



RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences appliquées
Département Génie civil et Hydraulique

THÈSE

Présenté pour l'obtention du diplôme de doctorat en sciences

Filière : Génie civil

Option : Constructions hydrauliques et aménagements

Présenté par :

Mr. GHERIANI Sofiane

THÈME

Optimisation de répartition de l'eau d'irrigation et du rendement des cultures agricoles (cas de luzerne) en technique d'irrigation par aspersion stationnaire (couverture intégrale) dans les conditions de climat désertique et de sols sableux. Cas de la région de la vallée de Oued Righ, w. de Ouargla.

Soutenue le :

Devant le jury d'examen :

| | | | |
|------------------------|------------|-----------------------------|----------------|
| Mr SAGGAI Sofiane | Professeur | Université de Ouargla | Président |
| Mr MEZA Noureddine | MCA | Université d'Oum El Bouaghi | Rapporteur |
| Mr BOUTOUTAOU Djamel | Professeur | Université de Ouargla | Co- Rapporteur |
| Mme ELFERGOUGUI Meriem | MCA | Université de Ouargla | Examineur |
| Mr KHIARI Abdelkader | Professeur | Université d'Oum El Bouaghi | Examineur |
| Mr KHECHANA Salim | Professeur | Université d'El Oued | Examineur |

Année Universitaire : 2021/ 2022

Dédicaces

Je dédie cette thèse :

- *A ma chère mère*
- *A la mémoire de Mon père qui nous a quittés voilà 23 ans*
- *A mes frères et mes sœurs*
- *A ma petite famille*
- *A mes amies et mes camarades*
- *Sans oublier tous les professeurs que ce soit du primaire, du moyen, du secondaire et de l'enseignement supérieur*

Remerciements

Mes premiers remerciements vont à M. MEZA Nourreddine mon directeur de cette thèse et qui a toujours répondu à mes sollicitations, pour sa disponibilité et son aide précieuse toute la durée de préparation ce travail.

Mes remerciements vont aussi à M. BOUTOUTAOU Djamel, qui accepter de me Co-Encadrement, pour sa disponibilité et son aide précieuse.

Je tiens à remercier professeur KRIKER Abdelouahed, directeur de laboratoire de valorisation et exploitation des ressources naturelles en zones arides, pour son aide en fournissant les moyens d'exécution ce travail.

Je tiens à remercier M. SAGGAI Sofiane qui a accepter présider le jury de ma thèse.

Je remercie également Mme ELFERGOUGUI Meriem, Mr KHIARI Abdelkader et Mr KHECHANA Salim qui ont accepté être mes examinateurs.

Mes remerciements vont également à M. BERREKBIA Mohammed, qui m'a soutenu et a participé à l'élaboration de ce travail

Je n'oublierais pas le soutien et l'aide des collègues et ouvriers de la station expérimentale de Sidi Mahdi, notamment M. MIMOUNI Abdelkader,

Je n'oublierais pas à remercie les personnels des laboratoires du sol, de protection des végétaux, et techno-alimentaire et labo sol de CRSTRA Touggourt.

Je m'excuse sincèrement auprès de ceux que je n'ai pas pu citer dans mes remerciements !

ملخص

تشكل الحاجة إلى تحسين الظروف الاقتصادية والنمو السكاني السريع الى زيادة توفير الأغذية والمنتجات الزراعية، وفي ظروف نقص الأمطار ا يكون الري عاملا ضروريا. لضمان التنمية المثلى للمحاصيل

من بين تقنيات الري المستخدمة على نطاق واسع في العديد من مناطق الجزائر الري بالرش ويتم تقييم جودة عملية الري بالرش من خلال كثافة هطول الأمطار، وحجم قطرة المطر، وتوحيد توزيع الأمطار وجرعة الري الفعالة.

تؤثر الظروف المناخية بشكل كبير على أداء تقنية الري بالرش، من خلال أنها تسبب فاقداً للمياه من سحابة المطر، وعن طريق السحب خارج حدود المحيط المروي بسبب الرياح وعن طريق تبخر. الطبقات السطحية للتربة بعد توقف الري.

أظهرت التجربة العالمية أن الفاقد الكلي للمياه في تقنية الري بالرش في الظروف الجافة وشبه الجافة يمكن أن يصل إلى 2-40% من جرعة الري مما يؤثر على رطوبة التربة والمحصول. كما يجب أن نعرف كمية الماء المراد إضافتها لتصحيح

جرعات الري بالرش. الهدف من هذه الدراسة هو تقييم فاقد المياه في تقنية الري بالرش في الظروف الجافة، حالة تقرت. وتقليل هذه الخسارة عن طريق زيادة المساحة المروية للسماح باستخدامها بأفضل أداء.

الكلمات المفتاحية: الري، الرش، الفقد، التبخر، جرف، المحصول، الأداء، جرعة الري، التربة.

Abstract

The need to improve economic conditions and rapid population growth pose a problem in increasing the availability of food and other agricultural products and when natural rainfall is insufficient to ensure optimal crop development; irrigation is often a necessary factor.

Among the irrigation techniques used, sprinkler irrigation is widely used in several regions of Algeria.

The quality of the sprinkler irrigation process is assessed by the rainfall intensity, the size of the rain droplet, the uniformity of the rainfall distribution and the effective irrigation dose.

Agro-climatological conditions considerably affect the performance of the sprinkler irrigation technique, by the fact that they cause water losses from the rain cloud; by drift the borders of the limits of the irrigated perimeter and by evaporation. Surface layers of the soil after stopping irrigation. Global experience has shown that overall water losses in sprinkler irrigation technique in arid and semi-arid conditions can reach 2-40% of the irrigation dose which affects soil moisture and yield crop, then we must know the amount of water to add to correct the doses of sprinkler irrigation. The objective of this study is to evaluate the water losses in the technique of sprinkler irrigation in arid conditions, case of Touggourt; and minimize this loss by increasing irrigated area, to allow its use with the best performance.

Keywords: irrigation, sprinkling, loss, evaporation, drift, yield, performance, watering dose, soil.

Résumé

La nécessité d'améliorer les conditions économiques et l'accroissement rapide de la population posent un problème d'accroître les disponibilités d'aliments et d'autres produits d'agriculture et quand la pluviométrie naturelle est insuffisante pour assurer un développement optimal des cultures ; l'irrigation est un facteur souvent nécessaire.

Parmi les techniques d'irrigation utilisées, l'irrigation par aspersion est largement répandue dans plusieurs régions de l'Algérie.

La qualité du processus d'irrigation par aspersion est évaluée par l'intensité pluviométrique, la grosseur de la gouttelette de la pluie, l'uniformité de la répartition de la pluie et la dose d'arrosage effective.

Les conditions agro-climatologiques affectent considérablement sur les performances de la technique d'irrigation par aspersion, par le fait qu'ils entraînent des pertes d'eau à partir du nuage de pluie, et entraînement par le vent à les frontières des limites du périmètre irrigué et par évaporation d'eau de couche superficielle du sol après l'arrêt irrigation. L'expérience mondiale a montré que les pertes d'eau globale dans la technique d'irrigation par aspersion dans les conditions arides et semi arides peuvent atteindre 2 à 40 % de la dose d'arrosage qui affecte l'humidité du sol et le rendement de la culture agricole, alors, on doit connaître la quantité d'eau à ajouter pour corriger les doses d'irrigation par aspersion. Cette étude a pour objectif d'évaluer les pertes d'eau dans la technique d'irrigation par aspersion dans les conditions arides, cas de Touggourt ; et faire minimiser ces pertes par grandissement de superficie irriguée, pour permettre son utilisation avec les meilleures performances.

Mots clés : irrigation, aspersion, perte, évaporation, entraînement, rendement, performance, dose d'arrosage, sol.

Sommaire

| | |
|--|----|
| Introduction générale | 1 |
| Chapitre I .CARACTERISATION DE MILIEU NATUREL | 3 |
| I.1 Introduction | 3 |
| I .2.PRESENTATION D'ENSEMBLE | 3 |
| I .3. Analyse des caractéristiques climatiques de la zone d'étude | 4 |
| I.3.1. La pluviométrie | 4 |
| I.3.2. L'humidité de l'air | 5 |
| I.3.3. La vitesse de vent | 6 |
| I.3.4. Analyse des températures mensuelles et journalières | 6 |
| I.3.5. Estimation de l'évapotranspiration | 7 |
| I.3.6..Indice d'aridité | 8 |
| I.4.Aperçu sur l'hydrogéologie | 8 |
| I.4.1 Le continental intercalaire (nappe de l'Albien) | 9 |
| I.4.2.complexe terminal | 9 |
| I.4.3.Nappe phréatique | 10 |
| I.5.Cadre agro-pédologie | 10 |
| I.5.1 Les sols | 10 |
| I.5.2 Aperçu sur les activités agricoles | 10 |
| I.5.3 Les terres irriguées au sud-est de l'Algérie | 11 |
| I.5.4 La production agricoles | 13 |
| I.4.5 Les ressources en eau au sud d'Algérie | 13 |
| Conclusion | 15 |
| Chapitre II. RAPPEL THEORIQUE | 17 |
| II.1 INTRODUCTION | 17 |
| II.2. Aperçu sur des techniques d'irrigation | 17 |
| II .3. Principaux facteurs et choix de la technique d'irrigation | 18 |
| II .4. TYPES DE TECHNIQUE D'ARROSAGE PAR ASPERSION | 21 |
| II .4.1.Rampe d'aspersion classique (type ANABIB) | 21 |
| II .4.2.Pivot d'aspersion classique (type ANABIB) | 21 |
| II .4.3..Pivot d'aspersion traditionnel | 22 |
| II.5. FACTEURS D'UNE IRRIGATION DE QUALITE | 23 |
| II.5.1. L'intensité pluviométrique | 23 |
| II.5.2. efficacité de l'aspersion | 24 |

Sommaire

| | |
|--|----|
| II.5.3.Uniformité d'arrosage | 24 |
| II.6. Besoin en eau d'irrigation | 25 |
| II.7.Pertes par évaporation et entrainement pendant l'irrigation par aspersion | 26 |
| II.7.1. Théorie de pertes par évaporation et entrainement en irrigation par aspersion | 26 |
| II.7.2.Technique d'estimation des pertes par évaporation et entrainement | 28 |
| II.7.3. Etudes antérieures de détermination des pertes par évaporation et entrainement | 29 |
| III.7.3.1.détermination des pertes par évaporation et entrainement | 29 |
| III.7.3.2.Détermination des pertes par évaporation | 32 |
| II.8. Réduction des pertes par évaporation et entrainement | 35 |
| Conclusion | 36 |
| Chapitre III. MATERIELS ET METHODES | 37 |
| III .1.MATERIELS | 37 |
| III.1.1Cadre de l'étude | 37 |
| III.1.1. 1 Situation géographique et climat de la zone d'étude | 37 |
| III.1.1.2.Equipements utilisés | 38 |
| III.1.1.3. Les appareils de mesure des paramètres météorologiques | 39 |
| III.1.1.4.Caractéristique de l'asperseur | 41 |
| III.1.1.5.Caractérisation du sol | 42 |
| III.1.1.5.1.Analyse granulométrique | 42 |
| III.1.1.5.2. Humidités à la capacité au champ et au point de flétrissement et la densité apparente | 43 |
| III.1.1.6 Caractérisation du l'eau d'irrigation | 43 |
| III.2 METHODES | 43 |
| III.2.1.Appréciation de l'intensité pluviométrique | 44 |
| III.2.2.Evaluation des pertes par évaporation et entrainement | 45 |
| III.2.2.1. Détermination le débit des asperseurs | 46 |
| III.2.2.2. Détermination le débit des pluviomètres | 46 |
| III.2.3.Evaluation des pertes par entrainement du vent | 47 |
| III.2. 4.. Evaluation des pertes d'eau de la couche superficielle du sol | 47 |
| III.2.5 prélèvement des paramètres climatiques | 48 |
| III.2.5 Suivi de développement de la culture(Luzerne) | 48 |
| III.3 Etude statistique | 49 |
| III.3.1 Régression linéaires multiples (MLR) | 49 |
| III.3.2 Critères d'évaluation des performances du modèle | 51 |
| III.3.3 La différence entre deux ou plusieurs groupes | 51 |

Sommaire

| | |
|--|-----------|
| Conclusion | 52 |
| Chapitre IV. Résultats et discussion | 53 |
| IV.1 Introduction | 53 |
| IV.2 Résultats de débits des asperseurs, des intensités pluviométriques et des paramètres climatiques | 53 |
| IV.3. Analyse de l'uniformité | 56 |
| IV.4. Estimation des pertes par évaporation et par entrainement des gouttes | 58 |
| IV.4.1. Etude expérimentale | 58 |
| IV.4.2. Résultats des différents essais | 59 |
| A. 1ère Campagne de Mesures au champ (2017/2018) | 59 |
| A.1. Les mesure des pertes globales | 59 |
| A.2. Modélisation de pertes globales (E_{ev+v}) | 64 |
| A.3. Comparaison des valeurs des pertes globales mesurées, modélisées et calculées | 65 |
| A.4. Evaluation de la performance des modèles proposés et existants | 66 |
| A.5. Comparaison statistique des valeurs des pertes globales mesurées, modélisées et calculées bloc A 18X18 m | 68 |
| B. 2ème Campagne de Mesures au champ (2018/2019) | 69 |
| B.1. Les mesure des pertes globales | 69 |
| B.2. Modélisation de pertes globales (E_{ev+v}) | 72 |
| B.3. Comparaison des valeurs des pertes globales mesurées, modélisées et calculées | 73 |
| B.4. Evaluation de la performance des modèles proposés et existants | |
| B.5. Comparaison statistique des valeurs des pertes globales mesurées, modélisées et calculées bloc A 12X18 m | 73 |
| IV.4.3. Variation des pertes d'eau globales E_{ev+v} et des coefficients d'uniformités CU en fonction des vitesses des vents | 75 |
| IV.5 Perte d'eau par entrainement du vent | 78 |
| IV.6 Pertes d'eau de la couche superficielle du sol (une heure après l'irrigation) | 78 |
| IV.7. Suivi de développement de la luzerne | 81 |
| Conclusion | 81 |
| Conclusion générale | 83 |
| Référence | 85 |
| Annexe | 90 |

Liste des figures

| N° | LISTE DES FIGURES | Pages |
|------------------------|---|-----------|
| Figure (I.1) | Carte de la vallée d'Oued Righ | 3 |
| Figure (I.2) | Pluviométries moyennes mensuelles (2003-2017) | 5 |
| Figure (I.3) | Humidités de l'air moyennes mensuelles (2003-2017) | 5 |
| Figure (I.4) | Vitesses du vent moyen mensuel (2003-2017) | 6 |
| Figure (I.5) | Températures moyennes mensuelles et journalières (2010-2015) | 7 |
| Figure (I.6) | Valeurs d'évapotranspiration moyennes mensuelles (2003-2017) | 7 |
| Figure (I.7) | Les nappes aquifères du Sahara Algérien | 9 |
| Figure (I.8) | évolution des terres irriguées aux wilayas Biskra ; El oued et Ouargla entre l'année 2001 et 2018 | 11 |
| Figure (I.9) | répartition des surfaces irriguées en fonction du mode d'irrigation aux wilayas Biskra ; El oued et Ouargla | 12 |
| Figure (I.10) | surface des exploitations et le nombre des exploitants aux wilayas du sud de l'Algérie | 12 |
| Figure (I.11) | Évolution des débits pompés du complexe terminal et du Continental intercalaire | 14 |
| Figure (II.1) | Rampe d'aspersion (type ANABIB) | 21 |
| Figure (II.2) | Pivot d'irrigation (type ANABIB) | 22 |
| Figure (II.3) | Pivot d'irrigation traditionnel | 22 |
| Figure (II.4) | Nomogramme d'évaporation d'un arrosage | 33 |
| Figure (III.1) | Situation géographique de Touggourt.(Google Earth,2018) | 37 |
| Figure (III.2) | Photo de la parcelle d'expérimentation (Google earth) | 38 |
| Figure (III.3) | Photo de la parcelle d'expérimentation | 39 |
| Figure (III.4) | Abri météorologique | 40 |
| Figure (III.5) | Anémomètre | 40 |
| Figure (III.6) | Relation entre le débit de l'asperseur et la pression | 41 |
| Figure (III.7) | Granulométrie du sol de la région d'étude | 42 |
| Figure (III.8) | Schéma expérimental de Bloc A | 44 |
| Figure (III.9) | Schéma expérimental de Bloc B | 45 |
| Figure (III.10) | Schéma d'un capteur d'eau précipité hors la parcelle | 47 |
| Figure (IV.1) | La relation entre le coefficient d'uniformité et la vitesse du vent | 56 |
| Figure (IV.2) | Variation des pertes par évaporation et entrainement en fonction de la température. | 60 |
| Figure (IV.3) | Variation des pertes par évaporation et entrainement en fonction de l'humidité de l'air | 61 |
| Figure (IV.4) | Variation des pertes par évaporation et entrainement en fonction de la vitesse du vent | 61 |
| Figure (IV.5) | comparaison des valeurs des pertes globales mesuées et calculées(A) | 61 |

Liste des figures

| N° | LISTE DES FIGURES | Pages |
|-----------------------|---|-----------|
| Figure (IV.6) | Comparaison entre les éléments météorologiques et les pertes totales (bloc B) | 62 |
| Figure (IV.7) | comparaison des valeurs des pertes globales mesurées et calculées (bloc A) | 64 |
| Figure (IV.8) | comparaison des valeurs des pertes globales mesurées et calculées (bloc B) | 64 |
| Figure (IV.9) | Comparaison des valeurs des pertes globales mesurées et ; modélisés ; calculées par les formules (bloc A) | 66 |
| Figure (IV.10) | Comparaison des valeurs des pertes globales mesurées et modélisés; calculées par les formules (bloc B) | 66 |
| Figure (IV.11) | Variation des pertes par évaporation et entraînement en fonction de la température | 70 |
| Figure (IV.12) | Variation des pertes par évaporation et entraînement en fonction de l'humidité de l'air | 70 |
| Figure (IV.13) | Variation des pertes par évaporation et entraînement en fonction de la vitesse du vent. | 71 |
| Figure (IV.14) | La comparaison entre les valeurs des pertes globales $E_{ev,v}$ mesurées, modélisés et calculées (bloc A ,12X18m) | 72 |
| Figure (IV.15) | Comparaison des valeurs des pertes globales mesurées et calculées (bloc A) | 73 |
| Figure (IV.16) | Variation d' $E_{ev,v}$ et CU en fonction des vitesses des vents (bloc A ,18X18) | 74 |
| Figure (IV.17) | Variation d' $E_{ev,v}$ et CU en fonction des vitesses des vents (bloc A ,1218) | 75 |
| Figure (IV.18) | Variation d' $E_{ev,v}$ et CU en fonction des vitesses des vents (bloc B ,18X18) | 75 |
| Figure (IV.19) | Variation d' $E_{ev,v}$ et CU en fonction des vitesses des vents (bloc B ,12X18) | 76 |
| Figure (IV.20) | Relation entre les pertes d'eau par entraînement du vent et la vitesse du vent | 77 |
| Figure (IV.21) | Relation entre les pertes d'eau du sol et la la température de l'air | 78 |
| Figure (IV.22) | Relation entre les pertes d'eau du sol et l'humidité de l'air | 78 |
| Figure (IV.23) | Relation entre les pertes d'eau du sol et la vitesse du vent. | 78 |

Liste des tableaux

| N° | LISTE DES TABLEAUX | Pages |
|------------------------|--|-----------|
| Tableau (I.1) | Moyennes mensuelles des paramètres météorologiques de la station de Touggourt | 4 |
| Tableau (I.2) | La production agricole en 2018 aux wilayas Biskra ; El oued et Ouargla | 13 |
| Tableau (II.1) | principaux facteurs pédologiques et géomorphologiques | 19 |
| Tableau (II.2) | principaux facteurs de choix de la techniques d'arrosage | 19 |
| Tableau (II.3) | Les paramètres de choix pour l'utilisation de différents techniques d'irrigation | 20 |
| Tableau (II.4) | Intensités admissibles (en mm/min), sols, culture et pentes | 23 |
| Tableau (II.5) | valeurs des pertes par évaporation et par entrainement du vent pour différent machines d'aspersion | 30 |
| Tableau (III.1) | Granulométrie de sol de la région d'étude | 42 |
| Tableau (III.2) | Teneur en eau volumique à la capacité au champ (H cc)et au point de flétrissement (H pf) et la densité apparente | 43 |
| Tableau (III.3) | Caractéristique de l'eau d'irrigation | 43 |
| Tableau (IV.1) | Les mesures des débits des paramètres climatiques de bloc A(18 m x 18 m) | 52 |
| Tableau (IV.2) | Les mesures des débits des paramètres climatiques de bloc B (18 m x 18 m) | 53 |
| Tableau (IV.3) | Les mesures des débits des paramètres climatiques de bloc A(12 m x 18 m) | 54 |
| Tableau (IV.4) | Les mesures des débits des paramètres climatiques de bloc B (12 m x 18 m) | 55 |
| Tableau (IV.5) | Effet de la vitesse du vent et de l'espacement des arroseurs sur l'uniformité à différents nombre de rampes | 56 |
| Tableau (IV.6) | mesures des pertes globales et des paramètres climatiques de bloc A | 58 |
| Tableau (IV.7) | mesures des pertes globales et des paramètres climatiques de bloc B | 59 |
| Tableau (IV.8) | Paramètres statistiques de la régression du bloc A | 63 |
| Tableau (IV.9) | Paramètres statistiques de la régressions du bloc B | 63 |
| Tableau (IV.10) | Evaluation de la performance des modèles proposés et existants (Bloc A) | 65 |
| Tableau IV.11) | Evaluation de la performance des modèles proposés et existants (Bloc B) | 65 |
| Tableau IV.12) | Test de normalité bloc A 18X18 m | 67 |
| Tableau IV.13) | Test de normalité bloc B 18X18 m | 67 |
| Tableau IV.14) | mesures des pertes globales et des paramètres climatiques de bloc A(12X18m) | 68 |
| Tableau IV.15) | mesures des pertes globales et des paramètres climatiques de bloc B(12X18m) | 69 |
| Tableau IV.16) | Paramètres statistiques de la régressions du bloc A | 72 |
| Tableau (IV.17) | Evaluation de la performance des modèles proposés et existants (Bloc A) | 72 |

Liste des tableaux

| | | |
|------------------------|--|-----------|
| Tableau IV.18) | Test de normalité bloc A 12X18 m | 73 |
| Tableau (IV.19) | pertes d'eau de la couche superficielle du sol | 79 |
| Tableau (IV.20) | Paramètres statistiques de la régression des pertes d'eau de la couche superficielle | 80 |

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le sud-est de l'Algérie est un pôle agricole important et contribue de manière significative à la production agricole. Les zones irriguées dans les wilayas de Biskra, EL Oued et Ouargla, représentent environ 19.11% des superficies irriguées en Algérie, qui atteint 1.33 millions d'hectares, et dépendent principalement de la culture de palmiers avec une production de 755 079.7 tonnes, Cultures fourragères environ de 172 084.7 tonnes, céréales estimées à 109 964.2 tonnes et cultures maraichères 1 240 395 tonnes. [1]

Les ressources en eau souterraines dans la région sont contenues dans les deux grands systèmes aquifères qui sont : le complexe terminal (CT) et le Continental intercalaire (CI), tous deux surmonté par la nappe phréatique qui est présentée dans l'ensemble des oasis. D'une capacité globale de plus de 30 000 milliards de m³. [2]

L'attribution de concessions et la création de grandes exploitations entraînent la mise en service des différents systèmes d'irrigation a eu pour conséquence une augmentation de la demande en eau et une introduction de nouvelles techniques d'irrigation telles que l'aspersion.

L'augmentation excessive des terres irriguées engendre une forte baisse piézométrique de nappes exploitées, à titre d'exemple la baisse piézométrique du complexe Terminal, va de 32m en 43 ans dans l'Oued Righ nord. [3]

Dans le cadre de la politique de la sécurité alimentaire, le programme de l'État algérien a pour objectif d'atteindre à 2 millions d'hectares des terres irriguées en horizon 2020, la plupart des terres situées au sud et sur hauts plateaux en raison de la disponibilité de terres acceptables pour l'agriculture. [4]

Le défi d'augmentation de la surface des terres irriguées a pour objectif d'augmenter la production agricole, il exige de réfléchir à la maîtrise d'exploitation des ressources en eau, et ce sera par l'étude de performances de différents systèmes d'irrigation.

La méthode d'irrigation la plus couramment utilisée est la méthode gravitaire, environ 46%), suivie par la méthode d'aspersion (36%) et l'irrigation localisée (18%). Les petites terres irriguées (moins de cinq ha) représentent 87.8% du total des exploitations [5].

L'augmentation de l'utilisation de la technique de l'irrigation par aspersion, en particulier dans les régions arides avec des sols principalement sableux, qui provoque des pertes d'eau à partir des gouttelettes d'eau lors de leur trajet de l'asperseur au sol par l'évaporation et la dérive du vent aussi les pertes par évaporation d'eau de la couche superficielle du sol après l'irrigation nécessite d'étudier ces pertes.

