOOM SUR L'INTERNATIONAL

Depuis 2013, la Société CHIALI SERVICES s'est tournée vers l'international et notamment vers les pays de l'Afrique de l'Ouest en réalisant des projets dans le domaine Hydraulique.

Des pays tels que la Côte d'Ivoire, le Sénégal et le Togo ont bénéficié des réalisations suivantes: des projets de dimensionnement, de conception et de réalisation de stations d'épuration de type naturel, de châteaux d'eau et de réhabilitation des réseaux de conduites...

Il n'y a de réussite que celles des hommes et des femmes dans l'entreprise. Toutes nos équipes restent tournées vers un service de qualité à l'export, du service commercial jusqu'au service après-vente.

Aujourd'hui la société CHIALI SERVICES, est soucieuse dans un cadre d'échanges « Sud-Sud » non seulement de proposer un service de qualité mais également un transfert de compétences indispensable au continent Africain.



ANNEXE A : Les différents besoins de la plante selon le débit, la qualité de l'eau et du sol.

Tableau A2: Directives pour l'interprétation de la qualité d'une eau d'irrigation

| Nature du problème | Unité | Restriction pour l'irrigation | | |
|--|-------|-------------------------------|------------------|-------|
| | | Aucune | Légère à modérée | Forte |
| <i>Salinité (influe sur l'eau disponible pour la plante)</i> | | | | |
| Conductivité électrique EC _w (ou) | dS/m | <0.7 | 0.7 - 3.0 | >3.0 |
| Total des matières solides dissoutes TDS | mg/l | <450 | 450 - 2000 | >2000 |
| <i>Infiltration (influe sur la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol : utiliser à la fois EC_w et SAR)</i> | | | | |
| SAR = 0 - 3 et EC _w = | | >0.7 | 0.7 - 0.2 | <0.2 |
| SAR = 3 - 6 et EC _w = | | >1.2 | 1.2 - 0.3 | <0.3 |
| SAR = 6 - 12 et EC _w = | | >1.9 | 1.9 - 0.5 | <0.5 |
| SAR = 12 - 20 et EC _w = | | >2.9 | 2.9 - 1.3 | <1.3 |
| SAR = 20 - 40 et EC _w = | | >5.0 | 5.0 - 2.9 | <2.9 |
| <i>Toxicité de certains ions (affecte les cultures sensibles)</i> | | | | |
| <i>Sodium (Na)⁴</i> | | | | |
| Irrigation de surface | SAR | <3 | 3 - 9 | >9 |
| Irrigation par aspersion | me/l | <3 | >3 | |
| <i>Chlore (Cl)⁴</i> | | | | |
| Irrigation de surface | me/l | <4 | 4 - 10 | >10 |
| Irrigation par aspersion | me/l | <3 | >3 | |
| Bore (B) ⁵ | mg/l | <0.7 | 0.7 - 3.0 | >3.0 |
| <i>Effets divers (affecte les cultures sensibles)</i> | | | | |
| Azote (NO ₃ -N) ⁶ | mg/l | <5 | 5 - 30 | >30 |
| Bicarbonate (HCO ₃) ⁴ (seulement pour l'aspersion sur frondaison) | me/l | <1.5 | 1.5 - 8.5 | >8.5 |
| pH | | Zone normale 6.5 - 8.4 | | |

Tableau A3: Caractéristiques physiques des sols (selon Israelsen-Hansen, 1962)

| Texture du sol | Perméabilité | Porosité | Masse volumique | Capacité de rétention | Point de flétrissement | Réserve utile |
|-----------------|--------------|----------|-----------------|-----------------------|------------------------|------------------|
| | cm.h-1 | % | Kg.dm-3 | % vol. | % vol. | mm.m3 Profondeur |
| Sablonneux | 5 | 38 | 1.65 | 15 | 7 | 80 |
| Sablo-limoneux | 2.5 | 43 | 1.50 | 21 | 9 | 120 |
| Limoneux | 1.3 | 47 | 1.40 | 31 | 14 | 170 |
| Argilo-limoneux | 0.8 | 49 | 1.35 | 36 | 17 | 190 |
| Limono-argileux | 0.25 | 51 | 1.30 | 40 | 19 | 210 |
| Argileux | 0.05 | 53 | 1.25 | 44 | 21 | 230 |

Tableau A4 : Profondeur d'enracinement

| Cultures | Profondeurs (cm) | Cultures | Profondeurs (cm) | Cultures | Profondeurs (cm) |
|--------------------------------------|------------------|-----------------------|------------------|-------------------------|------------------|
| Agrumes | 100 - 120 | Fraises | 30 - 45 | Pomme de terre | 60 |
| Arachides | 45 | Haricots | 60 | Légumes(général) | 30 - 60 |
| Baies (cannes) | 90 | Luzerne | 90 - 180 | Salade | 30 |
| Betteraves | 60 - 90 | Maïs | 75 | Sorgho | 75 |
| Céréales | 60 - 75 | Melons | 75 - 90 | Soya | 60 |
| Carottes | 45 - 60 | Noix | 90 - 180 | Tabac | 75 |
| Choux | 45 - 60 | Oignons | 45 | Tomates | 30 - 60 |
| Concombres | 45 - 60 | Patates douces | 90 | Vigne | 90 - 180 |
| Coton | 120 | Pois | 75 | | |
| Arbres fruitiers à feuilles caduques | 100 - 200 | Pâturages (graminées) | 45 | Pâturages (avec trèfle) | 60 |

ANNEXE A : Les différents besoins de la plante selon le débit, la qualité de l'eau et du sol.

Tableau A.5 : Paramètre de la qualité de l'eau destinée à l'irrigation.

| <i>Paramètres de l'eau</i> | <i>Symbole</i> | <i>Unité</i> | <i>Teneur habituelle dans l'eau d'irrigation</i> | |
|---|------------------------------------|-----------------------------|--|-------------|
| Salinité | | | | |
| <i>Teneur en sel</i> | | | | |
| <i>Conductivité électrique (ou)</i> | <i>EC_w</i> | <i>dS/m</i> | 0 - 3 | <i>dS/m</i> |
| <i>Total des matières solides dissoutes</i> | <i>TDS</i> | <i>mg/l</i> | 0 - 2000 | <i>mg/l</i> |
| Cations et Anions | | | | |
| <i>Calcium</i> | <i>Ca⁺⁺</i> | <i>me/l</i> | 0 - 20 | <i>me/l</i> |
| <i>Magnésium</i> | <i>Mg⁺⁺</i> | <i>me/l</i> | 0 - 5 | <i>me/l</i> |
| <i>Sodium</i> | <i>Na⁺</i> | <i>me/l</i> | 0 - 40 | <i>me/l</i> |
| <i>Carbonate</i> | <i>CO⁻⁻</i> | <i>me/l</i> | 0 - 0.1 | <i>me/l</i> |
| <i>Bicarbonate</i> | <i>HCO₃⁻</i> | <i>me/l</i> | 0 - 10 | <i>me/l</i> |
| <i>Chlorure</i> | <i>Cl⁻</i> | <i>me/l</i> | 0 - 30 | <i>me/l</i> |
| <i>Sulfate</i> | <i>SO₄⁻⁻</i> | <i>me/l</i> | 0 - 20 | <i>me/l</i> |
| Eléments nutritifs | | | | |
| <i>Azote nitrique</i> | <i>NO₃-N</i> | <i>mg/l</i> | 0 - 10 | <i>mg/l</i> |
| <i>Azote ammoniacal</i> | <i>NH₄-N</i> | <i>mg/l</i> | 0 - 5 | <i>mg/l</i> |
| <i>Phosphate phosphoreux</i> | <i>PO₄-P</i> | <i>mg/l</i> | 0 - 2 | <i>mg/l</i> |
| <i>Potassium</i> | <i>K⁺</i> | <i>mg/l</i> | 0 - 2 | <i>mg/l</i> |
| Divers | | | | |
| <i>Bore</i> | <i>B</i> | <i>mg/l</i> | 0 - 2 | <i>mg/l</i> |
| <i>Acidité</i> | <i>pH</i> | <i>1 - 14</i> | 6,0 - 8,5 | |
| <i>Coefficient d'adsorption du Sodium</i> | <i>SAR</i> | <i>(me/l)^{1,2}</i> | 0 - 15 | |

ANNEXE B : Les différentes procédures pour la réalisation de nos essais au laboratoire.