Par conséquent, l'exploitation énorme des ressources en eau pour l'irrigation doit être gérée de manière optimale en fournissant les besoins en eau d'irrigation nécessaires aux cultures, en tenant compte de la valeur des pertes afin d'obtenir un rendement élevé et stable.

La présente thèse consiste à Préciser le type d'installation d'aspersion et ses différents paramètres techniques (les intensités pluviométriques) ; Préciser les pertes globales de l'eau d'irrigation pendant les arrosages (causées par l'évaporation et la dérive du vent) ; Étude l'impact de la surface irriguée sur la diminution des pertes d'eau ; évaluer les pertes par évaporation d'eau de la couche superficielle du sol après l'irrigation

Pour présenter ce travail la thèse a été subdivisé en 4 chapitres présentent successivement :

- Premier chapitre qui présente la caractérisation du milieu physique et socioéconomique de la région d'Oued Righ.
- Deuxième chapitre qui résume brèves théories sur la thématique de la thèse principalement les pertes de l'eau d'irrigation par l'évaporation et la dérive du vent.
- Troisième chapitre de matériels utilisés et de protocoles expérimentaux.
- Quatrième chapitre dans lequel on exposera les résultats obtenus et sa discussion.

CHAPITRE I :
CARACTERISATION DE MILIEU
NATUREL

Chapitre I. CARACTERISATION DE MILIEU NATUREL

I.1 Introduction

La caractérisation de milieu naturel est un préalable indispensable à toute recherche axée sur les pertes par évaporation et entrainement en irrigation par aspersion, car les conditions agro-climatologiques affectent considérablement les performances de la technique d'irrigation par aspersion, en fait, la quantification de ces différents facteurs est imposée.

I.2. Présentation d'ensemble

La vallée de l'Oued Righ est une entité géographique située dans le sud-est Algérien entre la latitude 32°54' et longitude 34°09'. Elle s'étale sur 150 km de longueur et 20 à 30 km de largeur, à cheval sur les wilayas, d'El Oued et d'Ouargla. Elle est limitée au Nord par le plateau de Still, à l'Est par l'erg oriental, au Sud par l'extension de l'erg oriental et à l'Ouest par le plateau gréseux (fig. (I.1)). Cette région est caractérisée par une dépression allongée du sud au nord (vers les grands chotts), l'altitude passe progressivement de +100 m dans El-Goug en amont (la côte la plus haute) à 30 m à chott Merouane en aval. [6]

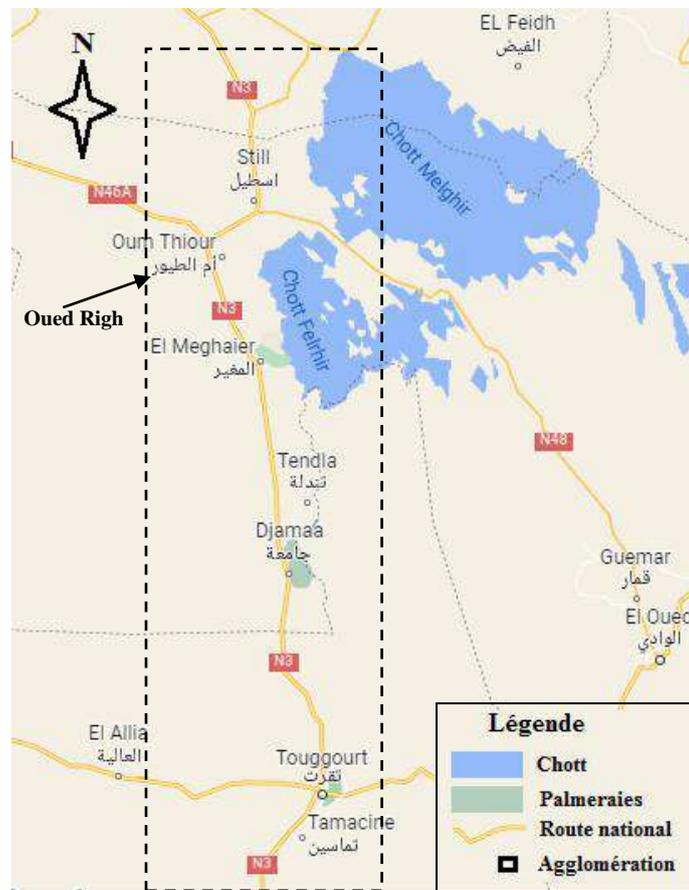


Figure (I.1). –Carte de la vallée d'Oued Righ. (Google Maps)

I.3. Analyse des caractéristiques climatiques de la zone d'étude

La vallée d'Oued Righ est caractérisée par un climat aride, avec l'indice d'aridité égale à 1.75. Les données des différents paramètres météorologiques sont représentées dans le tableau (I.1) suivant :

Tableau (I.1) : moyenne mensuelle des paramètres météorologiques de la station de Touggourt (2003-2017) [7]

| | Tmoy (%) | Pmoy (mm) | Hmoy (%) | Vent moy (m/s) |
|-----------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------------|
| Janvier | 10.85 | 11.62 | 55.83 | 2.52 |
| Février | 12.76 | 3.92 | 46.77 | 3.05 |
| Mars | 17.02 | 5.69 | 41.02 | 3.48 |
| Avril | 21.8 | 9.46 | 35.72 | 3.85 |
| Mai | 26.82 | 2.29 | 32.11 | 3.75 |
| Juin | 31.35 | 0.62 | 28.53 | 3.35 |
| Juillet | 34.11 | 0.00 | 25.73 | 2.97 |
| Août | 33.66 | 3.11 | 28.37 | 2.83 |
| Septembre | 29.22 | 5.43 | 37.13 | 2.82 |
| Octobre | 23.58 | 5.83 | 43.17 | 2.66 |
| Novembre | 16.33 | 4.76 | 48.94 | 2.3 |
| Décembre | 11.61 | 4.15 | 55.72 | 2.13 |
| Moyenne | 22.43 | 4.74 | 39.92 | 2.97 |
| Cumul | | 56.93 | | |

I.3.1. La pluviométrie

D'après La Figure (I.2), précipitations annuelles moyennes sont de l'ordre 56,93mm à la station de Touggourt.

On constate que la quantité de pluie est insignifiante et irrégulière au cours de l'année, le mois le plus pluvieux est le mois de Janvier, tandis que le mois le plus sec est le mois de Juillet, en générale les pluies sont très faibles (inferieur de 5 mm) .

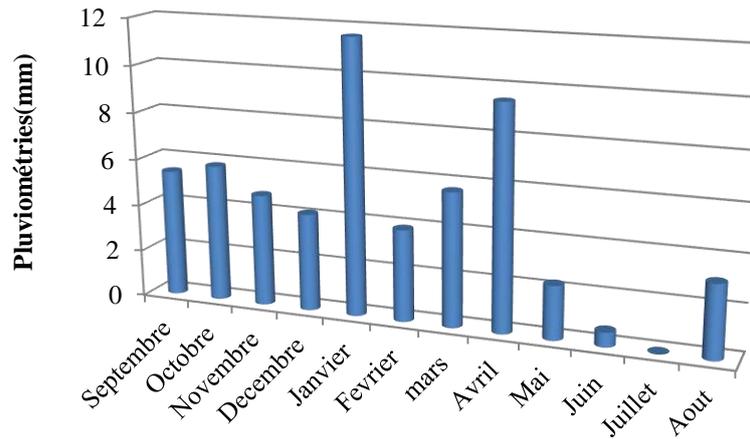


Figure (I.2) Pluviométries moyennes mensuelles (2003 jusqu'à 2017) [7]

I.3.2. L'humidité de l'air :

Selon les données climatologiques enregistrées au niveau de la station météorologique de Touggourt on distingue le suivant :

Les moyennes mensuelles de l'humidité relative varient entre 25% et 56%, sachant que la moyenne annuelle est de l'ordre de 39.92%. Juillet est le mois le plus sec et d'ordre 25.73%, Janvier est le mois le plus humide et d'ordre 55.83%. Ces valeurs sont considérées que cette région possède un climat sec, voir figure (I,3)

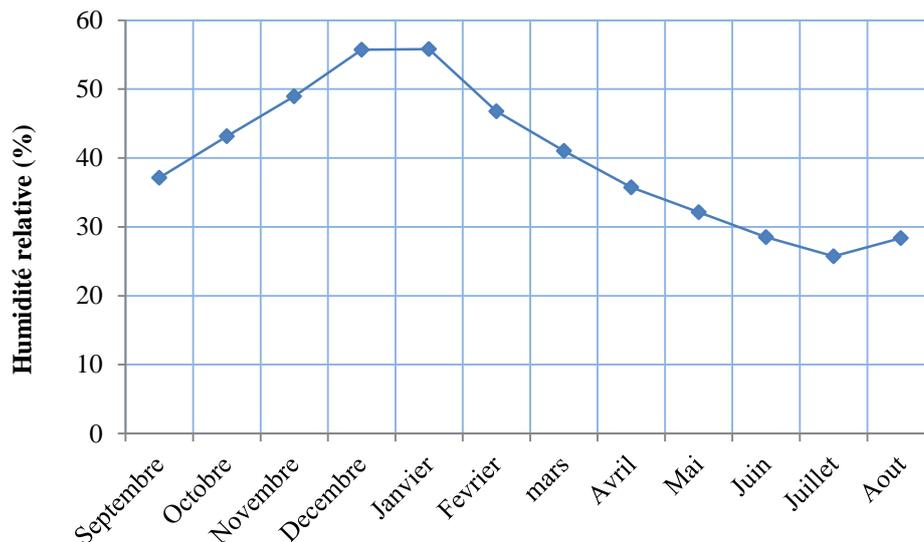


Figure (I.3) : humidités de l'air moyennes mensuelles (2003 jusqu'à 2017) [7]

I.3.3. La vitesse de vent

La vitesse du vent est un paramètre très important qui affecte sur l'uniformité de distribution, alors sur l'efficacité de l'irrigation par aspersion, car les gouttelettes sont entraînées hors de la frontière de la zone d'irrigation.

Selon les données climatologiques enregistrées au niveau de la station météorologique de Touggourt, nous remarquons que les vents sont fréquents durant toute l'année, ils varient entre 2.52 à 3.35. Les vitesses les plus élevées sont enregistrées entre mois de Mars et Mai (3.48 à 3.85) m / s. Voir la Figure (I,4)

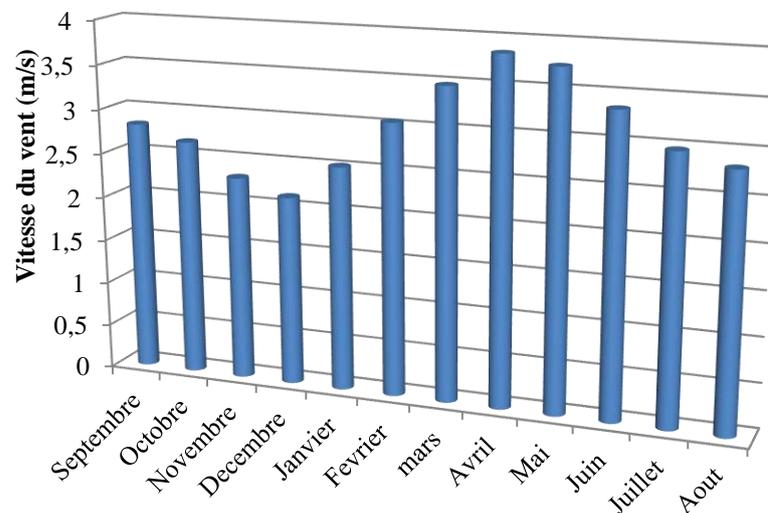


Figure (I.4) : Les vitesses des vents moyennes mensuelles (2003 jusqu'à 2017) [7]

I.3.4. Analyse des températures moyennes mensuelles (2003-2017)

La température est un élément fondamental du climat. Sa variation influence sur la transformation des eaux en vapeur. De ce fait, elle influence sur le degré d'évaporation et par conséquent elle agit sur le rendement de la culture. Les températures moyennes mensuelles (2003-2017) sont données sur la figure (I.5).

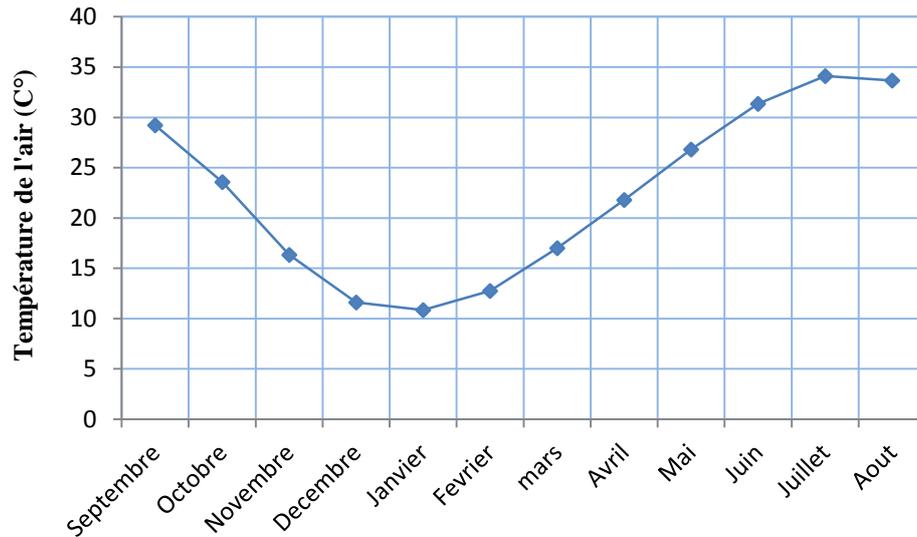


Figure (I.5) : températures moyennes mensuelles (2003 jusqu'à 2017) [7]

La vallée d'Oued Righ est caractérisée par une forte température dont les températures moyennes annuelles sont de l'ordre de 22.43°C dans la station de Touggourt.

La température moyenne mensuelle maximale, est enregistrée pendant le mois de juillet qui est le mois le plus chaud où les températures sont 34.11°C. Le mois le plus froid est bien le mois de janvier où les températures sont 10.85°C.

I.3.5. Estimation de l'évapotranspiration

Les valeurs d'évapotranspiration moyennes mensuelles sont données dans la figure (I.6) suivant :

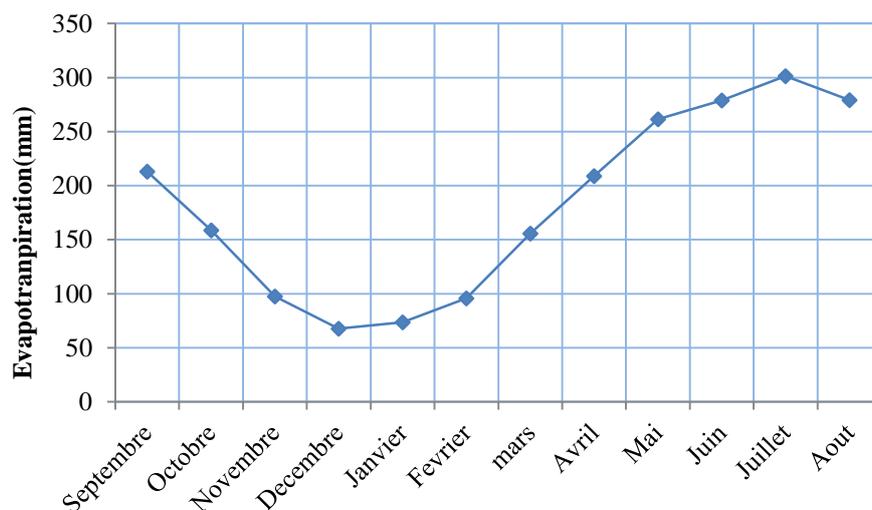


Figure (I.6) : valeurs d'évapotranspiration moyennes mensuelles (2003 jusqu'à 2017) [7]

On observe dans cette figure deux parties de taux d'évapotranspiration :

Évapotranspiration importante : aux périodes sèches, à partir du mois d'avril jusqu'au mois d'octobre avec une valeur maximale égale à 301.3 (mm) au mois de juillet.

Evapotranspiration modérée : aux périodes froides, du mois de novembre jusqu'au mois de mars. La valeur minimale est égale à 67.83 (mm) au mois de décembre.

1.3.6. Indice d'aridité [8]

En considérant les facteurs climatiques les plus importants et les plus faciles à observer (pluie P et température T), De MARTONNE propose une relation pour caractériser le climat d'une région donnée :

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

Avec

P : précipitation annuelle (mm).

T : température moyenne annuelle (C°).

Si I est inférieur à 5 : milieu hyperaride.

5 < I < 10 : milieu aride.

10 < I < 20 : milieu semi-aride.

20 < I < 30 : milieu tempéré.

I > 30 : région à rivière permanente telle la région équatoriale.

D'après les données de l'Annexe 1, l'indice d'aridité est 1,75 pour Touggourt ; ce qui implique que la région de Touggourt, selon la classification donnée ci-dessus, est de milieu hyperaride, alors l'irrigation est indispensable pendant toute l'année.

1.4. Aperçu sur l'hydrogéologie [2]

La région de l'Oued Righ présente des ressources en eau souterraines importantes, représentées par aquifère de la nappe phréatique et deux grands systèmes aquifères qui sont respectivement :

- La nappe phréatique du Quaternaire.

- Le système aquifère du complexe terminal qui contient deux grandes nappes :

A- Nappe des sables du Mio-pliocène (CT).

B- Nappe des calcaires de l'Eocène inférieur et du Sénonien (CT).

- Le système aquifère du continental Intercalaire (CI).

I.4.1 Le continental intercalaire (nappe de l'Albien) :

C'est un aquifère profond, son toit se situe généralement à 1000 m et plus, il couvre pratiquement le sud-est Algérien avec une superficie de 600 000 Km². Son capacité en eau a été évaluée à 50 000 milliard m³. Les eaux du continental intercalaire sont de bonne qualités (minéralisation totale généralement < 3,5 g/l).

Cette nappe est exploitée par peu de forage à cause de son coût d'exploitation très élevé sachant que la profondeur d'un forage peut dépasser les 2000 m et sa température d'eau qui atteint où excéder les 60° Celsius.

I.4.2 Le complexe terminal :

Le complexe terminal est un système moins profond que celle du continental intercalaire (moins de 400 m), il couvre une superficie de 350 000 Km² avec des eaux généralement salées. Il est constitué de trois nappes principales : La nappe des sables du Miopliocène, La nappe des calcaires du Sénono-Eocène (Fig. (I.7)). Cette nappe est fortement exploitée dans la région.

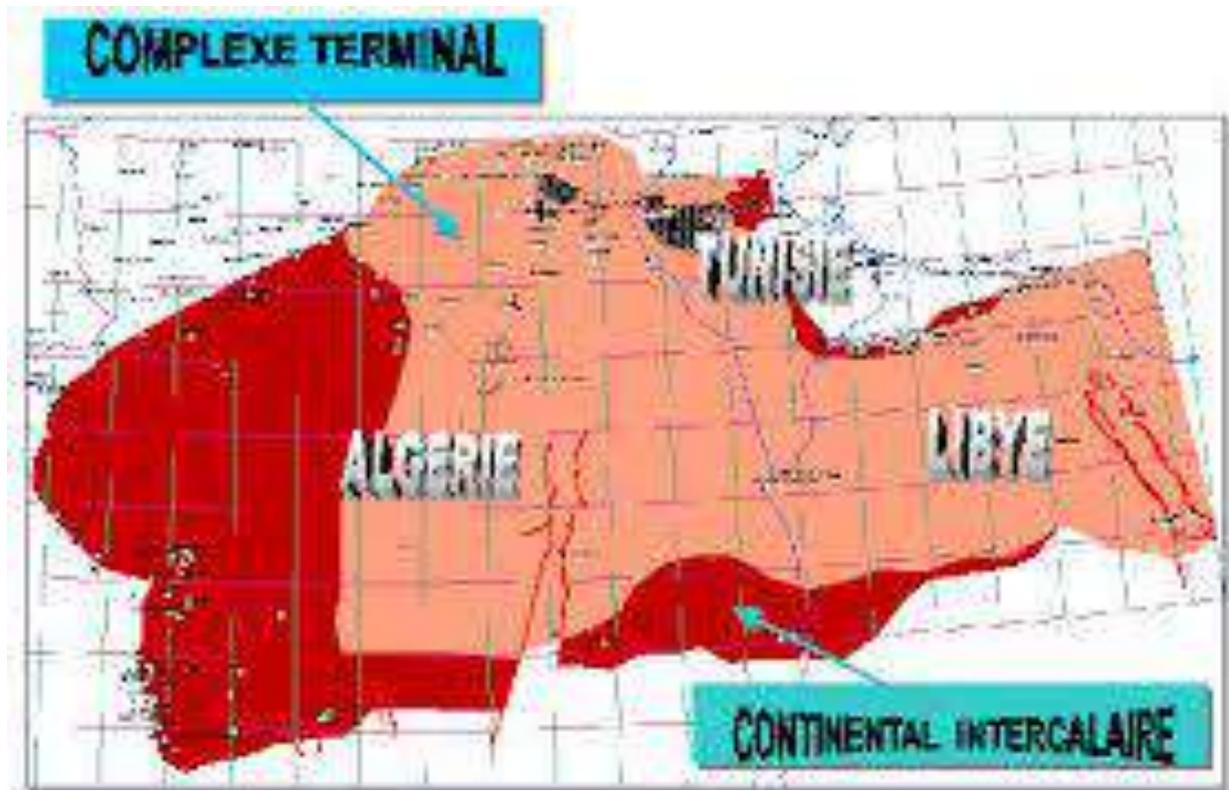


Figure (I.7) : Les nappes aquifères du Sahara Algérien [9]

I.4.3 La nappe phréatique

La nappe phréatique est omniprésente dans toutes les oasis de la vallée de l'Oued Righ. Les variations de la profondeur de la nappe phréatique sont liées à la fréquence des irrigations et à l'efficacité de drainage. Elle est généralement faible, les résultats de calcul de la moyenne des profondeurs montrent que dans les palmeraies 8% de la nappe se situe à une profondeur de 0-0.50 m, 72% à 0,50-1.00 m, 19% à 1,00-1.50 m et 1% se trouve sous 1.50 m.

I.5.Cadre agro-pédologie

I.5.1 LES SOLS

L'origine des sols dans la vallée de l'oued Righ comme mixte alluvionnaire, colluviale et éolienne, les deux premières proviennent de l'érosion du niveau encroûté datant du quaternaire ancien ou du mio-pliocène. Les phases successives d'érosion et de comblement du fond de la vallée, sont responsables de l'hétérogénéité texturale constatée dans les horizons profonds, contrairement aux horizons supérieurs qui ont une origine éolienne (plages sableuses plus ou moins remaniées et récentes).

Les sols de la vallée d'oued Righ contiennent des fortes proportions de gypse, La raison principale de cette accumulation dans les sols est due à la précipitation du gypse provenant des sels contenus dans la nappe aquifère et dans les ruissellements. A la suite d'une évaporation intense et dont la variation saisonnière du niveau piézométrique peut atteindre dans la vallée de l'oued Righ l'amplitude d'un mètre et plus.

La vallée d'oued Righ avait des sols d'apport, le caractère commun à tous les sols peu évolués et une faible différenciation des caractères morphologiques. L'agrégation est nulle ou très peu développée [10]

I.5.2 Aperçu sur les activités agricoles [11]

La vallée d'Oued Righ se caractérise par un système du type oasien qui consiste depuis l'Antiquité en une association de trois strates végétale. Cet agro système oasien, est situé essentiellement sous forme d'oasis localisées tout au long de l'Oued Righ, au voisinage des sources d'eau et dans les endroits où les niveaux des nappes phréatiques sont peu profonds.

Le système traditionnel oasien dans cette région est un système comportant trois strates : celle du palmier, celle d'arbres fruitiers divers et celle de cultures annuelles (céréales, fourrages, maraîchages).