I. HUMIDITE DU SOL

Mode opératoire

- 1) Peser Le Récipient Muni Du Couvercle (*P0*) A L'aide d'Une Balance ;
- 2) Identifier Le Avec Une Etiquette ;
- 3) Placer L'échantillon à L'état Naturel Dans Le Récipient Et Peser L'ensemble (Echantillon + Récipient), (*Ph*). ;
- 4) Place L'ensemble (Echantillon + Récipient) Dans L'étuve à une Température de 105°C ;
- 5) Après 24h Retirer Le Récipient Avec Le Sol Sec. Et Peser (*Ps*) En Utilisant La Même Balance ;
- 6) Déterminer La Teneur En Eau (*Te*) Exprimé En Pourcentage.

II. ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR TAMISAGE

Mode opératoire

- 1) Commencer par dresser la colonne des tamis ; les ouvertures des tamis doivent être de bas en haut. Les tamis prendre en compte sont en mm (8-6,3-5- 4-3.15- 2- 1,25-1-0,8-0,63-0.5 -0,4-0,32- 0.2- 0.125- 0,10-0.08) ;
- 2) Prendre 1Kg de sol ;
- 3) Verser le sol sur le tamis supérieur ;
- 4) Procéder à l'agitation mécanique à l'aide d'un vibro-tamis électrique pendant 5min ;
- 5) Procéder à la pesée cumulée des refus des tamis en commençant par le tamis supérieur.

III. ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR SEDIMENTOMETRIE

Mode opératoire

- 1) Prendre deux éprouvettes à essais de 1 litre de contenance ;
- 2) Prendre 60 cm³ de défloculant et ajouter 440 cm³ d'eau distillé pour obtenir une solution de 500 cm³ ;
- 3) Diviser la solution obtenue entre les deux éprouvettes à raison de 250 cm³ chacune ;
- 4) Prendre l'une des deux éprouvettes et la compléter avec de l'eau distillée jusqu'à 1 litre. Cette éprouvette sera appelée dorénavant l'éprouvette B (l'autre éprouvette sera nommée l'éprouvette A) ;
- 5) Prendre 40g de sol ;

ANNEXE B : Les différentes procédures pour la réalisation de nos essais au laboratoire.

- 6) Verser 40g dans le récipient de l'agitateur mécanique et verser dessus une certaine quantité de la solution de l'éprouvette A ;
- 7) Procéder à l'agitation mécanique pendant 3 minutes ;
- 8) Verser la suspension dans l'éprouvette A (bien rincer le récipient et les ailettes pour ne pas perdre le matériau) ;
- 9) Compléter l'éprouvette A avec de l'eau distillée jusqu'à 1 litre ;
- 10) Procéder à une homogénéisation de la suspension à l'aide de l'agitateur manuel ;
- 11) Introduire le densimètre dans la suspension et procéder aux lectures (on les appellera R1). Les temps de lecture sont (30s 1min 2min 5min 10min 30min 60min 2h 4h 24h) ;

Remarque :

Pour les 5 premières lectures, le densimètre n'est pas retiré de la suspension.

Après la cinquième lecture ; une fois celle-ci effectuée, et ça sera le cas pour le reste des lectures, le densimètre est retiré de la suspension, nettoyer et ranger soigneusement.

Pour reprendre les lectures et à chaque fois, le densimètre est introduit dans la suspension environ 30s avant la lecture.

- 12) A la fin des lectures le densimètre est retiré de l'éprouvette A, introduit dans l'éprouvette B ;
- 13) Procéder à la lecture de la densité de la solution de l'éprouvette B (on l'appellera RB) ;
- 14) Retirer le densimètre, le nettoyer et le ranger définitivement ;
- 15) A l'aide du thermomètre, procéder à la lecture de la température de la solution de l'éprouvette B.

IV. ANALYSE DE PERMEABILITE

Mode opératoire

- 1) Déterminer la masse de tube d'éprouvette en plastique, les pierres poreuses, le ressort et les deux bouchons en caoutchouc (W1) ;
- 2) Glissez la pierre poreuse inférieure dans le tube d'échantillon, puis fixez le tout ;
- 3) Verser le sol grenu dans le tube d'échantillon en petites couches et compacter par des vibrations et/ou d'autres moyens de compactage ;
- 4) Lorsque la longueur du tube d'échantillon est d'environ deux tiers de la longueur du tube ; glisser la pierre supérieure poreuse dans le tube pour le poser fermement sur l'échantillon ;
- 5) Placez un ressort sur la pierre poreuse supérieure, si nécessaire ;
- 6) Fixez avec le bouchon supérieur ;

ANNEXE B : Les différentes procédures pour la réalisation de nos essais au laboratoire.