Le microclimat favorable créé par le palmier favorise une polyculture vivrière (maraîchage, fourrage, céréaliculture) en association avec un élevage, surtout caprin mais aussi ovin, du type familial et en conduite

I.5.3 Les terres irriguées au sud-est de l'Algérie :

La superficie des exploitations irriguées aux Wilaya de Biskra ; El oued et Ouargla atteignent 254411 ha qui représentent 19.11% de la surface totale irriguée en Algérie qui atteint 1.33 million d'hectares en 2018. [1]

La superficie irriguée aux Wilaya de Biskra, El oued et Ouargla dépassaient de 112 693 ha en 2001 à 254 411 ha en 2018 qui représente augmentation de 225 %

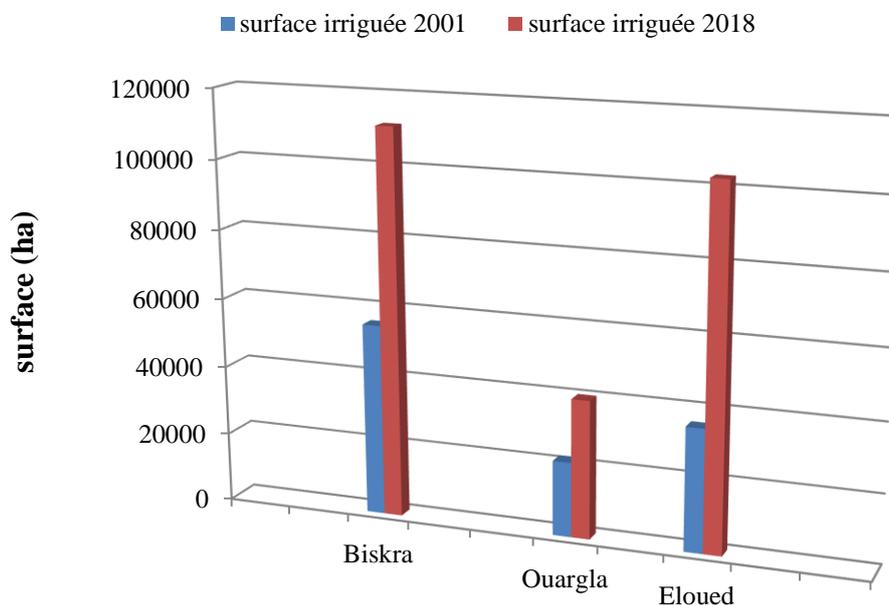


Figure (I.8) : évolution des terres irriguées aux wilayas Biskra ; El oued et Ouargla entre l'année 2001 et 2018[12, 13,14]

La figure suivante illustre les pourcentages de répartition des terres irriguées selon le mode d'irrigation. La méthode d'irrigation la plus couramment utilisée est la gravité avec 46%, suivie par la méthode d'aspersion de 36% et l'irrigation localisée de 18%.

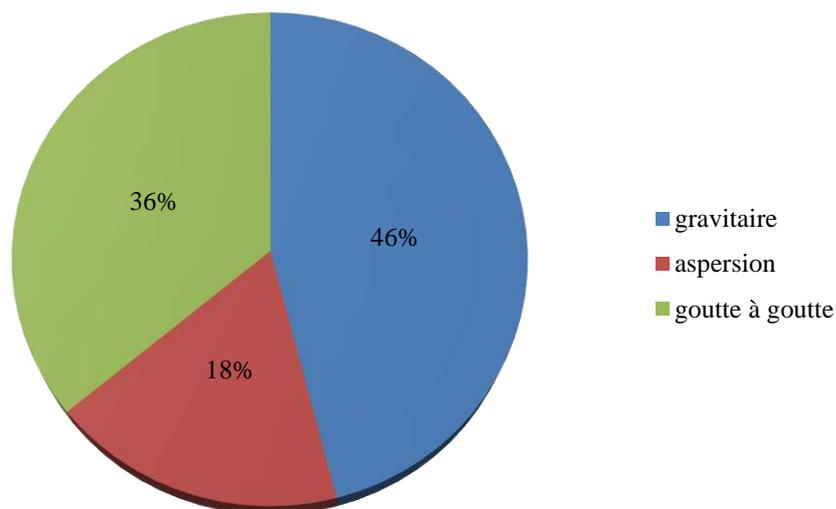


Figure (I.9) : répartition des surfaces irriguées en fonction du mode d'irrigation aux wilayas Biskra ; El oued et Ouargla [12 13,14]

La figure suivante illustre la surface des exploitations selon la taille et le nombre des exploitants, on remarque que 34,39% de surface irriguée moins de 5ha qui représente 87,8% des exploitations (MADRP ,2001).

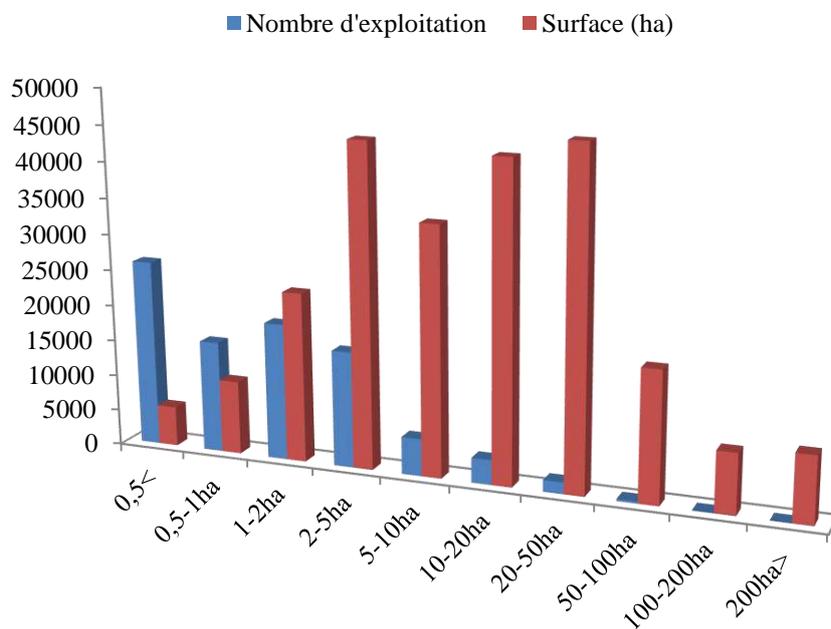


Figure (I.10) : surface des exploitations et le nombre des exploitants aux wilayas du sud de l'Algérie [15]

La superficie des terres irriguées par aspersion 45698 Ha, dont 41557 Ha irriguées par des arroseurs classiques et des pivots d'aspersions traditionnelles qui représente 90 %, réparties sur des superficies ne dépasse pas 5 Ha.

Par constat les superficies irriguées par pivots d'aspersion traditionnelles en progression dans la wilaya d'EL OUED, destinées essentiellement aux irrigation des cultures maraichères et fourragères.

I.5.4 La production agricoles

La production agricole des cultures essentielles en 2018 aux wilayas Biskra ; El oued et Ouargla présentés au tableau suivant :

Tableau (I.2) : La production agricole en 2018 aux wilayas Biskra ; El oued et Ouargla [12, 13,14]

| | Phoeniculture (Qx) | Céréales (Qx) | Cultures fourragères(Qx) | Cultures maraichères (Qx) |
|---------|-----------------------|------------------|-----------------------------|------------------------------|
| Biskra | 4 600 000 | 996 090 | 560 250 | 9 704 300 |
| El Oued | 2 533 100 | 528 800 | 479 020 | 15 217 400 |
| Ouargla | 1 490 677 | 83 947.52 | 1 015 297 | 2 359 759 |
| Total | 8 623 777 | 1 608 837.52 | 2 054 567 | 27 281 459 |

I.5.5 Les ressources en eau au sud d'Algérie :

Le Sud du pays dispose de deux grandes nappes. Celle du continental intercalaire (CI) qui s'étend à plusieurs centaines de mètres de profondeur : son toit se trouve entre 50 et 2 300 mètres sous la surface selon les endroits sur 600 000 kilomètres carrés dans des grès et des argiles vieilles de 100 à 150 millions d'années. Environ 20 000 milliards de mètres cubes d'eau y sont piégés. La seconde nappe est le complexe terminal (CT) qui renferme 11 000 milliards de mètres cubes supplémentaires. Des eaux de pluie et de ruissellement s'infiltrent directement dans le continental intercalaire (un milliard de mètres cubes d'eau). Au total, l'aquifère du Sahara septentrional s'étend sur plus d'un million de kilomètres carrés et recèle environ 31 000 milliards de mètres cubes d'eau.

A. Exploitation du Complexe Terminal et Continental Intercalaire en Algérie [3] :

L'exploitation de la nappe du complexe Terminal est en l'an 2000, de l'ordre de 21.2 m³/s. Elle a ainsi accusé une nette évolution depuis 1950 quand cette exploitation n'était que de 5.77 m³/s.

Cette évolution s'est nettement accélérée au début des années 80. En effet, les prélèvements sont restés inférieurs à 8.5 m³/s jusqu'en 1970 pour passer à 11.5 m³/s en 1980 et atteindre 17.4 m³/s en 1990. L'exploitation de la nappe du complexe Terminal se fait en Algérie essentiellement par pompage (19.4 m³/s équivalant à 91% de son exploitation globale en Algérie). L'exploitation par cartésianisme a toujours été relativement faible. Elle ne dépasse pas actuellement 1.8 m³/s. Cette nappe est principalement exploitée dans les régions d'El Oued, Ouargla, Biskra et accessoirement dans les wilayas de Khenchela et Tébessa.

La nappe du CI traditionnellement exploitée dans les wilayas de d'Adrar, Ghardaïa, El Oued et Ouargla, s'est étendue d'une manière sensible, depuis le début des années 80, aux wilayas de Biskra, Tamanghasset et Illizi. Cette exploitation qui au départ se faisait à partir de Foggaras (Adrar) et forages jaillissants (Ghardaïa, Ouargla et El Oued) s'est largement étendue grâce à la généralisation du pompage. Ainsi, les prélèvements par pompage qui en 1950 étaient de l'ordre de 0.36 m³/s (soit 6.4% des prélèvements de l'époque), ont atteint, en l'an 2000 la valeur de 18.1 m³/s (soit 56.6% des prélèvements en l'an 2000). La généralisation du pompage est particulièrement spectaculaire dans la wilaya d'Adrar où les volumes pompés sont passés de 0.5 m³/s, en 1982, à 6.1 m³/s en l'an 2000. Une situation similaire s'observe dans la wilaya de Ghardaïa. Cette situation est largement commandée par la disposition de la nappe à être captée à faible profondeur et avec une piézométrie proche de la surface du sol.

La figure (I.11) indique l'évolution des débits pompés entre les années 1950 et 2000

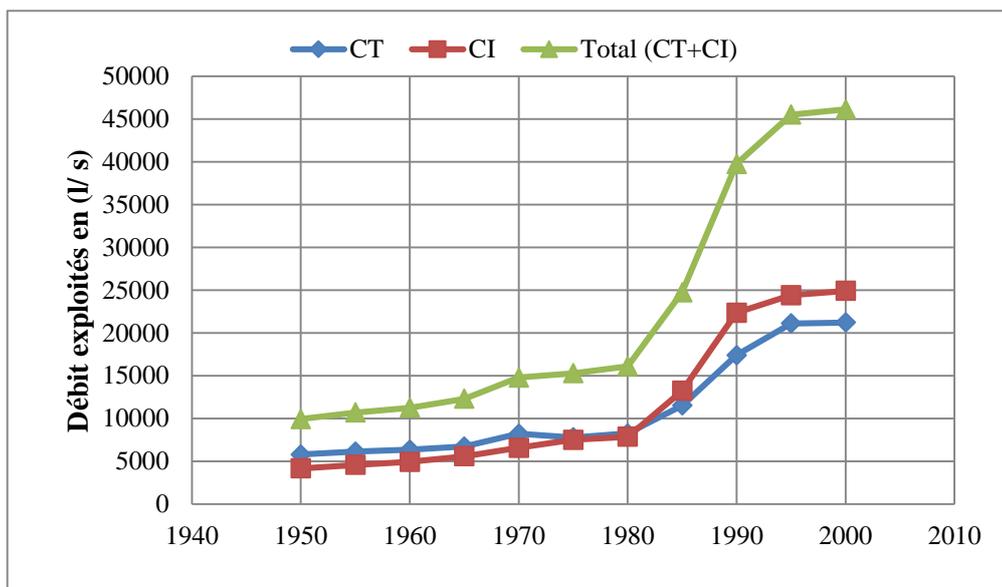


Figure (I.11) : Évolution des débits pompés du complexe terminal et du Continental intercalaire

B. Evolution piézométrique du Complexe Terminal et du Continental Intercalaire en Algérie [3] :

La baisse de la piézométrie de la nappe du complexe Terminal est suivie en Algérie entre 1950 et l'an 2000, dans plusieurs zones ou groupes d'oasis dont en particulier Mghaïer, Djemaa, El Oued, Touggourt, Hassi Khalifa, Ouargla et GassiTouil. Ce suivi est discontinu dans le temps et ne se fait qu'à l'occasion des campagnes de mesures spécifiques. Dans la région de l'Oued Rhir nord, le forage de Sidi Ahmed Tidjani montre, entre 1952 et 1995, une baisse piézométrique globale de 32 m. de même celui de Chemora indique une baisse de 25.7m entre 1955 et 1991. D'une manière générale, la baisse piézométrique du CT est dans cette zone (Mghaïer et Djemaa) où l'exploitation est relativement intensive ces dernières années, linéaire et oscille entre 0.6 et 1.0 m /an. Au niveau de Touggourt El Oued, cette baisse est de l'ordre de 0.9 m/an. Elle semble s'accroître depuis le milieu des années 70. La baisse devient plus faible au niveau d'Ouargla où elle est de l'ordre de 3.8 à 8.5 m en 27 ans, mais plus atténuées à GassiTouil et à Hassi Messaoud (0.5 à 5.5 m en 25-30 ans).

Sur l'ensemble du bas-Sahara algérien, la baisse piézométrique du complexe Terminal, va de 32m en 43 ans dans l'Oued Rhig nord, à près de 5m en 30 ans à Ouargla. Elle s'atténue vers les zones limitrophes où la densité des forages exploitant cette nappe est faible.

D'une manière générale, la nappe du Continental intercalaire accuse, entre 1950 et 2000, une baisse sensible en Algérie dans les zones où elle est à forte pression et où son exploitation a été largement renforcée depuis le début des années 80, par la création de nouveaux forages. C'est le cas d'Oued Rhig, Ouargla, El Oued et Hassi Messaoud. Dans ces zones, la baisse observée dépasse souvent 2 m/an au cours des deux dernières décennies.

CONCLUSION

Les extensions de la mise en valeur des terres agricoles au Sahara dans des conditions climatiques sévères favorisent l'utilisation de la technique d'irrigation par aspersion et donc La progression d'exploitation de l'eau des nappes aquifères profondes (CT, CI) qui engendre la baisse remarquable de ces nappes aquifères.

La superficie des terres irriguées par aspersion à Biskra, El-Oued et Ouargla 45698 Ha, dont 41557 Ha irriguées par des arroseurs classiques et des pivots d'aspersions traditionnelles pour petites surfaces de 01 à 05 Ha.

Au Sahara le climat est conditionné par la température de l'air élevée, de vitesse du vent forte et humidité de l'air faible ce qu'a un impact important sur l'évapotranspiration et sur pertes par évaporation et entrainement des gouttelettes en technique d'irrigation par aspersion.

Cette état du fait impose la nécessité de minimiser le perte d'eau et d'ajusté l'humidité optimale dans la couche du sol

CHAPITRE II : RAPPEL THEORIQUE

Chapitre II. RAPPEL THEORIQUE

II.1 Introduction

Quand la pluviométrie naturelle est insuffisante, l'irrigation est nécessaire pour assurer un développement optimal des cultures. L'aridité au Sahara pose plusieurs problèmes à cause de l'irrigation, à titre d'exemple le surplus d'eau provoque la remontée de la nappe à la surface, aussi la salinité du sol. Alors le choix d'un équipement d'irrigation ne doit pas se faire de manière impulsive, il doit être réfléchi techniquement et économiquement.

II.2. Aperçu sur des techniques d'irrigation

Les divers systèmes d'irrigation existants aux wilayas de Sahara peuvent être rassemblés en quatre grands types :

- L'irrigation de surface (par planche),
- L'irrigation par aspersion (asperseurs classique, pivot d'aspersion)
- L'irrigation localisée (goutte à goutte).
- L'irrigation sub-surface (Ghouts)

Ses différents systèmes ont des effets variables :

- Sur le niveau d'évaporation, donc sur les besoins en eau à satisfaire ;
- Sur les conditions ambiantes au niveau des parties aériennes (humidité, température)
- Sur le sol (répartition de l'eau, maintien de la structure et de l'aération)

En irrigation de surface, la distinction entre les différentes techniques est essentiellement fondée sur la méthode d'application de l'eau : ruissellement, submersion ou techniques mixtes. [16]

Le ruissellement, défini d'une façon générale, consiste à faire couler sur le sol en pente une mince couche d'eau ; on laisse l'eau couler tout le temps qu'il faut pour que le sol s'humecte jusqu'à la profondeur voulue. On appelle encore ce système irrigation par déversement à cause de l'eau se déverse généralement par le bord d'une rigole à peu près horizontale en une lame ruisselante.[17].Au Sahara de l'Algérie les agriculteurs appliquons l'arrosage par planche ,qui consiste à faire couler une mince couche d'eau sur un sol incliné de 0,2 à 3%, qui s'infiltrera verticalement jusqu'à l'humidification de cette tranche de sol, le débit à déverser est en fonction de la pente, de la largeur et de la longueur de la planche. Mal gestion de cette technique engendre des pertes d'eau par infiltration surtout dans des sols sableux

La technique de l'irrigation par aspersion est conçue sur le modèle de la pluie naturelle. L'eau est refoulée sous pression dans un réseau de conduite, ensuite elle est diffusée par des asperseurs sous la forme d'une pluie artificielle. [18] l'inconvénient de cette technique au Sahara la perte énorme d'eau à cause des conditions climatiques sévères.

La micro-irrigation, un concept se caractérise par de faibles apports d'eau et de fertilisants, répétés et localisés au pied de chaque végétal ou rangée de plantation. Elle englobe la micro-irrigation, la brumisation, le micro-jet, l'apport d'eau via les gaines poreuses et la technique goutte à goutte. [18]. La majorité des sols du Sahara sont sableux, le bulbe d'humidité est vertical, il faut réduire l'espacement entre les goutteurs pour assurer l'humectation plus des parties.

Au Sahara l'irrigation de sub-surface se fait par un système qui s'appelle Ghout, l'application de l'eau se fait sous la surface du sol, par une nappe profonde et moins de salinité, la nappe d'eau est environ de 1m sous la surface du sol.

Evaluation des techniques d'irrigation se définir par ensemble de critères et de contraintes :

- Topographie (pente du terrain, relief, géométrie de la parcelle) ;
- Ressource en eau (quantité, qualité, débit dont on dispose) ;
- Natures des cultures ;
- Nature du sol (perméabilité) ;
- Facteurs climatiques ;
- Facteurs sociologiques ;
- Facteurs économiques ;
- Efficience de l'investissement.

On ne doit pas considérer chacun de ces critères de manière isolée. au contraire il faut en avoir une vision globale afin de mieux évaluer les potentialités d'irrigation d'un site données.

II.3. Principaux facteurs et choix de la technique d'irrigation

Le tableau suivant est donné principaux facteurs pédologiques et géomorphologiques pour choisir la technique d'irrigation ;

Tableau (II.1) : principaux facteurs pédologiques et géomorphologiques. [19]

| Techniques d'arrosages | sols | | | Relief accidenté | Pentes fortes | Niveau de la nappe phréatique (salée) peu profonde | Déficit des eaux d'irrigation | Eaux d'irrigation salées |
|------------------------|-------|--------|--------|------------------|---------------|--|-------------------------------|--------------------------|
| | salés | légers | lourds | | | | | |
| superficielle | + | * | + | * | * | * | * | + |
| aspersion | * | + | - | + | + | - | + | - |
| dispersion | * | + | + | + | + | * | + | + |
| Goutte à goutte | - | * | + | * | + | - | + | + |

+ : utilisée ; - : ne peut être utilisée ; * : en partie.

Le choix de la technique d'arrosage dépend de plusieurs facteurs qui sont cités dans le tableau suivant :

Tableau (II.2) : principaux facteurs de choix de la techniques d'arrosage. [19]

| Techniques d'arrosages | Humidification de sol | Humidification de l'air | Arrosage de réserves | Lessivage | Apport engrais | Irrigation à eaux épurées | Irrigation antigel | Arrosages provoqué les mauvais herbes | Vents fortes |
|------------------------|-----------------------|-------------------------|----------------------|-----------|----------------|---------------------------|--------------------|---------------------------------------|--------------|
| superficielle | + | * | + | + | * | - | - | + | + |
| aspersion | + | + | * | * | + | + | + | + | - |
| dispersion | - | + | - | - | * | - | - | - | + |
| Goutte à goutte | + | - | * | - | + | - | - | - | + |

+ : utilisée ; - : ne peut être utilisée ; * : en partie.

Tableau (II.3) : Les paramètres de choix pour l'utilisation de différentes techniques d'irrigation par aspersion [19]

| Technique d'irrigation | Evaporation-Précipitation, 10 ³ m ³ /ha | Vent, m/s | K sols 1 ^{ere} heure cm/h | K min,couche permeabilite,m | Hnp,min,m | I max,% | Relief complexe (volume) m ³ /ha | Garantie V irrig | Hmax plante,m | Dose d'arrosage m ³ /ha | Garantie sol | Surface irrigué par ha |
|---|---|-----------|------------------------------------|-----------------------------|-----------|-----------|---|------------------|---------------|------------------------------------|--------------|------------------------|
| Rampe frontale position fixe à deux consols | 2 - 5 | 0 - 5 | 5- 30 | 0.5 | 5 | 0 - 5 | 0 - 400 | 1 - 10 | 2 | 200 - 600 | 1.2 - 10 | 0.5 - 5 |
| Rampe frontale position fixe à large | 2 - 5 | 0 - 5 | 5- 30 | 0.5 | 5 | 0 - 2 | 0 - 500 | 1 - 10 | 1.1 | 200- 600 | 1.2 - 10 | 0.5 - 15 |
| Pivot | 2 - 5 | 0 - 5 | 5- 30 | 0.5 | 5 | 0 - 3 | 0 - 500 | 1 - 10 | 2.5 | 200- 800 | 2 - 10 | 0.5 - 20 |
| Canon sur tracteur positive | 1 - 4 | 0 - 4 | 15- 30 | 1.5 | 5 | 0.1 – 0.7 | 0 - 300 | 2- 10 | 4 | 200- 600 | 1.5 - 10 | 0.5 - 5 |
| Enrouleur | 2 - 5 | 0 - 4 | 10- 30 | 0.5 | 5 | 0 - 10 | 0 – 400 | 1 - 10 | 2 | 200- 600 | 1.2 - 10 | 0.5 – 10 |
| Couverture integrale | 2 - 5 | 0 - 4 | 10- 30 | 0.3 | 5 | 0 – 50 | - | 1 - 10 | 5 | 100- 600 | 1.2 - 10 | 0.5 – 10 |
| Asperseur unique(traineau) | 2 – 5 | 0 – 5 | 1- 30 | 0.3 | 5 | 0 – 50 | - | 1 – 10 | 4 | 10- 600 | 1.1 – 10 | 0.5 – 10 |
| | 2 – 5 | 0 – 4 | 10- 30 | 0.5 | 5 | 0 - 7 | 0 - 500 | 1 - 10 | 4 | 200- 600 | 1.1 - 10 | |

II .4. TYPES DE TECHNIQUE D'ARROSAGE PAR ASPERSION

Parmi les matériels d'irrigation par aspersion utilisable au Sahara :

II .4. 1 La rampe d'aspersion classique (type ANABIB) :

Un système de rampe d'aspersion classique est constitué par des conduites galvanisées de diamètre : 50, 76, 89, 102, 127,152 mm, et des asperseurs donnent pluviométries de 3.2 à 24.6 mm/h et portés de 14.4 à 34.00 m, placés sur des cannes à différentes hauteurs selon type de culture irriguée.



Photo (II.1) : Rampe d'aspersion classique (type ANABIB)

II .4. 2 pivots d'irrigation (type ANABIB) :

Un système pivot est constitué par une conduite d'eau soutenue par des supports métalliques équipés de roues appelés tours mobiles. La partie de la machine comprise entre deux tours mobiles s'appelle travée. Chaque tour est dotée d'un moteur électrique dont la mise en marche provoque la rotation des roues. Celles-ci tournent perpendiculairement à la rampe et l'ensemble décrit un cercle. La conduite d'eau porte sur toute sa longueur, des organes d'arrosage appelées buses. A ses extrémités on trouve d'abord un pivot (ou tour centrale) à partir duquel la conduite est alimentée et autour duquel elle peut tourner, puis une conduite en aval appelée généralement le porte-à-faux. –les rampes pivotantes type ANABIB comportent plusieurs travées (de 1 à 10) suivant le cas, distantes de 46,8 à 52,6 mètres. Ilya des pivots pour petites surfaces de 01 à 05 Hectares, et pivots pour grandes surfaces De 10 à 70 Hectares.



Photo (II.2) : pivot d'irrigation (type ANABIB)

II .4. 3 pivots d'irrigation traditionnelle :

Le pivot traditionnel est constitué d'une seule conduite d'arrosage de diamètre généralement de 60 mm, composée de tuyaux en acier léger galvanisé, suspendus au-dessus du sol par de longues structures métalliques et des câbles et posés sur de tour mobile sur roues (figure II.3). Une extrémité de la conduite est raccordée à un mécanisme à pivot implanté au centre de la zone à irriguer ; l'ensemble de la conduite tourne autour du pivot.