- 7) Déterminer la masse de l'assemblage (W_2) ;
- 8) Mesurez la longueur (L) de l'échantillon compacté dans le tube ;
- 9) Faites couler l'eau dans le haut du grand entonnoir fixé au support à travers un tube en plastique à partir de l'entrée d'eau. L'eau circulera à travers l'échantillon jusqu'à la chambre à charge constante. Après un certain temps l'eau s'écoulera dans l'évier à travers la sortie dans la chambre à charge constante ;
- 10) Ajustez l'alimentation en eau de l'entonnoir pour que le niveau d'eau dans l'entonnoir reste constant. Simultanément, laissez l'écoulement se poursuivre pendant environ 10 minutes pour saturer l'échantillon ;
- 11) Après avoir établi un débit constant (c'est-à-dire, une fois que la différence de hauteur h est constante) recueillir l'eau d'écoulement de la chambre à charge constante (Q) dans un cylindre gradué. Enregistrez le temps de collecte (t) avec un chronomètre ;
- 12) Répéter l'étape 11 trois fois. Gardez le temps de collecte (t) identique et déterminez Q . Ensuite, trouvez la valeur moyenne de Q .
- 13) Pour l'essai à charge variable maintenir les mêmes procédures jusqu'à l'étape 9 puis inversement à chaque longueur défini prendre la valeur du temps en fonction de la longueur et du volume.
- 14) Répéter l'étape 13 une fois. Gardez le temps de collecte (t) identique et déterminez les différentes longueurs. Ensuite, trouvez la valeur moyenne de la perméabilité.

ANNEXE C : Les résultats obtenus des différentes analyses réalisées au laboratoire.

Tableau A.B.1 : Analyse granulométrique par tamisage pour échantillon 01(laboratoire du département d’Hydraulique. Université de Tlemcen

| Ouverture des tamis (mm) | Masse des refus partiels Ri(g) | Masse des refus cumules Rn(g) | Pourcentage des refus cumulés (Rn/Ps) × 100(%) | Pourcentage des tamis cumulés (100 – PRC) |
|--------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--|---|
| 8 | 0.3065 | 0.3065 | 34.496 | 65.504 |
| 5 | 0.066 | 0.3725 | 41.925 | 58.075 |
| 2.5 | 0.117 | 0.4895 | 55.09 | 44.91 |
| 2 | 0.025 | 0.5145 | 57.91 | 42.09 |
| 1.25 | 0.0625 | 0.577 | 64.94 | 35.06 |
| 1 | 0.039 | 0.616 | 69.33 | 30.67 |
| 0.8 | ---- | 0.616 | 69.33 | 30.67 |
| 0.63 | 0.0155 | 0.6315 | 71.075 | 28.925 |
| 0.5 | 0.026 | 0.6575 | 74.00 | 26 |
| 0.4 | 0.021 | 0.6785 | 76.365 | 23.635 |
| 0.315 | 0.0295 | 0.708 | 79.685 | 20.315 |
| 0.125 | 0.116 | 0.824 | 92.74 | 7.26 |
| 0.08 | 0.03 | 0.854 | 96.12 | 3.88 |
| Fond | 0.0345 | 0.8885 | 100 | 0 |
| Masse Sol(g) | 1000 | | | |
| Ps=Rn + F | 0.8885g | | | |
| Perte= | 0.1115g | | | |

ANNEXE C : Les résultats obtenus des différentes analyses réalisées au laboratoire.