Photo (II.3) : pivot d'irrigation traditionnel

II.5. FACTEURS D’UNE IRRIGATION DE QUALITE

La qualité de l’arrosage obtenu par l’aspersion se définit à partir de trois critères principaux : l’efficacité, l’uniformité d’arrosage et l’intensité pluviométrique. [16]

II.5.1. L’intensité pluviométrique

L’intensité pluviométrique est donnée par la formule suivante :

$$i = \frac{q}{s} \quad (II.1)$$

Avec :

I : Intensité moyenne d’arrosage (mm /min)

q: Débit par asperseur (m³/min)

s : superficie de la maille élémentaire (m²)

Les pertes par évaporation peuvent être diminuées par l’augmentation de l’intensité (1.5à2) mm/min. Cela peut aussi diminuer le temps d’arrosage et élever le rendement de l’installation (admissible pour les sols légers jusqu’à 0.8 mm/min).

La mise en œuvre de l’irrigation par aspersion suppose l’estimation préalable de la vitesse d’infiltration à la surface du sol, de façon que l’intensité ne dépasse pas cette valeur.

Tableau (II.4) : intensités admissibles (en mm/min), sols, culture et pentes [20]

| Sol | I=0.05 | | I= (0.05 à0.08) | | I= (0.08 à0.12) | | I=0.12 | |
|-------------|---------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|---------|-------------|
| | cultivé | Non cultivé | cultivé | Non cultivé | cultivé | Non cultivé | cultivé | Non cultivé |
| Sableux | 0.85 | 0.85 | 0.85 | 0.64 | 0.64 | 0.44 | 0.42 | 0.21 |
| Limon-sable | 0.74 | 0.42 | 0.53 | 0.34 | 0.42 | 0.28 | 0.32 | 0.17 |
| Limon | 0.42 | 0.21 | 0.34 | 0.17 | 0.25 | 0.13 | 0.17 | 0.09 |
| argileux | 0.09 | 0.07 | 0.07 | 0.04 | 0.05 | 0.034 | 0.04 | 0.025 |

II.5.2. Efficience de l'aspersion

L'efficience de l'arrosage obtenu par l'aspersion se définit comme le rapport entre la quantité d'eau consommée par une culture et la quantité d'eau apportée par le matériel d'arrosage.

La pratique de l'aspersion entraîne une perte d'eau spécifique liée à l'évaporation à partir des gouttes ; de ce fait, l'efficience réelle va dépendre :

- Du pouvoir évaporant de l'atmosphère (pour cette raison, on voit souvent que l'arrosage de nuit est préférable à l'arrosage de jour.
- De la portée du jet d'aspersion ;
- De la finesse des gouttes ;
- De l'entraînement éventuel des gouttes les plus fines hors de la zone irriguée. [21]

L'efficacité de l'irrigation par aspersion dépend des pertes qui ont lieu pendant et après l'irrigation. Lorsque les conditions de l'eau, quelques-uns des sont réalisés hors de la zone arrosée, où une partie de celui-ci est interceptée par la végétation ou par le sol dehors de la zone arrosée.

II.5.3. Uniformité d'arrosage

Il importe de faire en sorte que la quantité d'eau reçue en chaque point de la surface arrosée s'éloigne le moins possible de la valeur moyenne sur l'ensemble de la surface, de façon à éviter ;

- Les zones sous-arrosées, génératrices de pertes de rendement ;
- Les zones sur-arrosées, génératrices de pertes d'eau par percolation profonde, accompagnée d'un lessivage de matières fertilisantes, et d'un risque d'asphyxie racinaire dans le cas de sol mal drainés. [16]

L'évaluation des performances de l'irrigation par aspersion a fait l'objet de plusieurs travaux qui ont abouti au coefficient développé par Christiansen [22] et Merriam et Keller [23], caractérisant statiquement le degré d'uniformité de distribution de l'eau. Il varie de 0 à 100 %, plus le coefficient est proche de 100 %, plus l'uniformité est bonne.

Christiansen [22] a déterminé les pertes par évaporation en utilisant la méthode des pluviomètres à attraper (catch- can) et il a constaté que les pertes allaient de 19 à 42 %. Frost et Schwalen [24] ont constaté que les pertes varient approximativement proportionnelle à la vitesse du vent et la pression et d'exploitation et inversement proportionnelle au taux d'humidité relative de l'air et taille de la buse.

En ce qui concerne l'efficience de l'irrigation, la littérature offre plusieurs résultats concernant l'évaluation de l'irrigation en fonction de la distribution de l'eau et le pourcentage de surface adéquatement irriguée devant recevoir une dose nette supérieure ou égale à la dose requise par la culture [25, 26, 27,28]

Letey et al. (1984) [29] indiquent que le fait d'ignorer le facteur " uniformité d'irrigation " conduit à une sous-estimation de l'apport optimal d'irrigation nécessaire pour atteindre le rendement prévu.

Le coefficient d'uniformité de Christiansen

Le coefficient de l'uniformité de distribution développé par Christiansen est donné par la formule suivante :

$$CU (\%) = 100 \left(1 - \sum \frac{|hi-hm|}{N.hm} \right) \quad (II.2)$$

Où :

hi : Hauteur d'eau au niveau du pluviomètre i (mm) ;

hm : Hauteur d'eau moyenne appliquée sur la zone arrosée (mm) ;

N : nombre d'observations.

Les pertes d'irrigation par aspersion dans les zones arides et semi arides peuvent être équivalentes à une partie considérable de l'eau rejetée par les arroseurs.

II.6. Besoins en eau d'irrigation :

On peut résumer les besoins en eau d'irrigation par la relation suivante :

Besoins des plantes - Apport d'eau naturelle = Besoins d'eau d'irrigation

- La dose d'arrosage réelle (Mc) est l'ensemble de la dose d'arrosage théorique en ajoutant une quantité d'eau qui représente les pertes totales par évaporation et entrainement par vent.

- La correction de la dose d'arrosage M est donnée par la formule suivante :

$$M = \frac{100 \cdot D}{(100 - E)} \quad (II.3)$$

Mc : La dose d'arrosage réelle en mm ;

D : La dose d'arrosage en mm, ou m³/ha

II.7. Pertes par évaporation et entrainement pendant l'irrigation par aspersion

Lors de l'application de l'irrigation par aspersion, on peut diviser les pertes dans l'atmosphère, en deux composants :

- L'évaporation : le pouvoir évaporant de l'air provoque une évaporation directe des particules lors de leur trajet de la buse jusqu'au sol.
- L'entrainement sous l'effet du vent qui entraine hors la parcelle les plus petites tailles.

Les deux derniers modes, que l'on appellera 'évaporation et dérive' (souvent appelé aussi évaporation et transport), représentent suivant les auteurs la forme la plus importante des pertes pour les systèmes d'irrigation par aspersion. Des estimations rapportées dans la littérature font état de valeurs variant de 2 à 50 %. [30,31].

Plusieurs facteurs contribuent aux pertes d'eau à partir d'un arroseur que ce soit par évaporation ou par entrainement :

- les facteurs liés à la nature de l'équipement (diamètre de la buse, la hauteur de l'asperseur ...), les conditions hydrauliques de fonctionnement (la pression, le débit...).
- les facteurs climatiques : la température de l'air, l'humidité relative de l'air et la vitesse de vent.

II.7.1. Théorie de pertes par évaporation en irrigation par aspersion

En irrigation par aspersion, pendant le parcours de la goutte de pluie de l'arroseur jusqu'au sol, une partie d'un volume de la gouttelette est évaporée.

La formulation de la loi de la cinétique de l'évaporation à partir de la gouttelette a été donnée par Sreznevski B.I celle-ci est basée sur les hypothèses suivantes :

- La vitesse d'évaporation à partir de l'unité de surface de la gouttelette est proportionnelle au diamètre de la gouttelette.
- La vitesse de variation de la surface de la gouttelette est une grandeur constante :

$$\frac{ds}{dt} = \text{constant} \quad (\text{II.4})$$

- Le temps de l'évaporation total de la gouttelette est proportionnel au carré de son diamètre.

En 1980, dans ces travaux, Maxwell a étudié le cas simple de l'évaporation d'une gouttelette isolée dans l'air et il a proposé la relation suivante :

$$\frac{dm}{dt} = 4 \cdot \pi \cdot R \cdot D (C_k - C_o) \quad (\text{II.5})$$

Avec :

R : rayon de la gouttelette en mm ;

D : coefficient de diffusion en cm/s^2 .

C_k : concentration de la vapeur sur la surface de l'air,

C_o : concentration de la vapeur dans l'air.

La relation de Maxwell ne prend pas en considération plusieurs facteurs et en particulier le déplacement de la gouttelette par le vent et la modification de la formule est mise en évidence par Sreznevski B.I qui fait intervenir facteur vent, il a proposé la formule suivante :

$$\frac{dm}{dt} = 4 \cdot \pi \cdot R \cdot D (C_k - C_o) \cdot F \quad (\text{II.6})$$

Avec : F : coefficient caractérisant la vitesse de vent ;

$$F = f(Re, \sigma) \quad (\text{II.7})$$

Re : nombre de Reynolds ;

σ : caractéristique de l'évaporation d'un fluide, pour l'eau : $\sigma=1,68$

L'une des premières études théoriques visant à déterminer les pertes en eau, à savoir l'évaporation lors du vol des gouttes de pluie lors de leur chute et leur emportement par le vent, a été réalisée par E.G. Zack (1970) [32], qui a établi la formule pour calculer le temps d'évaporation complète d'une goutte :

$$T = \frac{(176,4 \cdot d^2)}{(1 + 1,92 V) D} \quad (\text{II.8})$$

Où T est le temps d'évaporation diminuée, min ;

d est le diamètre de la goutte, mm;

v - vitesse du vent, m / s;

D - le manque de pression de vapeur, mm

À l'aide de la formule (1.1), ID Fedorenko (1938) [33] a établi une relation pour calculer la perte d'eau d'évaporation E_{ev} :

$$E_{ev} = 100 \left[1 - \left(1 - \frac{es \cdot t (1 + 1,92 V)}{10584 \cdot d^2} \right)^{1,5} \right] \quad (\text{II.9})$$

On peut voir d'après la formule (2.9) que l'évaporation d'une goutte est proportionnelle au temps t de son vol, à la pression de vapeur en saturation s , et à la vitesse du vent V et inversement proportionnelle au carré du diamètre de la goutte d .

II.7.2. Technique d'estimation des pertes par évaporation et entraînement en irrigation par aspersion (Eev+v)

On peut estimer les pertes par évaporation et entraînement par des plusieurs méthodes :

A. Méthodes expérimentales

- Méthode des débits

En l'absence de moyens de calcul adéquats, la plupart de évaluations des pertes en aspersion pour différents installations, sont faites à partir d'un échantillonnage des volumes apportés en différents points d'une parcelle au moyen de pluviométries pour les tests réalisés avec des boîtes de capture, les pertes varient de 2 à 40 % (principalement de 10 à 40 %) [34, 35,36]. Les pertes par évaporation et entraînement sont estimées comme étant la différence entre la quantité d'eau évacuée par aspersion et la quantité d'eau recueillie par les boîtes de capture (pluviomètres). dans le cas des tests de laboratoire, les pertes ont varié de 0,5 à 2 % [34]. Les pertes par évaporation et par entraînement réelles (Eev+v (%)) sont déterminées par la formule suivante :

$$E_{ev+v} = \frac{(Q_a - Q_p) * 100}{Q_a} \quad (\text{II.10})$$

Avec :

Eev+v : Les pertes par évaporation et par entraînement (en %)

Qa : Débit de l'asperseur (en l/h) ;

Qp : Débit des pluviomètres (en l/h) ;

- Méthode basée sur la concentration des ions de chlorure

Pour pouvoir séparer ces deux composantes de pertes, Frank E. Robinson (1973) [37] et McLean et al (2000) [38]. Ont utilisé une méthode se basant sur la mesure de la conductivité électrique (CE) de l'eau récupérée dans les collecteurs (concentration trace). Une eau d'irrigation présente initialement une faible salinité ; pendant le vol des dans l'atmosphère, leur volume est réduit par évaporation, ce qui augmente la concentration de cette eau et par conséquent sa CE.

En comparant la CE de l'eau appliquée à la sortie de la buse à celle récupérée dans les collecteurs, on peut estimer le pourcentage des pertes d'eau par évaporation seule (selon McLean et al (2000) [38]. Par la formule suivante :

$$E(\%) = \frac{(CEs - CEc) * 100}{CEs} \% \quad (II.11)$$

Ou :

CEs : Concentration des ions de chlorure de la source.

CEc : Concentration des ions de chlorure de l'eau récupérée dans les boîtes de captures.

- méthode de calcul de l'humidité du sol avant et après irrigation [39]

- méthode des indicateurs réactifs. [39]

II.7.3. Etudes antérieures de détermination des pertes par évaporation et entrainement :

III.7.3.1. Détermination des pertes par évaporation et entrainement :

L'étude de pertes par évaporation et entrainement pendant l'application de l'eau au moyen de l'irrigation par aspersion a été rapportée dans plusieurs études. Quand ces études ne sont pas définies dans les mêmes conditions, les résultats obtenus varient beaucoup.

Yazar (1984) a trouvé, avec cette même méthode, par des séries d'expériences menées au Nebraska (conditions arides) que les pertes par évaporation représentent un pourcentage qui varie entre 1,5 et 16,8% du volume total appliqué par l'arroseur. Il a conclu que le vent et le déficit de pression de vapeur sont les facteurs influant le plus significativement sur l'évaporation. En effet, la lame d'eau libre sur le couvert végétal tempéré le microclimat en s'évaporant ce qui fait augmenter les pertes globales du couvert (Steiner et al.1983).il a établi la relation suivant

$$E_{ev} + v = 0,003 \exp(0,2V)(e_s - e_0)^{0,59} * T^{0,23} * P^{0,76} + 0,27 * V^{2,15} \quad (II.12)$$

De même Sapounkov en région aride de Stavropol est arrivé à définir des relations spécifiques pour chaque type de technique d'aspersion dont :

Sapounkov proposé une relation en fonction de l'indicateur complexe d'intensité climatique (Φ) définie par V. Ye Khabarov (in V.V. Slyusarenkov [40]) qui relie des paramètres climatiques :

$$E_{ev} + v = a \Phi^b \quad (II.13)$$

$E_{ev}+v$: les pertes par évaporation et entrainement par vent en pourcentage de volume;

a et b- sont des coefficients en fonction des zones géographique.

Φ : indicateur complexe d'intensité climatique; il évalué par la formule suivante:

$$\phi = T (V + 1) (1 - 0.01.H) \quad (II.14)$$

Le tableau (II.5) indique les valeurs des pertes par évaporation et par entrainement du vent pour les machines d'aspersion suivants :

Tableau (II.5) : valeurs des pertes par évaporation et par entrainement du vent pour différents machines d'aspersion (recherche de l'institut d'hydrotechnique et de mises en valeurs de Stavropol)

| Type de machine d'aspersion | La formule de calcule | Coefficient d'intensification des facteurs météorologiques | | | | | | |
|---------------------------------|----------------------------------|--|------|------|------|------|------|------|
| | | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 | 140 |
| Pivot 451-100 | $E_{ev} + v = 0,206 \phi^{0,81}$ | 2,4 | 4,1 | 5,7 | 7,2 | 8,7 | 10,1 | 11,4 |
| Pivot 454-70 | $E_{ev} + v = 0,51\phi^{0,65}$ | 3,6 | 5,7 | 7,4 | 8 | 10,3 | 11,6 | 12,9 |
| Rampe à déplacement frontale 64 | $E_{ev} + v = 2,26 \phi^{0,54}$ | 11,4 | 16,6 | 20,6 | 24,1 | 27,2 | 30 | 32,6 |
| Rampe tracté 100 MA | $E_{ev} + v = 0,35 \phi^{0,82}$ | 4,1 | 7,2 | 10 | 12,7 | 15,9 | 17,7 | 20,1 |
| Asperseur à grand porté | $E_{ev} + v = 8,75 \phi^{0,22}$ | 16,9 | 19,7 | 21,5 | 22,9 | 24,1 | 25,1 | 26 |

Dechmi (2003) [41], L'expérience a été réalisée à la ferme expérimentale du Service de recherche agricole du gouvernement d'Aragoñ à Saragosse, Espagne. Le climat est méditerranéen semi-aride, La valeur moyenne des pertes par évaporation de l'eau était de 6 à 39,6 % du volume d'eau appliqué au condition de vent entre 0,6 à 6,5 m/s.il a arrivé d'établie la relation suivant :

$$E_{ev} + v = 5,287 * V + 7,479 \quad (II.15)$$

Tarjuelo (1999) [42], en condition semi-aride en Albacete Espagne, il a étudié des pertes par évaporation et entrainement en irrigation par des asperseur, il a trouvé des pertes de 0,95 à

29,41 %, à des températures de 7,84 à 32,53 C°, humidité de 22,3 à 99,9 et déficit de pression de 0 à 3,81 kpa et la vitesse du vent allant de 0,63 à 9,87 m/s. a déterminé les pertes par évaporation et entrainement par la relation suivante :

$$E_{ev} + v = 0,007Ps + 7,38 (es - eo)^{0,5} + 0,844 * V \quad (II.16)$$

Cette idée que les pertes par évaporation et entrainement en irrigation par aspersion ne constituent pas des pertes effectives ont été avancées par certains auteurs, qui supposent qu'elle permet de diminuer la demande évaporatoire au niveau du couvert végétal [43] ; ceci été mis en doute récemment par playan et al (2004) [44] qui ont pu mesurer des pertes par évaporation allant de 8.5% la nuit à 15.4% le jour (conditions climatiques semi arides de Zaragoza en Espagne) et les pertes par entrainement par vent étaient estimées de 9,8% le jour et de 5 % pendant la nuit. la formule suivante détermine les pertes par évaporation et entrainement :

$$E_{ev} + v = 20,3 + 0,214 * V^2 - 2,29 * 10^3 H^2 \quad (II.17)$$

étude a été réalisée dans une zone expérimentale de la département d'ingénierie (DEG) de l'Université fédérale de Lavras (UFLA), MG Lavras, Le climat de la région est subtropical à tempéré, par Beskow (2011)[45], un système d'irrigation a été utilisé pour pulvérisation conventionnelle de deux manières avec un asperseur simple et avec quatre asperseurs en fonctionnant à des pressions de 245, 294 et 343 kPa. il a obtenu des pertes totales allant de 10 à 60 %. la valeur des pertes par évaporation et entrainement est exprimé par la relation suivantes :

$$E_{ev} + v = 0,00862 * Ps + 28,5454 * (es - eo)^{0,5} + 3,4335 * V \quad (II.18)$$

Yacoubi (2012) [46], Les essais ont été réalisés à la station expérimentale de INRGREF dans la basse vallée de la Medjerda dans le nord-est de la Tunisie. La région se caractérise par un climat semi-aride méditerranéen avec un hiver doux et des températures chaudes et été sec.

Perte d'eau d'évaporation et par entrainement représentaient 10,3-45,5%. La température de l'air de 27,2 à 35,4 C° ~ humidité relative est comprise entre 28,4 à 66,3%, le déficit de pression de 1,4 à 4,1 m / s. à la pression de 2 bar. il a déterminé les pertes par évaporation et entrainement par la formule suivante :

$$E_{ev} + v = 3,309 * V - 0,369 * H + 0,889(es - ea) - 0,533 * T + 45,841 \quad (II.19)$$

Hermesmeier (1973) [30], dans les conditions de l'impérial Vallée (Californie) en été, a trouvé que l'évaporation mesurée à partir de la variation de CE sur des jets des arroseurs, peut varier

de 0 à 50 % .IL a travaillé sur des périodes d'arrosage courtes et il a trouvé que l'évaporation est de 3 à 4 fois plus importante pour l'irrigation en périodes diurnes qu'en périodes nocturnes. Il a trouvé en outre que la température de l'air et l'intensité d'application de l'eau (pluviométrie, mm/h) sont les facteurs qui expliquent mieux statiquement l'évaporation des arroseurs, mieux en tout cas que la vitesse du vent ou l'humidité relative.

Spurgeon et al. (1983) [47] Ont trouvé que dans des conditions de haute température, d'air sec et en présence de vent, l'évaporation dans une installation d'irrigation par aspersion peut atteindre 30% du volume total appliqué. Conjointement et sous des conditions climatiques aussi hautement évaporant, des mesures réalisées par Steiner et al. (1983) [48] au moyen de pluviomètres, ont abouti à des valeurs de pertes totales d'environ 15%. En temps d'arrosage, la création d'une ambiance humide limite l'évapotranspiration du couvert végétal mouillé [49].

Selon l'expérience acquise en Australie, avec des sociétés à investissement moyen buses (diamètre 6,3 mm, pression 21 m), perte d'eau d'évaporation représentaient 0,4-2,7%. La température de l'air à cette fluctuation de 17 à 31 ° C ~ humidité relative est comprise entre 20 à 59% de la vitesse de vent 0-1,35 m / s.

En Arizona (US) sous différents climats ! et dans les conditions opérationnelles du bilo, plus de 700 piquets étaient par définition tenus ! Par perte d'eau va évaporation à partir d'un jet de différents diamètres de l'appareil. Comme ces recherches l'ont montré, les pertes d'eau pour l'évaporation du jet allaient de 0,4 à 3% et atteignaient 5,7% dans des conditions extrêmement défavorables.

L'eau d'évaporation dans l'air a également été étudiée dans la steppe de Golodnaya (ferme d'État "Farhad") par irrigation au moyen d'un arroseur à jet court. KDU-55. La valeur moyenne des pertes par évaporation de l'eau était de 3,75. 4,2% du volume d'eau appliqué.

III.7.3.2. Détermination des pertes par évaporation :

A- Par la méthode de Fedorenko [33]

Fedorenko I.D utilisant et améliorant les résultats de Zack E.G est arrivé à la relation suivante :

$$E_{ev} = 100 \left[1 - \left(1 - \frac{es.t(1+1.92V)}{10584.d^2} \right) \right] \quad (II.20)$$

Avec :

e_s : déficit de pression saturé (mm)

t : temps de parcours de la gouttelette(s) ;

v : la vitesse de vent (m/s) ;

d : diamètre de la gouttelette(m).

B- Détermination des pertes par évaporation par un nomogramme d'évaporation d'un arrosage (de Frost et Schwalen,1955)

De nombreuses études des pertes par évaporation au cours de l'irrigation par aspersion ont été menées, et certains sont cités comme des références à cette publication. L'ancien travail extensif a été fait par Frost et Schwalen (1955,1960), en Arizona. Dans leur article en 1960, Frost et Schwalen ont résumé les résultats de 700 essais sur le terrain mené en vertu d'une variété de conditions climatiques. Ils ont développé un nomogramme (il a été publié dans plusieurs manuels d'irrigation qui permet à l'utilisateur d'estimer le pourcentage des pertes par évaporation au cours l'irrigation par aspersion en fonction des caractéristiques de l'arroseur, la pression de fonctionnement, et les facteurs climatiques. Ils ont conclu que les pertes par évaporation pourraient être estimées avec précision en utilisant trois facteurs climatiques : température de l'air, l'humidité relative et la vitesse du vent. (Figure (II.4))

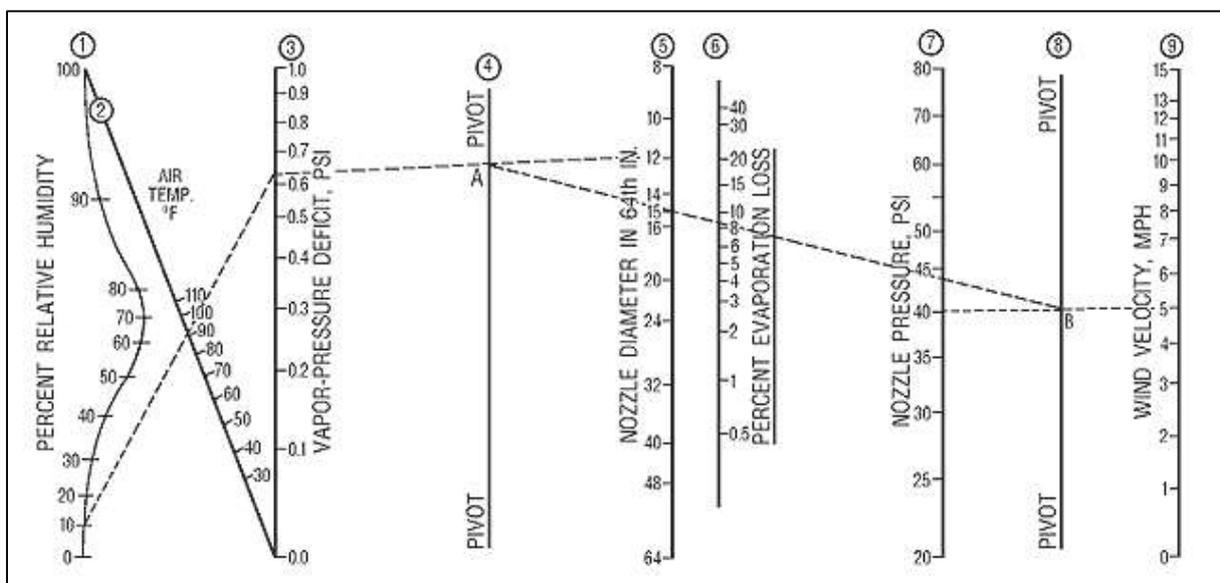


Figure (II.4). Nomogramme d'évaporation d'un arrosage (de Frost et Schwalen, 1955) [24]

C- Détermination des pertes par évaporation par la méthode de Danil tchenko N.V 1983 :

Dans le processus de déterminer les pertes par évaporation, Danietchenko a constaté des résultats pour les régions arides en fonction d'un coefficient d'évaporation E_{ev} (%), il peut être déterminé par la formule suivante :

$$E_{ev} = \frac{0.71T(es - ea)(1 + 0.21V)}{es} \quad (II.21)$$

E_{ev} : les pertes par évaporation en % en volume d'eau sorti des appareils d'aspersion ;

T : la température de l'air en C° ;

V : la vitesse de vent en m / S ;

$(es - ea)$: le déficit de pression de vapeur en mb ;

es : le déficit de pression de vapeur saturée correspondante à la température de l'air en mb ;

Danieltchenko N.V [21] a déterminé les pertes par évaporation réelles par la formule suivante :

Pour un seul asperseur :

$$E_{ev} = 1 + 0.01E_0 ; \quad (II.22)$$

Pour une couverture intégrale en aspersion et pour les conditions de climat aride de Kazakhstan de sud pendant la période de demande maximale en eau d'irrigation, a déterminé les pertes par évaporation réelles par les formules suivantes :

$$E_j = 1 + 0.014E_0, \text{ pour le jour ;} \quad (II.23)$$

$$E_n = 1 + 0.006E_0, \text{ pour la nuit ;} \quad (II.24)$$

D- Détermination des pertes par évaporation par la méthode de Yazar : [34]

Yazar (1984) a déterminé quantitativement les pertes par évaporation dans diverses conditions de fonctionnement. Ces pertes ont été déterminées par une méthode de conductivité électrique. Il a été constaté que la vitesse du vent et le déficit de pression de vapeur étaient les facteurs les plus importants affectant les pertes par évaporation. Une relation exponentielle entre les pertes par évaporation et la vitesse du vent et le déficit de pression de vapeur ont été déterminées. Ceci est montré ci-dessous :

$$E_{ev} = 0.389 \exp(V^{0.18}) (es - eo)^{0.7} \quad (II.25)$$

Où : E est le pourcentage de débit évacué perdu à l'évaporation ; W est la vitesse du vent à 2 m (m / s) et (es - eo) le déficit de pression de vapeur (kPa).

E- Détermination des pertes par évaporation par la méthode de Bavi :

Bavi et. al (2009) [50] a utilisé la méthode de la boîte de capture pour mesurer les pertes par évaporation d'un système d'irrigation par aspersion dans diverses conditions climatiques. Comme dans la recherche de Yazar, il a également été constaté que le déficit de pression de vapeur de la vitesse du vent était le facteur le plus important affectant les pertes par évaporation. Dans cet article, l'équation statistique suivante a été établie, exprimant les pertes par évaporation en fonction de la vitesse du vent et du déficit de pression de vapeur.

$$E_{ev} = 4.337 * \exp(0.077V) * (es - eo)^{-0.098} \quad (II.26)$$

II.8. Réduction des pertes par évaporation et entraînement :

Plusieurs facteurs contribuent aux pertes d'eau à partir d'un arroseur que ce soit par évaporation ou par entraînement :

- les facteurs liés à la nature de l'équipement (diamètre de la buse ...), les conditions hydrauliques de fonctionnement (la pression, le débit...).
- les facteurs climatiques : la température de l'air, l'humidité relative de l'air et la vitesse de vent.

L'optimisation du degré de pulvérisation est un moyen important de réduire les pertes d'eau par évaporation et d'entraînement par le vent. On sait qu'avec une augmentation de la pression de l'eau avant l'arroseur, la taille des gouttes de la pluie formée diminue et, avec une très grande pression, de la poussière d'eau peut se former avec des gouttelettes d'un diamètre de 0,05 à 0,2 mm qui, lorsqu'elles se déposent, sont entraînées par le vent sur une distance considérable, et s'évapore pratiquement. À cet égard, il est nécessaire d'optimiser le degré de pulvérisation par pulvérisation à des valeurs de 0,5 ~ 1,0 mm, ce qui réduira considérablement la perte d'eau due au vent et à réduire les effets de la pluie sur le sol et les cultures. [39]

Pour une pulvérisation optimale, la tête de l'asperseur doit avoir un certain diamètre de buse et être équipée d'un adaptateur de réglage avec un orifice calibré de la taille requise.

Selon les calculs, I.D. Fedorenko, à une vitesse de vent de 3 m / s à une hauteur de 4 m, la température de l'air est de 30 ° C et le déficit de vapeur est de 60% lorsque la chute tombe

avec un diamètre de 0,5 mm, les pertes par évaporation sont de 10% et d'une hauteur de 12 à 20%.

Avec une augmentation de la température de l'air jusqu'à 40 ° C et un manque de pression de vapeur jusqu'à 70% de perte d'eau par évaporation pour une gouttelette d'un diamètre de 0,5 mm tombant des hauteurs de 4 et 12 m seront respectivement de 20 et 38% [51].

Parmi les variables du système d'irrigation par aspersion, la buse et le diamètre de la goutte ont un effet significatif sur E_{ev+v} . Un grand diamètre de buse se traduit par de gros diamètres de goutte [52]. Les grosses gouttes résistent mieux à la dérive et présentent moins de surface par unité de masse, par conséquent, ils sont moins affectés par E_{ev+v} . Une augmentation de la pression de fonctionnement entraîne une diminution des diamètres de goutte [53,54], avec une augmentation d' E_{ev+v} . L'augmentation de l'élévation des buses à la surface du sol augmenterait le E_{ev+v} , en raison d'une trajectoire de chute plus longue et d'une exposition accrue au vent [42] Ainsi l'irrigation de jour et de nuit influe sur E_{ev+v} [44].

Conclusion

L'étude de pertes par évaporation et entrainement en irrigation par aspersion est nécessaire pour corriger les doses d'arrosage données aux cultures afin d'obtenir une efficacité maximale et atteindre le rendement prévu.

Pour les régions arides les travaux de recherche dans le domaine ont montré que les pertes d'eau par évaporation et entrainement sont de l'ordre de 2% à 40%

Plusieurs études sont faites pour l'estimation des pertes par évaporation et entrainement pour un ensemble des arroseurs, ils ont montré que sont essentiellement provoquées par des facteurs climatiques tels que la température de l'air et la vitesse de vent élevées et l'humidité de l'air...), ces études ont permis d'établir des formulations dans plusieurs régions du monde et chacune d'elles est adéquat dans les conditions climatiques bien déterminés.

CHAPITRE III :
MATERIELS ET METHODES

Chapitre III. MATERIELS ET METHODES

III .1. Matériels

L'étude d'efficience des performances des systèmes d'irrigation par aspersion est définie par le taux des pertes par évaporation et par entrainement. Ce travail est fondé sur un essai qui sert à déterminer l'apport d'eau optimale par l'irrigation en tenant compte la perte par évaporation et dérive du vent et l'uniformité de distribution.

III.1.1 Cadre de l'étude

III.1.1. 1 Situation géographique et climat de la zone d'étude

L'expérimentation a été menée à la station expérimentale Sidi Mahdi Touggourt de L'INRAA (Latitude :33°.04.293' Longitude :006°.05.788' E) située à 7 Km au sud-est de Touggourt sur le plateau oriental de l'Oued-Righ.

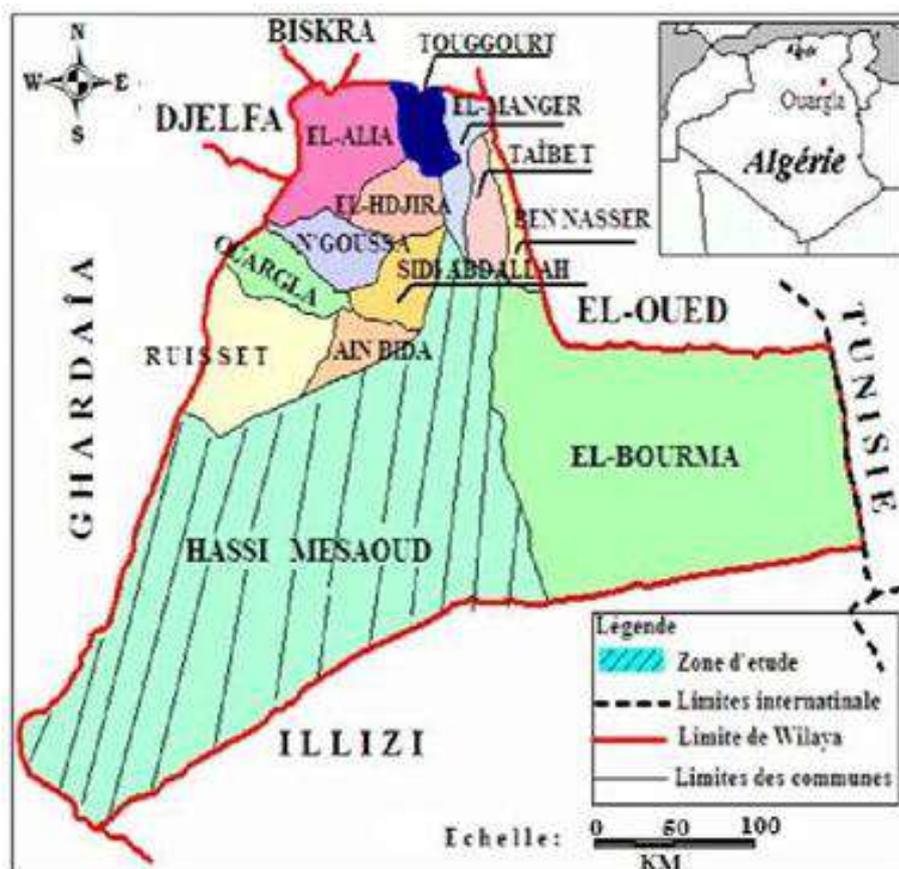


Figure (III.1). Situation géographique de Touggourt. [55]



Figure (III.2). Photo de la parcelle d'expérimentation (Google Earth)

Le climat de Sidi Mehdi est du type Saharien caractérisé par des températures avoisinant les 45°C durant l'été, des précipitations rares irrégulières inférieures à 70 mm/an,

Les valeurs de l'ETP moyennes mensuelles de la zone d'étude sont très élevées, allant de 67.83 mm pour le mois de décembre jusqu'à 301.3 mm pour le mois de juillet. Ces Valeurs élevées sont importantes par rapport aux valeurs de précipitations ce qui traduit la nécessité de l'irrigation.

III.1.1.2. Equipements utilisés :

L'essai a été conduit sur deux parcelles ayant une superficie de 0,5184 ha, 0,2592 ha respectivement, et équipé par un système d'aspersion classique en couverture, le dispositif à 4 rampes pour la première parcelle et 2 rampes pour la deuxième parcelle, et 4 asperseurs chaque rampe (voir figure 3), L'eau est mise sous pression par une électropompe à axe vertical, la pression de fonctionnement à environ 2 bars, Les asperseur utilisées sont de la marque RS130, équipés par double buses(4,4 mm, 2,4 mm)de diamètre ,situées à une hauteur de 0,75 m par rapport à la surface du sol..



Figure (III.3). Photo de la parcelle d'expérimentation

Les expérimentations ont été déroulées pendant deux années, première année l'écartement appliqué 18 m x 18 m, et 12 m x 18 m pour la deuxième année.

III.1.1.3. Les appareils de mesure des paramètres météorologiques

Les paramètres climatiques sont fournis pendant la période d'expérimentation par une station météorologique conventionnelle installée près du champ., la température de l'air est mesurée par un thermomètre à mercure (Schneider) (figure 4), et l'humidité relative par un psychromètre

a) Mesure de la température

La température de l'air est mesurée par un thermomètre à mercure marque Schneider .

b) Mesure de l'humidité relative de l'air

L'humidité relative de l'air est mesurée en utilisant un tableau psychrométrique indiqué dans l'annexe 1, après mesure de la température sèche et la température humide.

NB : les appareils de mesure de la température de l'air et de l'humidité relative de l'air sont installés dans l'abri météorologique (figure 4). Il est du type « anglais », sa base étant à 1,50 m du sol. Ce type d'abri, à doubles persiennes protège très bien du rayonnement, mais par contre sa ventilation est mal assurée, ce qui peut influencer les mesures instantanées, en augmentant l'inertie de la masse d'air contenue dans l'abri [56].



Figure (III.4) : Abri météorologique

c) Mesure de la vitesse du vent :

La vitesse du vent est mesurée à 2 m de hauteur par un anémomètre totalisateur, marque Thies CLIMA.



Figure (III.5) : Anémomètre

III.1.1.4. Caractéristique de l'asperseur :

Les mesures de débit d'un asperseur sur plusieurs valeurs de pression, sont résumées dans la relation suivante :

$$Q = 0.2288 H^{0.9506} \quad (\text{III.1})$$

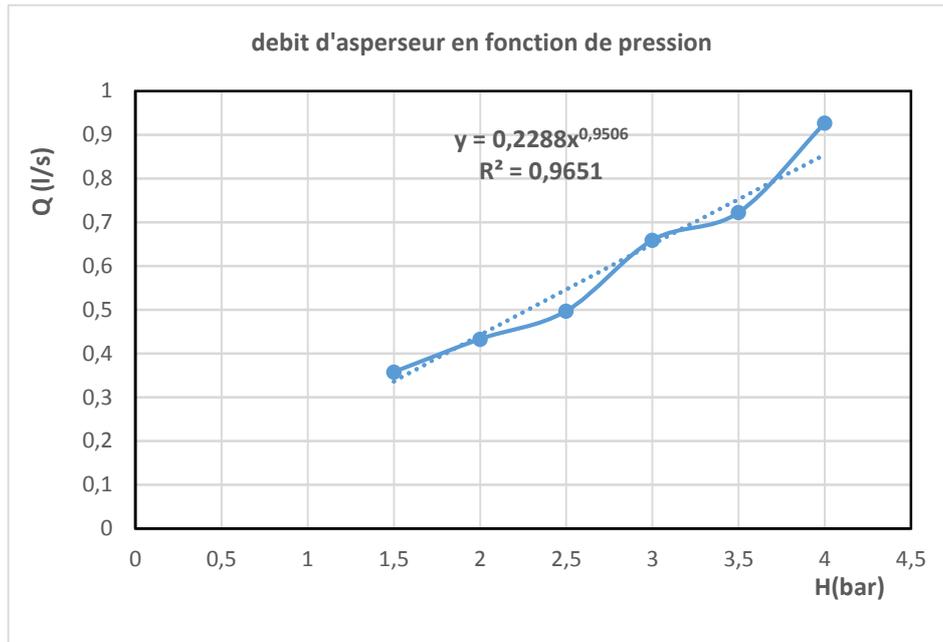


Figure (III.6) : Relation entre le débit de l'asperseur et la pression

III.1.1.5. Caractérisation du sol :

III.1.1.5.1. Analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique permet de déterminer et d'observer les différents diamètres de grains qui constituent un granulat. Pour cela l'analyse consiste à séparer et classer à l'aide de tamis ces grains selon leur diamètre. Les grains ainsi isolés peuvent être pesés pour déterminer la proportion de chacun dans le granulat. La représentation graphique de l'analyse permet d'observer et d'exploiter ces informations très simplement. Les manipulations et les conditions de manipulation sont décrites par la norme NF P 18-560. Elle concerne les granulats d'un diamètre supérieur à 100 micromètres (0.001 mm).

Le refus désigne la partie des grains retenue dans un tamis. Le refus cumulé représente tous les grains bloqués jusqu'au tamis considéré (les grains du tamis considéré plus les grains bloqués dans les tamis de mailles supérieures).

Tableau (II.1) : Granulométrie de sol de la région d'étude

| Profondeur de sol (cm) | Granulométrie(%) | | | |
|------------------------|------------------|-------|-----------|----------------|
| | argile | limon | Sable fin | Sable grossier |
| 0-20 | 0 | 16 | 38 | 46 |
| 20-40 | 2 | 12 | 42 | 44 |
| 40-60 | 0 | 0 | 49 | 51 |
| 60-80 | 0 | 2 | 53 | 45 |
| 80-100 | 0 | 5 | 53 | 42 |

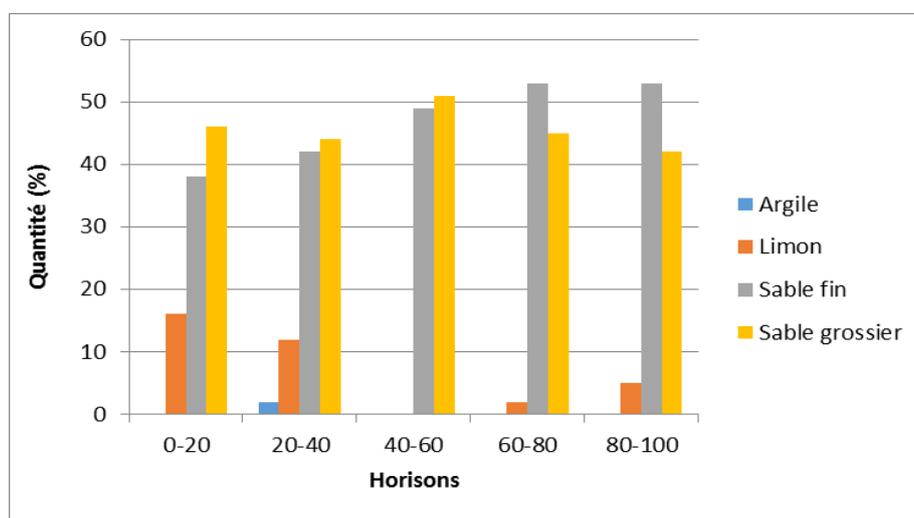


Figure (III.7) : Granulométrie du sol de la région d'étude

Le sol de site expérimental est sableux, le taux d'argile et limon ne dépasse pas 16 %.

III.1.1.5.2. Humidités à la capacité au champ et au point de flétrissement et la densité apparente :

Les expériences ont été réalisées au laboratoire de CRSTRA Touggourt, la teneur en eau à la capacité au champ varie de 19.007 % à 24.38 % et celle au point de flétrissement prennent des valeurs entre 13.71% et 17.92% en allant vers la profondeur. La réserve utile est donc égale à 98.25 mm/m en moyenne.

Tableau (III.2) : Teneur en eau volumique à la capacité au champ (H cc) et au point de flétrissement (H pf) et la densité apparente :

| Profondeur (cm) | Hcc (% vol) | Hpf (% vol) | RU (mm) | Da |
|-----------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
| 0-20 | 19,007 | 13,71 | 15,57 | 1,47 |
| 20-40 | 19,951 | 14,02 | 18,1 | 1,53 |
| 40-60 | 24,02 | 17,08 | 20,12 | 1,45 |
| 60-80 | 21,867 | 14,78 | 23,1 | 1,63 |
| 80-100 | 24,38 | 17,92 | 21,32 | 1,65 |
| Moyenne | 21,84 | 15,5 | 19,65 | 1,55 |

III.1.1.6 Caractérisation du l'eau d'irrigation :

Les eaux d'irrigation utilisées proviennent essentiellement d'aquifère appelé complexe terminal ou Miopliocène, profondeur est moins de 100 m, la température de l'eau T=25°C, la salinité égale à 4.27 g/l.

Analyse physicochimique présentée au tableau suivant :

Tableau (III.3) : Caractéristique de l'eau d'irrigation

| | | Cations mg /l | | | | Anions mg/l | | |
|---------|-----------|-----------------|----------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Elément | CE (ds/m) | Na ⁺ | K ⁺ | Ca ⁺⁺ | Mg ⁺⁺ | cl ⁻ | SO ₄ ⁻⁻ | HCO ₃ ⁻ |
| Valeur | 7.36 | 26.08 | 0.8 | 22 | 12.2 | 58.5 | 5.66 | 4 |

III.2 Méthodes

Le protocole expérimental comprend la détermination des paramètres suivants :

- ✓ Appréciation de l'intensité pluviométrique ;
- ✓ Évaluation des pertes totales (par évaporation et par entrainement du vent) ;
- ✓ Évaluation des pertes par entrainement du vent ;
- ✓ Évaluation des pertes d'eau du sol pendant 1 heure après l'irrigation ;
- ✓ Prélèvement des paramètres climatiques.
- ✓ Suivi de développement de la culture (Luzerne)

III.2.1. Appréciation de l'intensité pluviométrique

La répartition de l'eau sous les asperseurs a été évaluée en recueillant les hauteurs d'eau appliquées dans des captures disposées suivant une grille de 4 m à 4,5 m de distance d'après la norme ISO 11545 [57], voir Figure (III.8) et Figure (III.9).

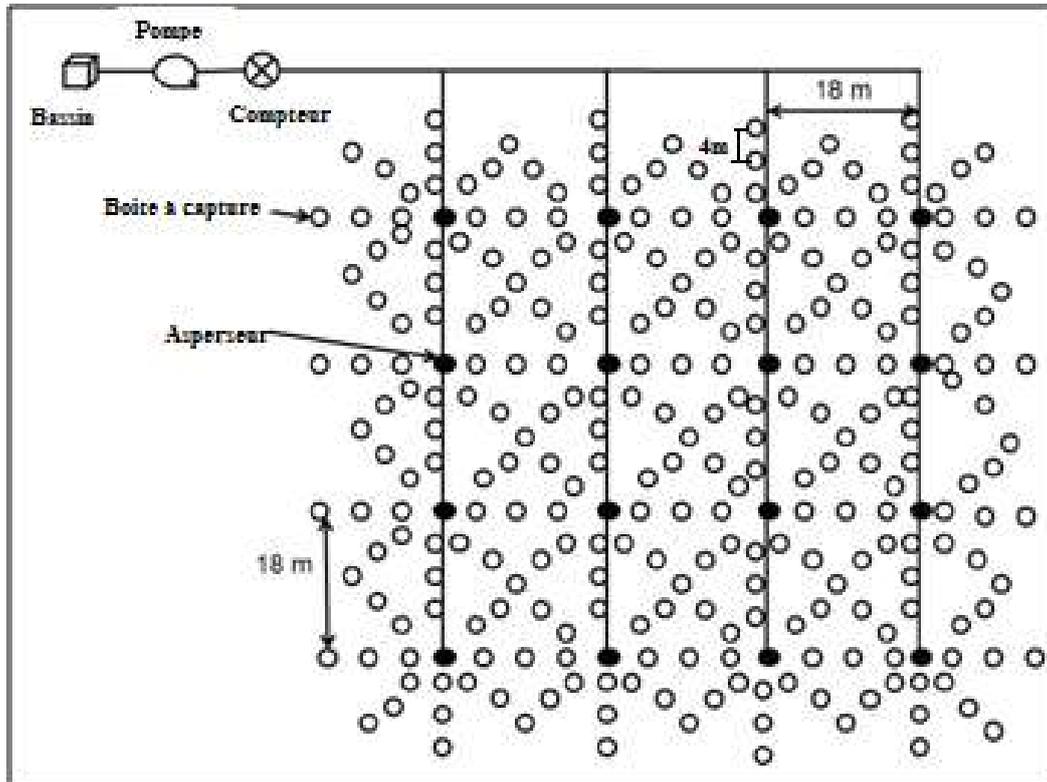


Figure (III.8). Schéma expérimental de Bloc A

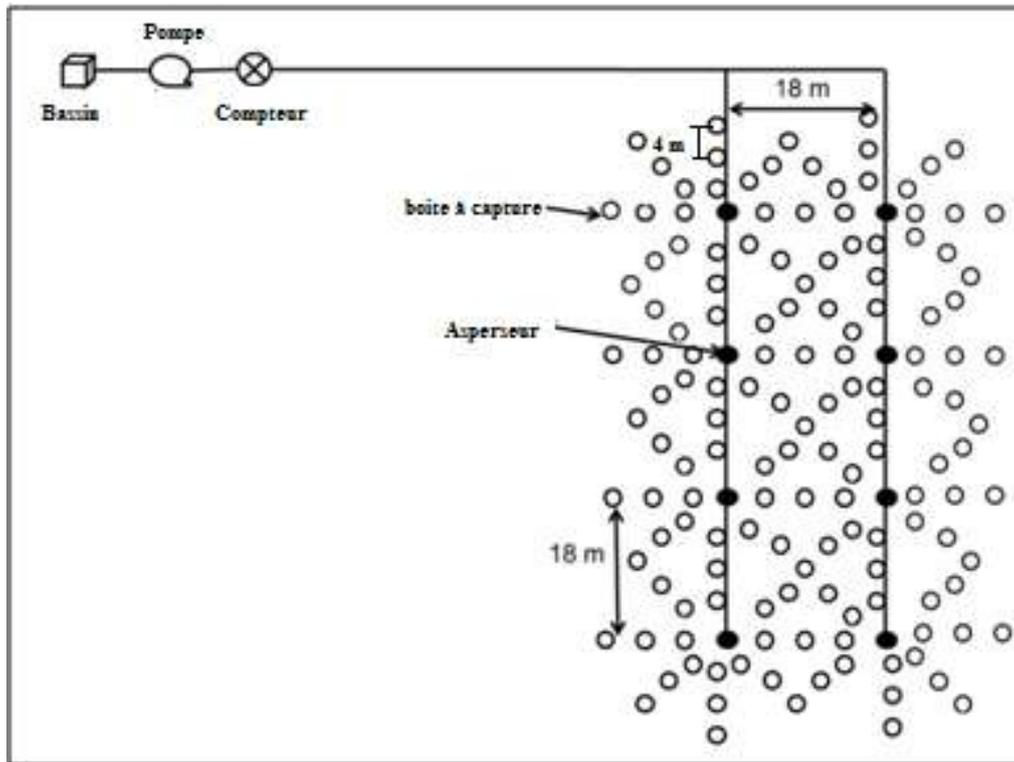


Figure (III.9). Schéma expérimental de Bloc B

Pour apprécier la répartition pluviométrique, 273 boîtes de captures identiques ont été utilisées pour la parcelle de 4 rampes et 145 boîtes de captures pour la parcelle de 2 rampes, ayant chacune un diamètre de 10 cm et une hauteur de 20 cm.