Tableau A.B.2 : Analyse granulométrique par sédimentoètrie pour échantillon 01(laboratoire du département d’Hydraulique. Université de Tlemcen

| Temps (seconde) | T°C | liquide A | liquide B | A - B | μ (pas s) | ρ eau (N/m³) | ρ sol (N/m³) | K (m) | H r (cm) | D (cm) | Vitesse (m/s) |
|------------------------|------------|------------------|------------------|--------------|---------------------------------|--|--|--------------|-----------------|---------------|----------------------|
| 20 | 22 | 1.019 | 0.995 | 0.024 | 9.548E-4 | 1.00E+4 | 2.65E+4 | 1.02E-3 | 12.60 | 8.01E-5 | 6.40E-02 |
| 30 | 22 | 1.018 | 0.995 | 0.023 | 9.548E-4 | 1.00E+4 | 2.65E+4 | 1.02E-3 | 12.90 | 6.60E-05 | 4.30E-02 |
| 60 | 22 | 1.016 | 0.995 | 0.021 | 9.548E-4 | 1.00E+4 | 2.65E+4 | 1.02E-3 | 13.05 | 4.70E-5 | 2.60E-02 |
| 120 | 22 | 1.014 | 0.995 | 0.019 | 9.548E-4 | 1.00E+4 | 2.65E+4 | 1.02E-3 | 13.14 | 3.32E-5 | 1.60E-02 |
| 300 | 22 | 1.012 | 0.995 | 0.017 | 9.548E-4 | 1.00E+4 | 2.65E+4 | 1.02E-3 | 13.62 | 2.17E-5 | 3.70E-03 |
| 600 | 22.5 | 1.011 | 0.995 | 0.016 | 9.4365E-4 | 1.00E+4 | 2.65E+4 | 1.02E-3 | 13.94 | 1.56E-5 | 2.30E-03 |
| 1800 | 22.5 | 1.010 | 0.995 | 0.015 | 9.4365E-4 | 1.00E+4 | 2.65E+4 | 1.02E-3 | 14.36 | 9.11E-6 | 7.90E-04 |
| 3600 | 22.5 | 1.009 | 0.995 | 0.014 | 9.4365E-4 | 1.00E+4 | 2.65E+4 | 1.02E-3 | 15.12 | 6.61E-6 | 5.00E-04 |
| 7200 | 22.5 | 1.008 | 0.995 | 0.013 | 9.4365E-4 | 1.00E+4 | 2.65E+4 | 1.01E-3 | 15.82 | 4.78E-6 | 3.12E-04 |
| 14400 | 23 | 1.007 | 0.995 | 0.012 | 9.325E-4 | 1.00E+4 | 2.65E+4 | 1.01E-3 | 16.17 | 3.39E-6 | 1.20E-04 |
| 86400 | 23 | 1.005 | 0.995 | 0.01 | 9.325E-4 | 1.00E+4 | 2.65E+4 | 1.01E-3 | 16.23 | 1.38E-6 | 2.05E-05 |

ANNEXE C : Les résultats obtenus des différentes analyses réalisées au laboratoire.

Tableau A.B.3: Analyse de perméabilité pour échantillon 01(laboratoire du département d'Hydraulique. Université de Tlemcen

❖ **À charge Constante**

| | Temps non défini | | Temps défini | |
|-----------------------------|------------------|----------|--------------|----------|
| N° ESSAI | 1 | 2 | 3 | 4 |
| V (cm ³) | 500 | 500 | 370 | 440 |
| Q =V/t (cm ³ /s) | 0.45 | 0.36 | 0.33 | 0.31 |
| Temps (seconde) | 1108 | 1408 | 1108 | 1408 |
| L (cm) | 11.66 | 11.66 | 11.66 | 11.66 |
| h (cm) | 105 | 105 | 105 | 105 |
| A (cm ²) | 64.22 | 64.22 | 64.22 | 64.22 |
| i (cm) | 9.01 | 9.01 | 9.01 | 9.01 |
| k (cm/s) | 7.78E-04 | 6.23E-04 | 5.71E-04 | 5.36E-04 |
| k moy (cm/s) | 7.01E-04 | | 5.54E-04 | |
| W1 (Kg) = | 3.000 | | | |
| W2 (Kg) = | 3.355 Kg | | | |
| Diamètre (cm) = | 5,7 | | | |

❖ **À charge Variable**

| N° ESSAI | 1 | 2 | 3 |
|-------------------|-------------|------------|--------------|
| Temps seconde | 52.65 | 32.15 | 44.24 |
| L cm | 11.66 | 11.66 | 11.66 |
| h cm | 94 -75 = 19 | 75 -66 = 9 | 66 - 54 = 12 |
| A cm ² | 14.01 | 8.25 | 10 |
| K cm/s | 0.04 | 0.063 | 0.059 |
| K moy cm/s | 0.054 | | |
| ln(h1/h2) | 0.098 | 0.056 | 0.087 |