III.2.2. Evaluation des pertes par évaporation et entrainement

Les pertes par évaporation et par entrainement ont été déterminées par la méthode des boîtes à capture par la relation suivante :

$$E_{ev+v}(\%) = \frac{Q_a - Q_p}{Q_a} \cdot 100\% \quad (III.2)$$

$E_{ev+v}(\%)$ - pertes par évaporation et entrainement en pourcentage du débit d'arrosage ;

Q_a - débit de l'arroseur (m^3/h) ;

Q_p - débit des pluviomètres (m^3/h)

III.2.2.1. Détermination le débit des asperseurs :

Le débit des asperseurs est déterminé au moyen d'un compteur (installé au début du réseau d'irrigation) et le temps d'irrigation. Il est calculé par la relation suivante :

$$Q_a = \frac{V_f - V_i}{t} \quad (\text{III.3})$$

Q_a = Débit total des arroseurs ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)

V_f = Lecture final de compteur (m^3)

V_i = Lecture initial de compteur (m^3)

t = Temps d'irrigation (h)

III.2.2.2. Détermination le débit des pluviomètres

Les volumes recueillis dans les pluviomètres ont été mesurés à l'aide d'une éprouvette graduée de 250 ml. Ces volumes permettent de déterminer les valeurs des hauteurs d'eau ou les doses d'irrigation par la relation suivante :

$$h_i = \frac{10V_i}{S} \quad (\text{III.4})$$

h_i - hauteur d'eau au niveau du pluviomètre (mm)

V_i - volume recueilli dans le pluviomètre (cm^3);

S - surface du pluviomètre (cm^2)

La hauteur moyenne ou la dose d'irrigation moyenne est calculée par :

$$h_m = \frac{\sum h_i}{n} \quad (\text{III.5})$$

n - nombre de pluviomètre. Pour la première parcelle et 145 pour la deuxième.

Les débits moyens de l'ensemble des pluviomètres sont calculés à partir de la formule suivante :

$$Q = \frac{h_m \cdot S_a}{1000 \cdot t} \quad (\text{m}^3 / \text{h}) \quad (\text{III.6})$$

h_{im} : dose moyenne d'arrosage de l'ensemble d'arroseurs (mm) ;

t : temps d'arrosage.

S_a : surface occupée par les pluviomètres (m^2) ;

$$S = a \cdot E \cdot D \quad (\text{m}^2) \quad (\text{III.7})$$

a : nombre d'asperseurs,

E : écartement entre les asperseurs.

D : espacement entre les rampes

II.2.3. Évaluation des pertes par entrainement du vent :

Pour évaluer le volume d'eau évacuée hors la limite de la parcelle, on a mis des cadres de (1m x 2m) couvert avec plastique, et sous les cadres il 'y a des collecteurs de (0,2m x 0,1m x 1 m) pour recueillir l'eau captée. Figure (III.10) illustre cela.



Figure (III.10). Schéma d'un capteur d'eau précipité hors la parcelle

La quantité d'eau recueillie dans les collecteurs multipliés par la longueur de la parcelle pour obtenir la quantité d'eau approximative sortant hors la parcelle.

III.2.4. Evaluation des pertes d'eau de la couche superficielle du sol(Esol) :

Les pertes d'eau de la couche superficielle du sol pendant une heure après l'irrigation, ont été évaluées par des mesures de l'humidité gravimétriques sur une profondeur entre 10 à 20 cm, juste et après une heure à la fin d'irrigation , on a choisi 17 points de mesure dans la parcelle de 4 rampes et 13 points de mesure dans la deuxième parcelle, la quantité d'eau perdue calculé

par la moyenne pondérée de la différence en humidité pendant une heure la quantité d'eau perdue est calculé par la formule suivante:

$$E_{sol} = D_a * h * \Delta H * S \quad (III.8)$$

Où :

E_{sol} : pertes d'eau de la couche superficielle (en m³)

h : profondeur du sol (en dm)

ΔH : la différence de l'humidité la fin et après une heure de l'irrigation (%).

D_a : la densité apparente.

S : la surface de la parcelle (en ha)

III.2.5. Prélèvement des paramètres climatiques :

Durant des mesures quotidiennes de l'intensité pluviométrique et l'humidité du sol, on prenait de la station météo les mesures journalières des paramètres météorologiques (Températures de l'air, l'humidité de l'air et la vitesse du vent).

III.2.6 Suivi de développement de la culture (Luzerne) :

A. Matériel végétal

Le matériel végétal est composé d'une variété d'orge,

B. Conduite d'essai

Le semis a été réalisé mécaniquement à l'aide d'un semoir le 13 décembre 2018 avec une densité de semis de 170 kg ha⁻¹. Concernant la fertilisation, la parcelle a été traitée par le NPK et UREE avec une dose de 150 kg.

C. Paramètres mesurés :

C.1. Détermination de la dose d'irrigation

La consommation en eau de la culture de l'orge a été calculé par le programme CROPWAT, version 8.0 pour Windows.

C.2. Composantes du rendement

On a choisi différents points de mesure à la parcelle en fonction de l'hétérogénéité de distribution de l'eau, pour objectif de connaître l'interaction entre la performance d'irrigation et le rendement.

III.3 Etude statistique

Les résultats obtenus ont été soumis à une analyse statistique, en utilisant le logiciel (SPSS 20.0).

III.3.1 Régression linéaires multiples (MLR)

Les régressions linéaires multiples (MLR) sont la méthode de statistique en régression utilisée pour analyser la relation entre une seule variable de réponse (variable dépendante) avec deux ou plusieurs variables contrôlées (indépendantes variables). Cette méthode a été choisie pour cette recherche car il y avait plus que des variables contrôlées.

Il y a eu quatre étapes générales pour créer un modèle de prévision dans la MLR. Les étapes générales vérifient hypothèses, sélectionner des méthodes appropriées de MLR, interpréter le résultat et développer l'équation de MLR.

Étape 1: vérification des hypothèses

La première étape consiste à créer un modèle de prévision en vérifiant les hypothèses de données. Il y a quatre hypothèses qui devraient Vérifiez quelles sont la normalité, la linéarité, l'hétéroscédasticité et la multi colinéarité.

Étape 2: Sélection de méthodes appropriées de régression linéaire multiple

➤ Méthode "Enter" :

Méthode qui introduit toutes les variables indépendantes simultanément, à utiliser si on veut déterminer l'équation de la droite de régression avec toutes les variables indépendantes.

➤ Méthode "Forward" :

Introduction d'une variable indépendante ` à la fois. L'ordre est déterminé en fonction de la corrélation avec la variable dépendante. S'il n'améliore pas le modèle significativement, elle est éliminée

➤ Méthode "Backward" :

On introduit toutes les variables On retire la variable indépendante la plus faible Si cela affaiblit significativement le modèle elle est réintroduite On répète la procédure jusqu' a ce que l'on n'a que les variables utiles

➤ Méthode “Stepwise” :

Les variables indépendantes sont introduites une à une. On teste si la nouvelle est significative, et on refait un test sur les autres. Les variables non significatives sont éliminées.

Étape 3 : interprétation de la sortie

À partir de la sortie SPSS, nous pouvons interpréter les valeurs du coefficient de Pearson, coefficient de détermination multiple (R^2), coefficient de corrélation multiple (R) et coefficient de détermination multiple ajusté (R^2 ajusté). Corrélation analyses est la méthode de régression utilisée pour déterminer dans quelle mesure la relation entre deux variables.

R^2 désigne la proportion de la variation totale des n valeurs observées de la variable dépendante expliquée par le modèle de régression global [58]. Le R^2 supérieur, mieux le modèle s'adapte à vos données. R est la racine carrée positive de R^2 [59].

R^2 ajusté est une mesure de la perte de puissance prédictive ou de la diminution de la régression. Le R^2 ajusté expliquera quelle variance du résultat serait prise en compte si le modèle avait été dérivé de la population de dont l'échantillon a été prélevé [60]. Le R^2 ajusté le plus grand, mieux le modèle correspond aux données.

Étape 4 : Développement d'une équation de régression linéaire multiple

Le modèle de régression multiple est une généralisation du modèle de régression simple lorsque les variables explicatives sont en nombre n . Nous supposons donc que les données collectées suivent le modèle suivant :

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n + \varepsilon \quad (\text{III.9})$$

Où

Y = Response variable

b_0 = Variable constante

b_i = Coefficient de la variable de contrôle, X_i $i = 1, \dots, n$

ε = Erreur

Les hypothèses qui ont utilisé :

H_0 : $b_1 = b_2 = \dots = b_n = 0$

H_1 : Au moins l'un des b_i n'est pas égal à 0

H_0 : Aucune des variables contrôlées X_i liée à Y

H_1 : Au moins une des variables contrôlées X_i est significativement liée à Y

III.3.2 Critères d'évaluation des performances du modèle

La perte par évaporation et entrainement par le vent (Eev+v) obtenu à partir du modèle basé sur les données et les études précédentes ont été évaluées en utilisant trois performances critères d'évaluation : coefficient de détermination (R^2) (Équation (III.10)), erreur quadratique moyenne (RMSE)(Équation (III.11)) et erreur absolue moyenne (MAE) (Équation (III.12)), [61] Ces critères peuvent être présentés comme:

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P}))^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (\text{III.10})$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} \quad (\text{III.11})$$

$$\text{MAE} = \left| \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{n} \right| \quad (\text{III.12})$$

Où :

O = valeurs observées; \bar{O} = moyenne des valeurs observées; P_i = valeurs estimées; \bar{P} = moyenne valeurs estimées; n = nombre des observations

Coefficient de détermination R^2 évalue le niveau de relation entre les valeurs observées et estimées, avec des valeurs proches de 1,0 montrant une bonne exécution du modèle [62], RMSE a l'avantage d'exprimer l'erreur en les mêmes unités que la variable, fournissant ainsi plus d'informations sur l'efficacité du modèle. Plus le RMSE est bas, plus la prédiction est précise. MAE Mesure l'amplitude moyenne des erreurs dans un ensemble de prévisions, sans compte tenu de leur direction. MAE va de 0 à ∞ , et les valeurs le plus bas c'est mieux [63].

III.3.3 La différence entre deux ou plusieurs groupes

Pour comparer entre deux groupes il faut d'abord étudier la distribution, Si les deux groupes à observer sont normalement distribués, on se servira du test de Student, Dans le cas où les distributions des groupes ne sont pas normales, on se servira du test de Wilcoxon.

En cas de plusieurs groupes, Dans le cas où les données suivent une distribution normale, on se servira alors de l'ANOVA, si le contraire on applique le *test* de Kruskal-Wallis. [64]

Conclusion

L'expérimentation a été menée à la station expérimentale Sidi Mahdi Touggourt de L'INRAA (Latitude :33°.04.293' Longitude :006°.05.788' E) située à 7 Km au sud-est de Touggourt sur le plateau oriental de l'Oued-Righ.

L'essai a été conduit sur deux parcelles ayant une superficie de 0,5184 ha, 0,2592 ha respectivement, et équipé par un système d'aspersion classique en couverture, le dispositif à 4 rampes pour la première parcelle et 2 rampes pour la deuxième parcelle,

Les sols de site expérimental sont sableux et la salinité des eaux d'irrigation égale à 4.27 g/l.

Le protocole expérimental comprend la détermination des paramètres suivants :

- ✓ Appréciation de l'intensité pluviométrique ;
- ✓ Évaluation des pertes totales (par évaporation et par entrainement du vent) ;
- ✓ Évaluation des pertes par entrainement du vent ;
- ✓ Évaluation des pertes d'eau du sol pendant 1 heure après l'irrigation ;
- ✓ Prélèvement des paramètres climatiques.
- ✓ Suivi de développement de la culture (Luzerne)



CHAPITRE IV :
Résultats et discussion

Chapitre IV. Résultats et discussion

IV.1 Introduction

Au cours de l'irrigation par aspersion, le volume d'eau donné par les asperseurs aux cultures va diminuer en fonction des pertes par évaporation des gouttes d'eau au cours leur parcours, et les pertes par entrainement de nuage de pluie par l'effet du vent, et de la première couche de 15 cm supérieur du sol après l'arrêt de l'irrigation Cette diminution de quantité d'eau affecte sur le rendement des cultures, pour cela, il faut estimer ces pertes pour donner la dose d'arrosage réelle.

IV.2 Résultats de débits des asperseurs, des intensités pluviométriques et des paramètres climatiques

Les débits qui fournis par la pompe Q_p , les intensités pluviométriques moyennes mesurées I_m et les paramètres climatiques durant toute l'expérimentation sont résumés aux tableaux 1 ; 2 ; 3 et 4. Dans les deux blocs, bloc A est la parcelle de 4 rampes et bloc B est la parcelle de 2 rampes.

Tableau (IV.1). Les mesures des débits des paramètres climatiques, température de l'air, humidité de l'air et vitesse du vent, et des valeurs de l'intensité pluviométriques de bloc A à l'espacement 18 m x 18 m

Tableau (IV.1). Mesures des débits des paramètres climatiques de bloc A (18 m x 18 m)

| Jours | T(c°) | H(%) | V(m/s) | $Q_p(m^3/h)$ | $I_m(mm/h)$ |
|------------|-------|-------|--------|--------------|-------------|
| 09/11/2017 | 15,86 | 38,33 | 1,24 | 21,86 | 2,98 |
| 22/11/2017 | 12,53 | 53 | 0,9 | 21,95 | 3,63 |
| 27/11/2017 | 14,4 | 49 | 0,77 | 21,74 | 2,95 |
| 05/12/2017 | 9,8 | 53,66 | 0,81 | 22,21 | 3,25 |
| 12/12/2017 | 14,66 | 42,33 | 1 | 22,23 | 3,23 |
| 19/12/2017 | 9,86 | 52,66 | 0,72 | 22,16 | 3,2 |
| 24/12/2017 | 11,46 | 55,33 | 0,71 | 22,33 | 3,27 |
| 02/01/2018 | 16,33 | 37,33 | 0,74 | 22,02 | 2,93 |
| 18/01/2018 | 14,33 | 41,33 | 1,73 | 22,27 | 3,14 |
| 21/01/2018 | 15,33 | 49,33 | 0,7 | 22,17 | 3,14 |
| 28/01/2018 | 13 | 45,33 | 2,18 | 22,13 | 3,22 |
| 12/02/2018 | 11,66 | 45,66 | 1,77 | 22,22 | 3,08 |

| | | | | | |
|------------|-------|-------|------|--------|------|
| 08/03/2018 | 20,26 | 43,16 | 1,43 | 22,026 | 3,1 |
| 12/03/2018 | 19,8 | 37,33 | 1,07 | 21,91 | 3,03 |
| 20/03/2018 | 20,2 | 28,66 | 2,6 | 19,34 | 2,45 |
| 27/03/2018 | 16,2 | 42 | 2,14 | 22,06 | 2,71 |
| 17/04/2018 | 23 | 36,3 | 3,29 | 22,53 | 2,44 |
| 25/04/2018 | 31,4 | 28,17 | 3,68 | 22,55 | 2,15 |
| 30/04/2018 | 28,5 | 33,5 | 2,51 | 22,3 | 2,41 |
| 07/05/2018 | 28 | 38,33 | 2,5 | 22,28 | 2,64 |
| 14/05/2018 | 25,6 | 42 | 2,73 | 22,18 | 2,64 |
| 21/05/2018 | 27,83 | 43,5 | 2,73 | 22,24 | 2,63 |
| 25/07/2018 | 36 | 33,33 | 2,49 | 23,03 | 2,63 |
| 30/07/2018 | 38,5 | 31 | 1,48 | 22,52 | 2,31 |
| 01/08/2018 | 36,66 | 32 | 2,73 | 22,74 | 2,74 |

Tableau (IV.2). Mesures des débits des paramètres climatiques, température de l'air, humidité de l'air et vitesse du vent, et des valeurs de l'intensité pluviométriques de bloc B à l'espacement 18 m x 18 m

Tableau (IV.2). Les mesures des débits des paramètres climatiques de bloc B

| Jours | T(c°) | H(%) | V(m/s) | Qp(m ³ /h) | Im(mm/h) |
|------------|-------|-------|--------|-----------------------|----------|
| 19/11/2017 | 14,03 | 49,5 | 0,4 | 11,08 | 2,797 |
| 21/11/2017 | 13,5 | 50,66 | 0,46 | 11,089 | 2,785 |
| 26/11/2017 | 16 | 39,66 | 0,78 | 11,25 | 2,847 |
| 28/11/2017 | 17,33 | 46,5 | 1,58 | 11,36 | 2,847 |
| 03/12/2017 | 10,2 | 48,66 | 0,56 | 10,79 | 2,836 |
| 10/12/2017 | 12,6 | 54 | 1,17 | 10,96 | 2,84 |
| 17/12/2017 | 11,66 | 52,53 | 0,86 | 10,84 | 2,948 |
| 25/12/2017 | 9,46 | 62,66 | 0,41 | 10,75 | 2,84 |
| 03/01/2018 | 14,66 | 48,33 | 0,64 | 10,765 | 2,824 |
| 09/01/2018 | 13,13 | 50,46 | 0,89 | 10,784 | 2,797 |
| 17/01/2018 | 14 | 41 | 1,17 | 10,89 | 2,766 |
| 24/01/2018 | 14,33 | 57,33 | 1,22 | 11,02 | 2,905 |
| 13/02/2018 | 15,66 | 39 | 1,09 | 11,04 | 2,832 |
| 14/03/2018 | 20,66 | 42,5 | 1,87 | 10,843 | 2,711 |
| 26/03/2018 | 15,33 | 43,66 | 3,02 | 10,81 | 2,561 |

| | | | | | |
|------------|-------|-------|------|--------|-------|
| 18/04/2018 | 20,2 | 44,3 | 2,86 | 11,09 | 2,755 |
| 23/04/2018 | 29,26 | 30 | 2,43 | 11,01 | 2,145 |
| 03/05/2018 | 21,2 | 26,5 | 2,96 | 10,88 | 2,488 |
| 09/05/2018 | 25,4 | 46,5 | 2,57 | 10,9 | 2,356 |
| 14/05/2018 | 28,33 | 42,33 | 1,87 | 11,03 | 2,697 |
| 23/05/2018 | 36,66 | 30,66 | 2,17 | 11,029 | 2,311 |
| 09/07/2018 | 37,66 | 31,33 | 1,6 | 11,19 | 2,276 |

Tableau (IV.3). Les mesures des débits des paramètres climatiques, température de l'air, humidité de l'air et vitesse du vent, et des valeurs de l'intensité pluviométriques de bloc A à l'espacement 12 m x 18 m

Tableau (IV.3). Mesures des débits des paramètres climatiques de bloc A (12 m x 18 m)

| Jours | T(c°) | H(%) | V(m/s) | Qp(m ³ /h) | Im(mm/h) |
|------------|-------|-------|--------|-----------------------|----------|
| 11/02/2019 | 16 | 33,43 | 1,29 | 21,27 | 2,83 |
| 18/02/2019 | 12,9 | 48,6 | 1,91 | 21,04 | 2,841 |
| 25/02/2019 | 11,3 | 42,73 | 2,03 | 21,23 | 2,909 |
| 04/03/2019 | 17,7 | 38,16 | 0,9 | 21,767 | 2,943 |
| 11/03/2019 | 18,53 | 42,03 | 3,61 | 21,72 | 2,864 |
| 18/03/2019 | 22,73 | 22,4 | 1,64 | 21,23 | 2,83 |
| 17/04/2019 | 25,9 | 40,13 | 1,54 | 21,53 | 2,647 |
| 24/04/2019 | 30,33 | 19,06 | 1,7 | 20,97 | 2,562 |
| 19/06/2019 | 37 | 20,86 | 1,7 | 21,174 | 2,606 |
| 24/06/2019 | 41,2 | 10,63 | 3,4 | 21,025 | 2,402 |
| 01/07/2019 | 37,13 | 25,5 | 3,3 | 21,175 | 2,606 |
| 03/07/2019 | 36 | 25,23 | 2,82 | 21,094 | 2,606 |
| 04/07/2019 | 37 | 22,66 | 1,8 | 21,012 | 2,635 |
| 08/07/2019 | 39,16 | 17 | 1,95 | 21,006 | 2,529 |
| 09/07/2019 | 40 | 16 | 1,94 | 21,13 | 2,575 |

Tableau (IV.4). Les mesures des débits des paramètres climatiques, température de l'air, humidité de l'air et vitesse du vent, et des valeurs de l'intensité pluviométriques de bloc B à l'espacement 12 m x 18 m

Tableau (IV.4). Mesures des débits des paramètres climatiques de bloc B (12 m x 18 m)

| Jours | T(c°) | H(%) | V(m/s) | Qp(m ³ /h) | Im(mm/h) |
|------------|-------|-------|--------|-----------------------|----------|
| 21/01/2019 | 15 | 51,23 | 1,6 | 10,65 | 2,307 |
| 23/01/2019 | 14 | 40,33 | 1,8 | 10,54 | 2,488 |
| 30/01/2019 | 16 | 45,4 | 1,22 | 10,676 | 2,78 |
| 06/02/2019 | 12,3 | 49,27 | 1,08 | 10,457 | 2,723 |
| 13/02/2019 | 11 | 42,26 | 0,93 | 10,41 | 2,758 |
| 20/02/2019 | 15 | 51,56 | 3,41 | 10,52 | 2,72 |
| 27/02/2019 | 11,46 | 58,53 | 2,84 | 10,433 | 2,75 |
| 04/03/2019 | 17,7 | 38,16 | 0,9 | 10,407 | 2,531 |
| 06/03/2019 | 21,5 | 21,8 | 2,48 | 10,344 | 2,502 |
| 13/03/2019 | 21,5 | 21,4 | 1,75 | 10,324 | 2,498 |
| 18/03/2019 | 22,73 | 22,4 | 1,64 | 10,57 | 2,492 |
| 08/04/2019 | 19,3 | 39,8 | 1,38 | 10,404 | 2,348 |
| 15/04/2019 | 27,4 | 17,15 | 1,94 | 10,488 | 2,188 |
| 17/06/2019 | 33 | 29 | 4,53 | 10,504 | 2,345 |
| 26/06/2019 | 40,5 | 20,5 | 1,94 | 10,76 | 2,593 |
| 10/07/2019 | 38,83 | 11,66 | 2,46 | 10,353 | 2,339 |
| 11/07/2019 | 37,33 | 31,33 | 2,62 | 10,58 | 2,677 |

IV.3. Analyse de l'uniformité :

L'évaluation de l'uniformité de l'irrigation a été réalisée à l'échelle de la maille centrale dans le réseau (4 asperseurs du milieu).

Tableau (IV.5). Résume les statistiques de base des données UC obtenues avec les deux espacements des asperseurs, les deux blocs de réseaux (4rampes, 2rampes) et les deux classes de vitesse du vent dominantes. Dans le tableau, N, UC_m, σ_x et CV font référence au nombre d'essais sur le terrain, au coefficient d'uniformité moyen, au écart type et au coefficient de variation.

Tableau (IV.5) : Effet de la vitesse du vent et de l'espacement des arroseurs sur l'uniformité à différents nombres de rampes

| Nombre de rampes | L'espacement des arroseurs | | | | | | |
|------------------|----------------------------|---------|-------|-------|---------|-------|-------|
| | | 18 x 18 | | | 12 x 18 | | |
| 4 Rampes | N | 14 | 13 | 27 | 9 | 5 | 14 |
| | V(m/s) | 0 - 2 | 2 - 4 | 0 - 4 | 0 - 2 | 2 - 4 | 0 - 4 |
| | UC(%) | 70.49 | 52.27 | 61.72 | 78.57 | 65.41 | 73.87 |
| | σ_x | 5.6 | 9.51 | 11.98 | 4.21 | 10.28 | 9.29 |
| | Cv | 0.079 | 0.18 | 0.19 | 0.053 | 0.157 | 0.125 |
| 2 Rampes | N | 17 | 8 | 25 | 11 | 5 | 16 |
| | V(m/s) | 0 - 2 | 2 - 4 | 0 - 4 | 0 - 2 | 2 - 4 | 0 - 4 |
| | UC(%) | 71.36 | 49.49 | 64.36 | 79.73 | 65.33 | 75.23 |
| | σ_x | 10.17 | 7.07 | 13.86 | 5.44 | 3.19 | 8.36 |
| | Cv | 0,142 | 0,143 | 0,215 | 0,068 | 0,049 | 0,11 |

La figure (IV.1) montre la relation entre le coefficient d'uniformité et la vitesse du vent, dans le bloc A et bloc, sur l'espacement 18 X 18m et 12 X 18m.

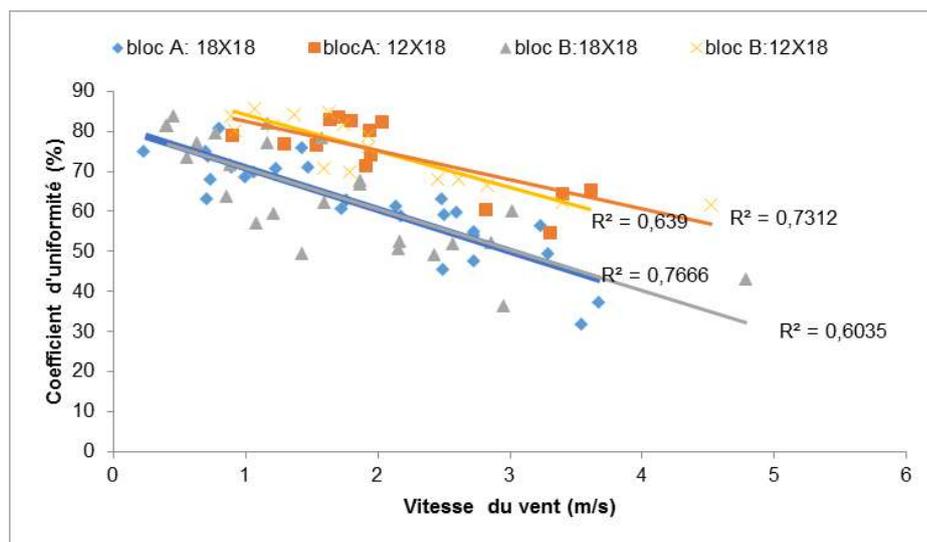


Figure (IV.1). La relation entre le coefficient d'uniformité et la vitesse du vent

D'après la figure (IV.1), on constate que le coefficient d'uniformité varie inversement avec la vitesse du vent, dans tous les cas.

A travers les résultats obtenus et montrés dans le tableau (IV.5), nous concluons ce qui suit:

L'uniformité de distribution (CU) augmente légèrement avec le grandissement de nombre des rampes.

Les petits espacements des asperseurs améliorent la CU pour toutes les blocs. À des vitesses de vent inférieures à 4 m / s, l'espacement de 12 m × 18 m fournissait les valeurs les plus élevées pour les deux blocs par rapport l'espacement 18 x18m.

Pour un même nombre des rampes, coefficient d'uniformité diminue à mesure que la vitesse du vent augmente. Des résultats similaires ont été publiés par Tarjuelo et al [42] et Yacoubi et al. [46].

IV.4. Estimation des pertes par évaporation et par entrainement des gouttes

Au cours de l'irrigation par aspersion, le volume d'eau donné aux cultures va diminuer en fonction des pertes par évaporation des gouttes d'eau au cours leur parcours et de la première couche de 15 cm supérieur du sol après l'arrêt de l'irrigation, et les pertes par entrainement de nuage de pluie par l'effet du vent. Cette diminution de quantité d'eau affecte sur le rendement des cultures, pour cela, il faut estimer ces pertes pour donner la dose d'arrosage réelle.

IV.4.1. Etude expérimentale

Dans notre expérimentation, on utilise la méthode des boites à capture pour estimer Les pertes par évaporation et par entrainement E_{ev+v} (%), qui sont déterminées par la formule suivante :

$$E_{ev+v} = \frac{Q_a - Q_p}{Q_a} \cdot 100 \quad (IV.1)$$

Avec :

E_{ev+v} : perte par évaporation et par entrainement (en % de débit) ;

Q_a : débit de l'arroseur (l/h);

Q_p : débit des pluviomètres (l/h);

Les mesuré sont été fait en 2 compagnes, la première compagne l'espacement entre les asperseurs est 18m X 18m, et la deuxième compagne l'espacement est 12m X 18m. Le

dispositif inclus deux bloc, bloc A comprend 4 rampes de 16 asperseurs, et bloc B comprend 2 rampes de 8 asperseurs.

IV.4.2. Résultats des différents essais

A. 1ère Campagne de Mesures au champ (2017/2018)

A.1. Les mesure des pertes globales

Les mesures des pertes globales et des paramètres climatiques, température de l'air, humidité de l'air et vitesse du vent, de bloc A sont présentés dans le tableau (IV.6) :

Tableau (IV.6) : Les mesures des pertes globales et des paramètres climatiques de bloc A

| Jour | T (°C) | H (%) | V (m·s ⁻¹) | Eev+v (%) |
|------------|--------|-------|------------------------|-----------|
| 09.11.2017 | 15.86 | 38.33 | 1.24 | 29.41 |
| 22.11.2017 | 12.53 | 53 | 0.9 | 27.5 |
| 27.11.2017 | 14.4 | 49 | 0.77 | 29.62 |
| 05.12.2017 | 9.8 | 53.66 | 0.81 | 24.13 |
| 12.12.2017 | 14.66 | 42.33 | 1 | 24.78 |
| 19.12.2017 | 9.86 | 52.66 | 0.72 | 25.09 |
| 24.12.2017 | 11.46 | 55.33 | 0.71 | 24.09 |
| 02.01.2018 | 16.33 | 37.33 | 0.74 | 30.92 |
| 18.01.2018 | 14.33 | 41.33 | 1.73 | 26.89 |
| 21.01.2018 | 15.33 | 49.33 | 0.7 | 26.52 |
| 28.01.2018 | 13 | 45.33 | 2.18 | 24.58 |
| 12.02.2018 | 11.66 | 45.66 | 1.77 | 28.08 |
| 08.03.2018 | 20.26 | 43.16 | 1.43 | 27.11 |
| 12.03.2018 | 19.8 | 37.33 | 1.07 | 28.29 |
| 20.03.2018 | 20.2 | 28.66 | 2.6 | 34.38 |
| 27.03.2018 | 16.2 | 42 | 2.14 | 36.35 |
| 17.04.2018 | 23 | 36.3 | 3.29 | 43.89 |

| | | | | |
|------------|-------|-------|------|-------|
| 25.04.2018 | 31.4 | 28.17 | 3.68 | 50.46 |
| 30.04.2018 | 28.5 | 33.5 | 2.51 | 43.90 |
| 07.05.2018 | 28 | 38.33 | 2.5 | 38.46 |
| 14.05.2018 | 25.6 | 42 | 2.73 | 38.36 |
| 21.05.2018 | 27.83 | 43.5 | 2.73 | 38.71 |
| 25.07.2018 | 36 | 33.33 | 2.49 | 40.86 |
| 30.07.2018 | 38.5 | 31 | 1.48 | 46.75 |
| 01.08.2018 | 36.66 | 32 | 2.73 | 37.64 |

Les mesures des pertes globales et des paramètres climatiques, température de l'air, humidité et vitesse du vent, de bloc B sont présentés dans le tableau (IV.7) .

Tableau (IV.7) : Les mesures des pertes globales et des paramètres climatiques de bloc B

| Jour | T (°C) | H(%) | V (m·s ⁻¹) | Eev+v (%) |
|------------|--------|-------|------------------------|-----------|
| 19.11.2017 | 14.03 | 49.5 | 0.4 | 34.57 |
| 21.11.2017 | 13.5 | 50.66 | 0.46 | 34.89 |
| 26.11.2017 | 16 | 39.66 | 0.78 | 34.4 |
| 28.11.2017 | 17.33 | 46.5 | 1.58 | 35.04 |
| 03.12.2017 | 10.2 | 48.66 | 0.56 | 31.88 |
| 10.12.2017 | 12.6 | 54 | 1.17 | 32.85 |
| 17.12.2017 | 11.66 | 52.53 | 0.86 | 29.52 |
| 25.12.2017 | 9.46 | 62.66 | 0.41 | 31.53 |
| 03.01.2018 | 14.66 | 48.33 | 0.64 | 32 |
| 09.01.2018 | 13.13 | 50.46 | 0.89 | 32.77 |
| 17.01.2018 | 14 | 41 | 1.17 | 34.16 |

| | | | | |
|------------|-------|-------|------|-------|
| 24.01.2018 | 14.33 | 57.33 | 1.22 | 31.67 |
| 13.02.2018 | 15.66 | 39 | 1.09 | 33.51 |
| 14.03.2018 | 20.66 | 42.5 | 1.87 | 35.2 |
| 26.03.2018 | 15.33 | 43.66 | 3.02 | 38.59 |
| 18.04.2018 | 20.2 | 44.3 | 2.86 | 35.62 |
| 23.04.2018 | 29.26 | 30 | 2.43 | 49.5 |
| 03.05.2018 | 21.2 | 26.5 | 2.96 | 40.72 |
| 09.05.2018 | 25.4 | 46.5 | 2.57 | 43.97 |
| 14.05.2018 | 28.33 | 42.33 | 1.87 | 36.63 |
| 23.05.2018 | 36.66 | 30.66 | 2.17 | 45.69 |
| 09.07.2018 | 37.66 | 31.33 | 1.6 | 47.27 |

Les figures (IV.2), (IV.3) et (IV.4) illustrent l'effet des paramètres climatiques individuels sur Eev+v. Dans les blocs A et B, la température de l'air est la variable la plus explicative que la vitesse du vent et l'humidité relative respectivement. Il est clair que la température de l'air et la vitesse du vent sont directement proportionnelles aux Eev+v. Au contraire, cette dernière est inversement proportionnelle à l'humidité de l'air.

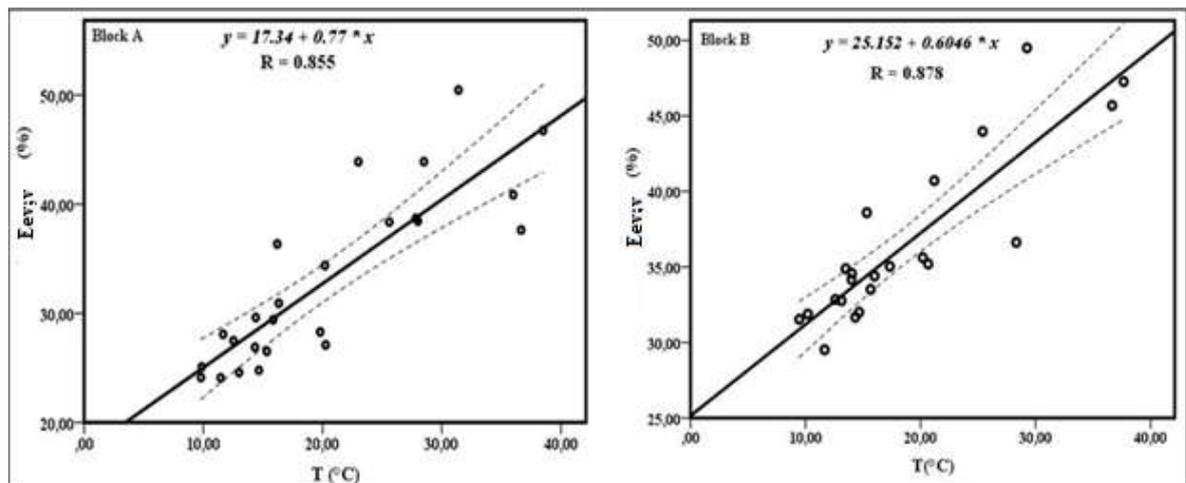


Figure (IV.2) : Variation des pertes par évaporation et entrainement en fonction de la température.

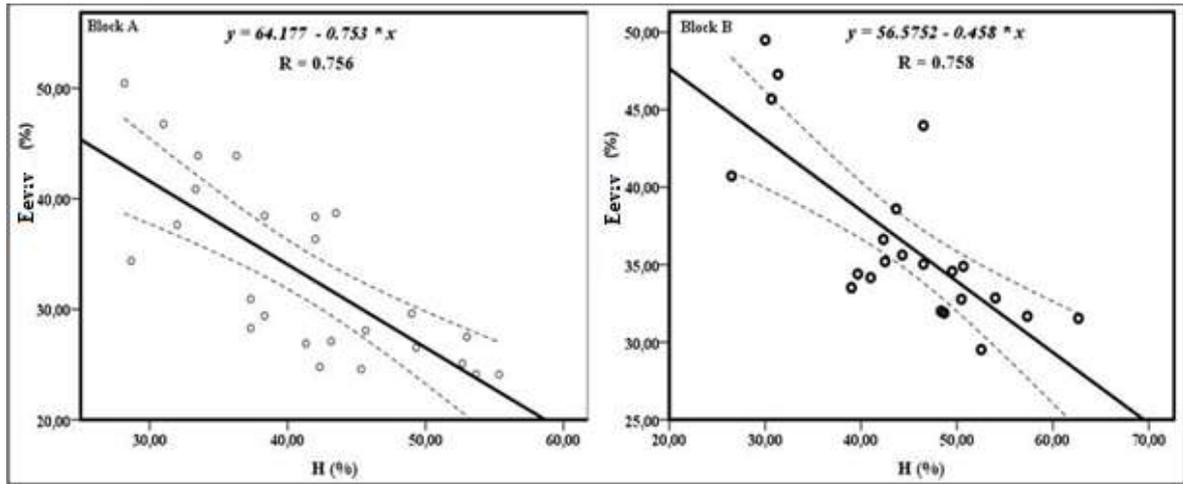


Figure (IV.3) : Variation des pertes par évaporation et entrainement en fonction de l'humidité de l'air.

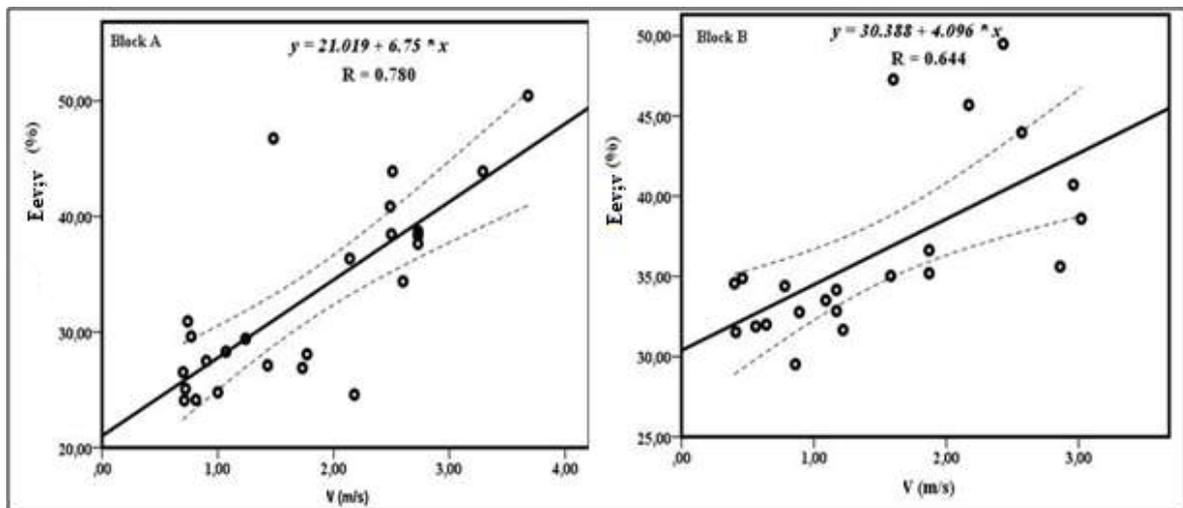


Figure (IV.4) : Variation des pertes par évaporation et entrainement en fonction de la vitesse du vent.

Pour mettre en évidence les pertes en eau totales avec les éléments météorologiques nous avons tracé les courbes de ces caractéristiques dans un seul graphe (figure (IV.5), et figure (IV.6)). Dans l'ensemble la variation de la courbe des pertes totales est la même que celles de la température, de l'évaporation et à un degré moins de la vitesse du vent. La courbe de l'humidité de l'air varie en sens opposé par rapport à la courbe des pertes en eau totales.

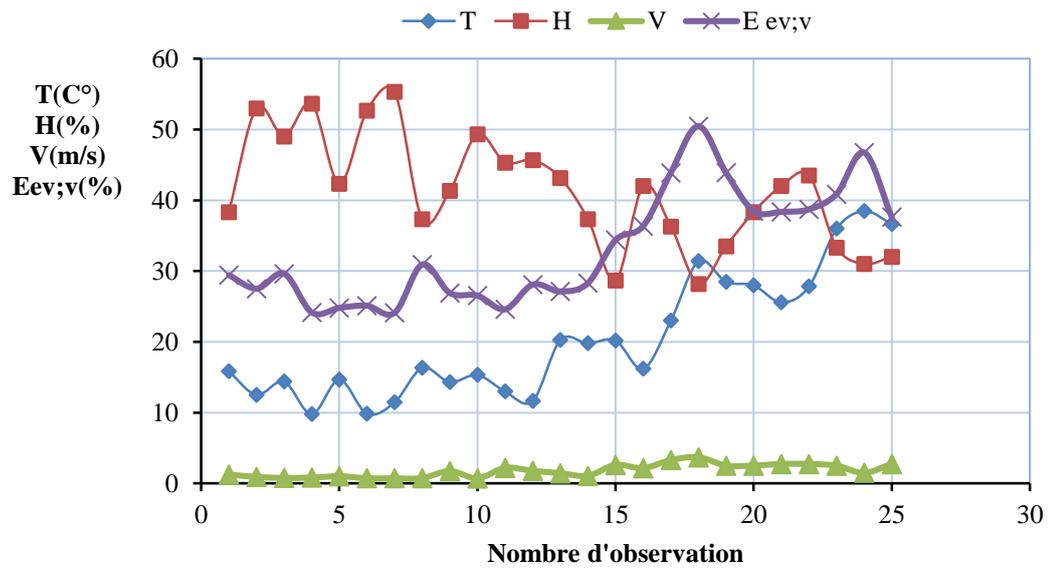


Figure (IV.5) : Comparaison entre les éléments météorologiques et les pertes totales (bloc

A)

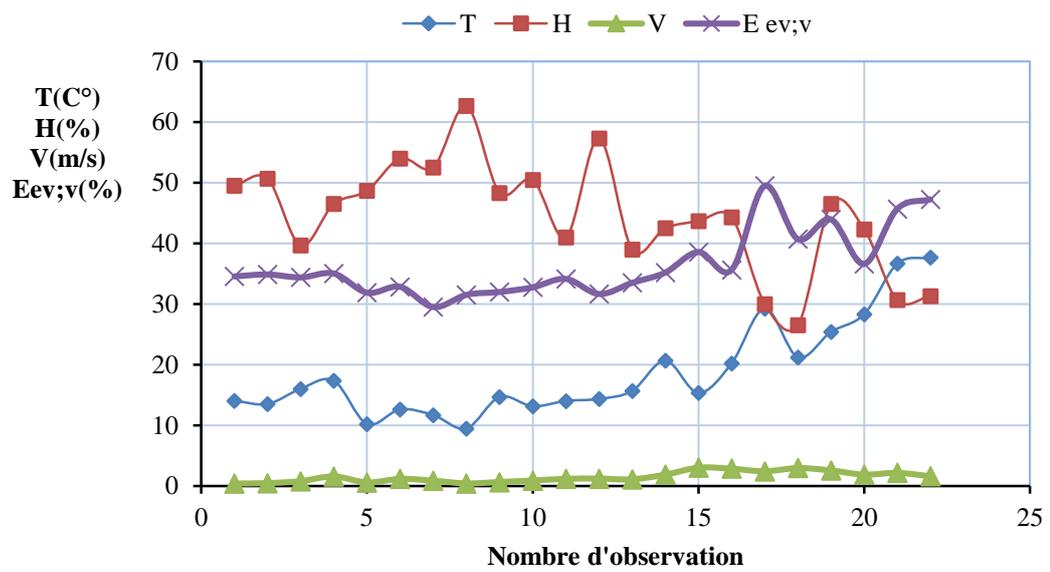


Figure (IV.6) : Comparaison entre les éléments météorologiques et les pertes totales (bloc

B)

A.2. Modélisation de pertes globales (Eev+v)

L'analyse de la régression entre les pertes globales et les paramètres climatiques nous permettent de proposer les modèles suivants :

- Pour le bloc A:

$$Eev + v (\%) = 0.543 \cdot T + 3.323 \cdot V + 16.04 \quad (IV.2)$$

- Pour le bloc B :

$$Eev + v (\%) = 0.521 \cdot T + 1.356 \cdot V + 24.708 \quad (IV.3)$$

Selon le tableau (IV.8), les coefficients de modèle normalisés ((IV.2)) pour la température (Beta = 0,604, p = 0,000 ≤ 0,05) et la vitesse du vent (Beta = 0,384, p = 0,004 ≤ 0,05) sont des facteurs importants agissant sur Eev+v. Aussi pour le modèle (IV.3), la valeur (Beta = 0,756, p = 0,000 ≤ 0,05) de température, et (Beta = 0,213, p = 0,003 ≤ 0,05) de la vitesse du vent, qui indiquent que la température et la vitesse du vent des paramètres agissant fortement sur Eev+v (Tableau (IV.9)).

On constate que l'humidité de l'air a été exclus car la valeur (Beta = -0,097, p = 0,535 ≥ 0,05) de l'humidité dans le bloc A (Annexe 3) et la valeur (Beta = -0,181, p = 0,266 ≥ 0,05) de l'humidité dans le bloc B (Annexe 5)

Tableau (IV.8) : Paramètres statistiques de la régression du bloc A

| modèle | | coefficient | SE | Beta | t | sig |
|--------|----------|-------------|-------|-------|-------|-------|
| Bloc A | T | 0.543 | 0.109 | 0.604 | 4.981 | 0.000 |
| | V | 3.323 | 1.049 | 0.384 | 3.167 | 0.004 |
| | Constant | 16.04 | 1.871 | | 8.572 | 0.000 |

Tableau (IV.9). Paramètres statistiques de la régression du bloc B

| modèle | | coefficient | SE | Beta | t | sig |
|--------|----------|-------------|-------|-------|--------|-------|
| Bloc B | T | 0.521 | 0.086 | 0.756 | 6.079 | 0.000 |
| | V | 1.356 | 0.791 | 0.213 | 1.714 | 0.003 |
| | Constant | 24.708 | 1.451 | | 17.027 | 0.000 |

A.3. Comparaison des valeurs des pertes globales mesurées, modélisées

Les valeurs des pertes globales mesurées sont comparées aux valeurs proposés pour les blocs A et B dans les figures (IV.7) et (IV.8) respectivement

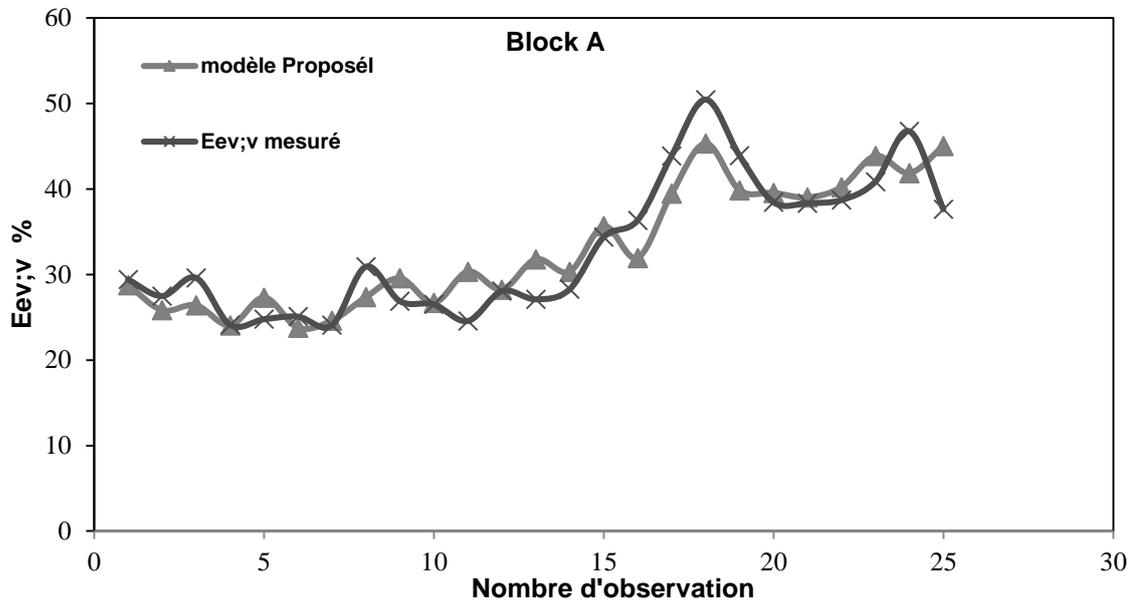


Fig. (IV.7) : Comparaison des valeurs des pertes globales mesurées et modélisées (bloc A)

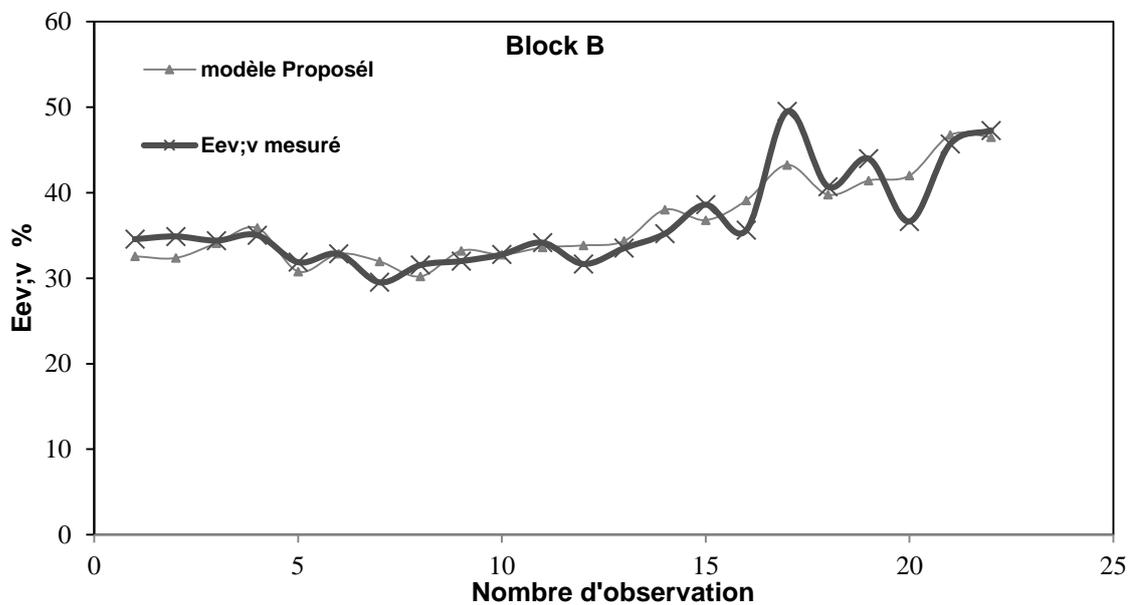


Fig. (IV.8). Comparaison des valeurs des pertes globales mesurées et modélisées (bloc B)

A.4. Evaluation de la performance des modèles proposés et existants

Pour définir l'évaluation de la performance des modèles proposés et existants, il a été utilisé les critères suivants : coefficient de détermination (R^2), erreur quadratique moyenne (RMSE) et erreur absolue moyenne (MAE).

Les résultats des critères d'évaluations par R^2 , RMAE, MAE (pour les deux blocs A et B) sont illustrés respectivement dans les tableaux (IV.10) et (IV.11).

Tableau (IV.10) : Evaluation de la performance de modèle proposé (Bloc A)

| Modèle | Test | | |
|----------------|--------------|-------------|--------------|
| | R^2 | RMSE (%) | MAE (%) |
| Modèle proposé | <u>0.815</u> | <u>3.32</u> | <u>0.002</u> |

Tableau (IV.11) : Evaluation de la performance de modèle proposé (Bloc B)

| Modèle | Test | | |
|----------------|--------------|-------------|---------------|
| | R^2 | RMSE (%) | MAE (%) |
| Modèle proposé | <u>0.805</u> | <u>2.41</u> | <u>0.0016</u> |

La comparaison entre les valeurs des pertes globales E_{ev+v} mesurées, pour les blocs A et B sont présentés dans les figures (IV.9) et (IV.10) respectivement.

Ces dernières figures montre clairement que les valeurs des pertes globales modélisées par les relations (IV.2) et (IV.3) sont très proches des valeurs mesurées

Les figures (IV.9) et (IV.10) montrent les valeurs mesurées des pertes globales E_{ev+v} qui sont comparées à celles prédites et estimés où la ligne de régression est pratiquement identique à la première bissectrice,

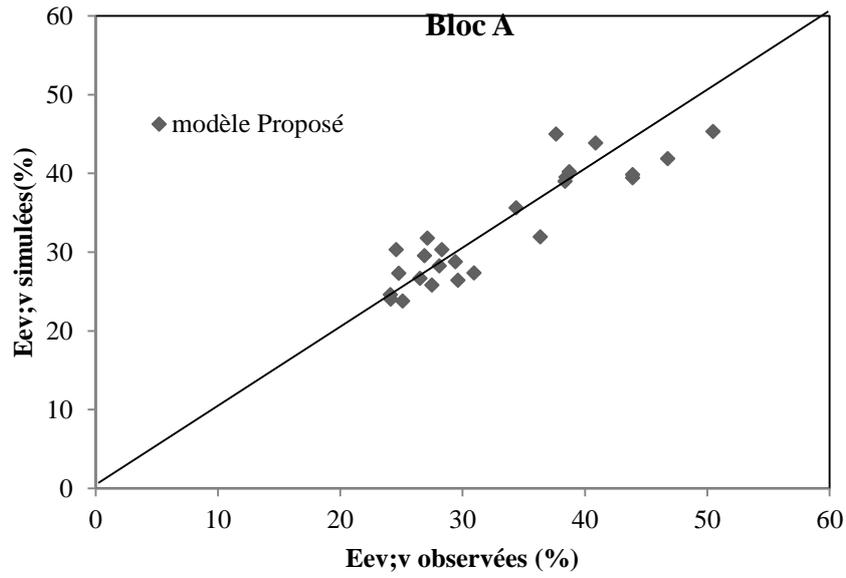


Fig (IV.9). La comparaison entre les valeurs des pertes globales Eev+v mesuées, modélisés pour les bloc A

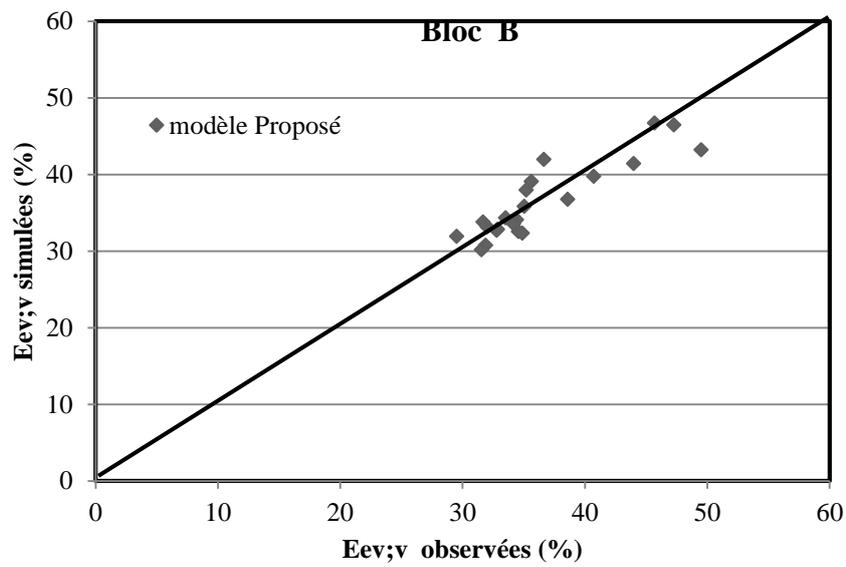


Fig (IV.10). La comparaison entre les valeurs des pertes globales Eev+v mesuées, modélisés pour les bloc B

A.4. Comparaison statistique entre les pertes globales estimés et modélisés :

- Blocs A ;18m x18m

Dans cette phase d'étude on essaye de vérifier statiquement la différence entre les pertes globales estimés et modélisés. La vérification a été basée sur le test de normalité de Shapiro-Wilk. Pour une taille d'échantillon de ($N = 25 < 50$), les valeurs significatives de Shapiro-Wilk sont égales à 0,020, 0,020 pour les valeurs estimés et modélisés respectivement. (Tableau (IV.10)).

Tableau (IV.12). Test de normalité

| G | | Shapiro-Wilk | | |
|-------|-----------|--------------|-----|---------------|
| | | Statistique | ddl | signification |
| Eev+v | estimés | 0.902 | 25 | 0.020 |
| | modélisés | 0.902 | 25 | 0.020 |

Les valeurs présentées dans le tableau 7 montrent bien que les deux distributions (estimés et modélisés) ne suivent pas une loi normale à un intervalle de confiance de 95%. Dans ce cas on a utilisé le test non paramétrique de Mann-Whitney dans la comparaison

Le résultat de test Mann-Whitney indique que la valeur de degré de signification de SigAsymp est de 0.808 est inférieur à 0.05, ce qui indique qu'il n'y a pas une différence significative entre les pertes globales estimés et modélisés.

- Blocs B ;18m x18m

La vérification de test de normalité de Shapiro-Wilk. Pour une taille d'échantillon de ($N = 22 < 50$), les valeurs significatives de Shapiro-Wilk sont égales à 0,004, 0,005 pour les valeurs estimés et modélisés respectivement. (Tableau (IV.13)).

Tableau (IV.13). Test de normalité

| G | | Shapiro-Wilk | | |
|-------|-----------|--------------|-----|---------------|
| | | Statistique | ddl | signification |
| Eev+v | estimés | 0.852 | 22 | 0.004 |
| | modélisés | 0.860 | 22 | 0.005 |

Les valeurs présentées dans le tableau 7 montrent bien que les deux distributions (estimés et modélisés) ne suivent pas une loi normale à un intervalle de confiance de 95%. Dans ce cas on a utilisé le test non paramétrique de Mann-Whitney dans la comparaison

Le résultat de test Mann-Whitney indique que la valeur de degré de signification de SigAsymp est de 0.944 est inférieur à 0.05, ce qui indique qu'il n'y a pas une différence significative entre les pertes globales estimés et modélisés.

D'après les valeurs critères de performance utilisés (R^2 , RMSE et MAE) des deux modèles proposés (IV.2) et (IV.3), et le résultat de l'analyse de comparaison statiquement ce qui confirme la précision des modèles d'étude actuelle dans les deux blocs.

B. 2ème Campagne de Mesures au champ (2018/2019)

B.1. Les mesure des pertes globales

Le dispositif expérimental de 2^{ème} campagne c'est le même que de la 1^{ère}, la seule différence ce que l'espacement entre les asperseurs devient 12m X 18m.

Les mesures des pertes globales et des paramètres climatiques, température de l'air, humidité de l'air et vitesse du vent, de bloc A et de bloc B sont présentés dans le tableau (IV.14) et le tableau (IV.15) :

Tableau (IV.14). Les mesures des pertes globales et des paramètres climatiques de bloc A

| Jours | T(c°) | H(%) | V(m/s) | Eev+v(%) |
|------------|-------|-------|--------|----------|
| 11/02/2019 | 16 | 33,43 | 1,29 | 31,03 |
| 18/02/2019 | 12,9 | 48,6 | 1,91 | 29,99 |
| 25/02/2019 | 11,3 | 42,73 | 2,03 | 28,968 |
| 04/03/2019 | 17,7 | 38,16 | 0,9 | 29,903 |
| 11/03/2019 | 18,53 | 42,03 | 3,61 | 31,639 |
| 18/03/2019 | 22,73 | 22,4 | 1,64 | 30,9 |
| 17/04/2019 | 25,9 | 40,13 | 1,54 | 36,275 |
| 24/04/2019 | 30,33 | 19,06 | 1,7 | 36,671 |
| 19/06/2019 | 37 | 20,86 | 1,7 | 36,2 |
| 24/06/2019 | 41,2 | 10,63 | 3,4 | 40,785 |

| | | | | |
|------------|-------|-------|------|--------|
| 01/07/2019 | 37,13 | 25,5 | 3,3 | 36,213 |
| 03/07/2019 | 36 | 25,23 | 2,82 | 35,958 |
| 04/07/2019 | 37 | 22,66 | 1,8 | 34,994 |
| 08/07/2019 | 39,16 | 17 | 1,95 | 37,584 |
| 09/07/2019 | 40 | 16 | 1,94 | 36,82 |

Tableau (IV.15). Les mesures des pertes globales et des paramètres climatiques de bloc B

| Jours | T(c°) | H(%) | V(m/s) | Eev+v(%) |
|------------|-------|-------|--------|----------|
| 21/01/2019 | 15 | 51,23 | 1,6 | 43,85 |
| 23/01/2019 | 14 | 40,33 | 1,8 | 38,805 |
| 30/01/2019 | 16 | 45,4 | 1,22 | 32,512 |
| 06/02/2019 | 12,3 | 49,27 | 1,08 | 32,514 |
| 13/02/2019 | 11 | 42,26 | 0,93 | 31,316 |
| 20/02/2019 | 15 | 51,56 | 3,41 | 32,985 |
| 27/02/2019 | 11,46 | 58,53 | 2,84 | 31,678 |
| 04/03/2019 | 17,7 | 38,16 | 0,9 | 36,966 |
| 06/03/2019 | 21,5 | 21,8 | 2,48 | 37,297 |
| 13/03/2019 | 21,5 | 21,4 | 1,75 | 37,272 |
| 18/03/2019 | 22,73 | 22,4 | 1,64 | 38,884 |
| 08/04/2019 | 19,3 | 39,8 | 1,38 | 41,494 |
| 15/04/2019 | 27,4 | 17,15 | 1,94 | 45,938 |
| 17/06/2019 | 33 | 29 | 4,53 | 42,127 |
| 26/06/2019 | 40,5 | 20,5 | 1,94 | 37,546 |
| 10/07/2019 | 38,83 | 11,66 | 2,46 | 41,446 |
| 11/07/2019 | 37,33 | 31,33 | 2,62 | 34,414 |

L'analyse de la relation entre les facteurs climatiques, température T(c°), humidité de l'air H (%) et la vitesse du vent V (m /s) par rapport les pertes par évaporation et entrainement E_{ev+v} (%) pour la région d'étude montrent dans les figures (IV.11), (IV.12), (IV.13)

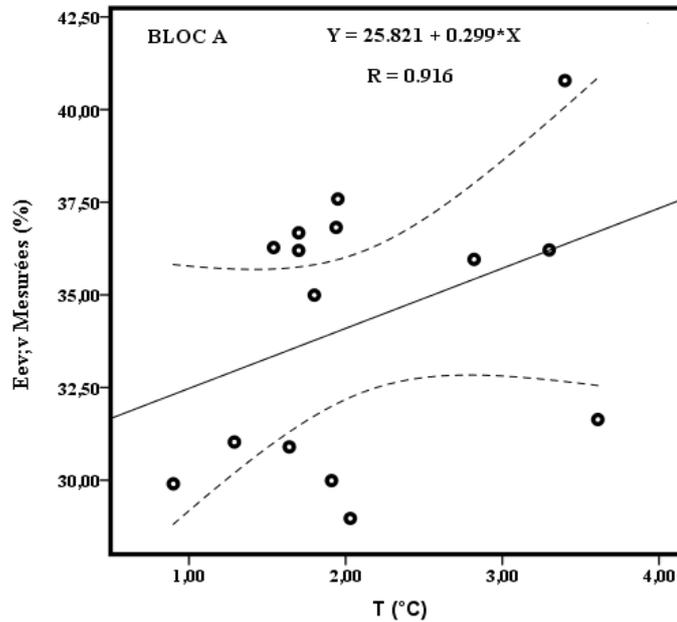


Figure (IV.11) : Variation des pertes par évaporation et entrainement en fonction de la température (bloc A).

La figure (IV.11) montre qu'avec l'augmentation de la température les pertes par évaporation et entrainement croient proportionnellement.

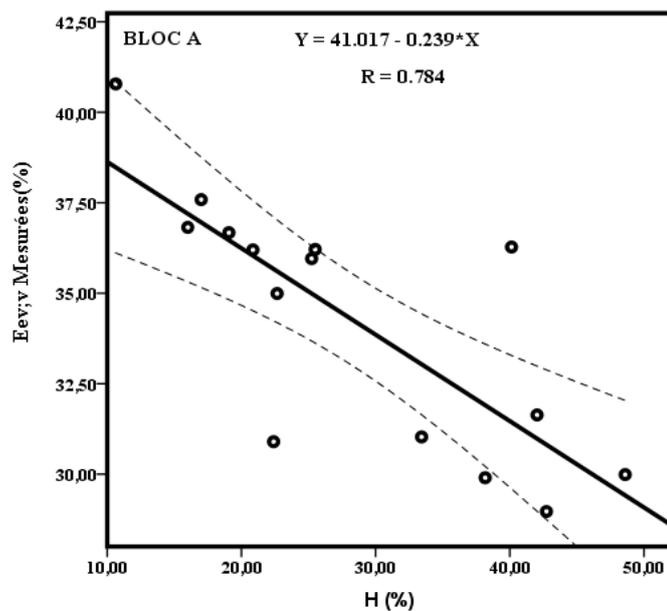


Figure (IV.12) : Variation des pertes par évaporation et entrainement en fonction de l'humidité de l'air (bloc A).

L'humidité de l'air est inversement proportionnelle avec les pertes par évaporation et entrainement. Si l'humidité croît,

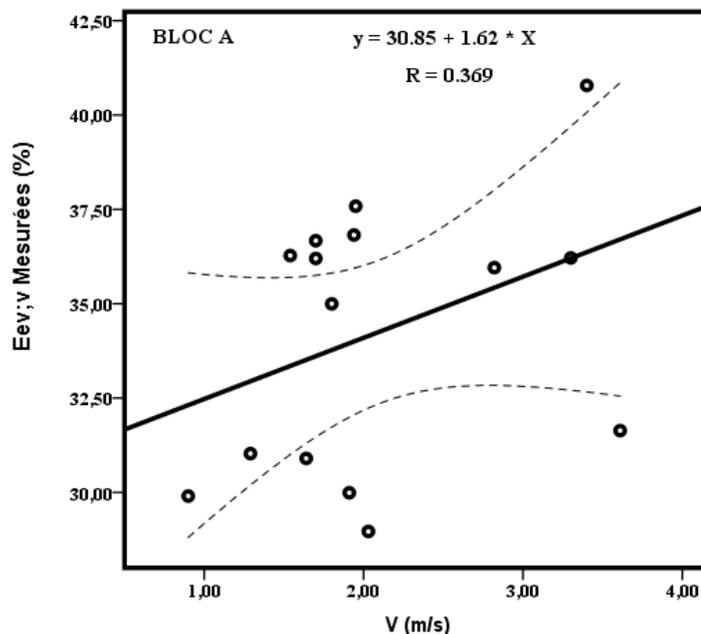


Figure (IV.13): Variation des pertes par évaporation et entrainement en fonction de la vitesse du vent (bloc A).

Concernant le vent, ce dernier influe proportionnellement sur les pertes par évaporation et entrainement.

B.2. Modélisation de pertes globales (Eev+v)

L'analyse de la régression entre les pertes globales et les paramètres climatiques nous permettent de proposer les modèles suivants :

- Pour le bloc A:

$$Eev + v (\%) = 0.299 \cdot T + 25.821 \quad (IV.4)$$

La température de l'air c'est le seul paramètre déterminant dans les pertes en eau globales pour le bloc A, Selon le tableau (IV.16), les coefficients de modèle normalisés ((IV.4)) pour la température (Beta = 0,96, p = 0,000 ≤ 0,05)

On constate que l'humidité et la vitesse du vent ont été exclus car la valeur (Beta = 0,055, p = 0,821 ≥ 0,05) de l'humidité la valeur (Beta = 0,088, p = 0,476 ≥ 0,05) de la vitesse du vent (Annexe 4)

Tableau (IV.16). Paramètres statistiques de la régression du bloc A

| modèle | | coefficient | SE | Beta | t | sig |
|--------|----------|-------------|-------|------|--------|-------|
| Bloc A | T | 0.299 | 0.036 | 0.96 | 3.167 | 0.000 |
| | Constant | 25.821 | 1.095 | | 23.586 | 0.000 |

B.3. Comparaison des valeurs des pertes globales mesurées, modélisées

Les valeurs des pertes globales mesurées sont comparées aux valeurs de modèle proposé pour le bloc A illustré dans la figure (IV.14).

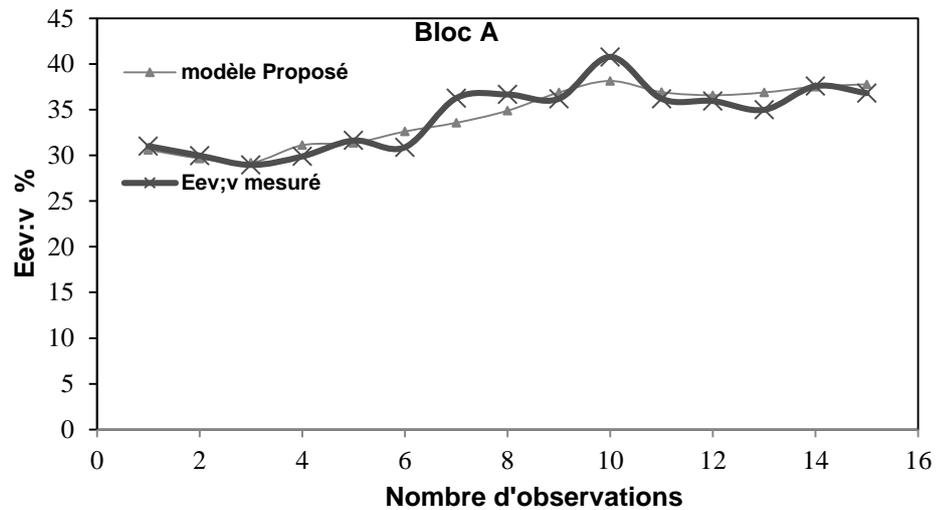


Fig. (IV.14). Comparaison des valeurs des pertes globales mesurées et calculées (bloc A)

B.4. Evaluation de la performance des modèles proposés et existants

Pour définir l'évaluation de la performance des modèles proposés et existants, il a été utilisé les critères suivants : coefficient de détermination (R^2), erreur quadratique moyenne (RMSE) et erreur absolue moyenne (MAE).

Les résultats des critères d'évaluations par R^2 , RMAE, MAE (pour le bloc A sont illustrés respectivement dans le tableau (IV.17).

Tableau (IV.17) : Evaluation de la performance des modèles proposés et existants (Bloc A)

| Modèle | Test | | |
|----------------|--------------|-------------|--------------|
| | R^2 | RMSE (%) | MAE (%) |
| Modèle proposé | <u>0.839</u> | <u>1.37</u> | <u>0.011</u> |

Les critères de performance utilisés (R^2 , RMSE et MAE) de modèle proposé donnent des valeurs excellent .

La comparaison entre les valeurs des pertes globales Eev+v mesuées, modélisés pour les blocs A est présenté dans la figure (IV.14).

Cette dernière figure montre clairement que les valeurs des pertes globales modélisée par la relation (IV.8) sont très proches des valeurs mesurées

La figure (IV.15) montre les valeurs mesurées des pertes globales Eev +v qui sont comparées à celles prédites et estimés où la ligne de régression est pratiquement identique à la première bissectrice, ce qui confirme la précision de modèle d'étude actuelle.

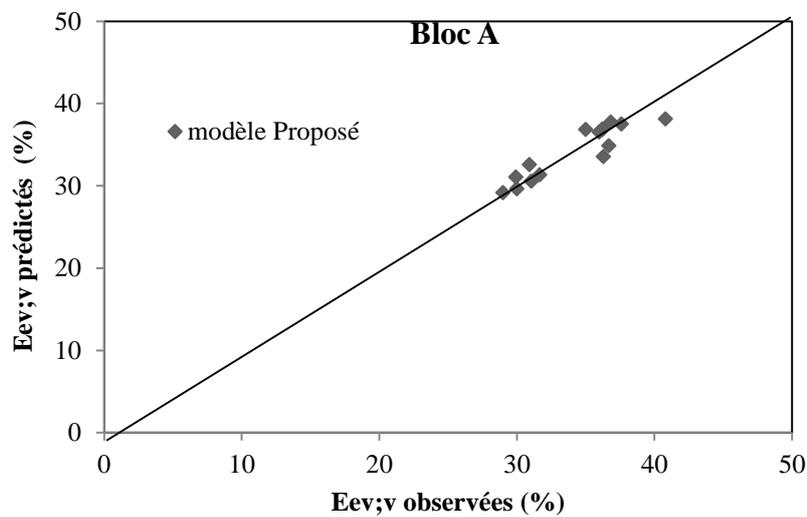


Fig (IV.15). La comparaison entre les valeurs des pertes globales Eev+v mesuées, modélisés pour les bloc A

B.5. Comparaison statistique entre les pertes globales estimés et modélisés :

La vérification a été basée sur le test de normalité de Shapiro-Wilk. Pour une taille d'échantillon de ($N = 15 < 50$), les valeurs significatives de Shapiro-Wilk sont égales à 0,113, 0,051 pour les valeurs estimés et modélisés respectivement. (Tableau (IV.18)).

Tableau (IV.18). Test de normalité

| G | Shapiro-Wilk | | |
|---------------|--------------|-----|---------------|
| | Statistique | ddl | signification |
| Eev+v estimés | 0.905 | 15 | 0.113 |
| modélisés | 0.882 | 15 | 0.051 |

Les valeurs présentées dans le tableau 7 montrent bien que les deux distributions (estimés et modélisés) suivent une loi normale à un intervalle de confiance de 95%. Dans ce cas on a utilisé le test paramétrique ANOVA à un facteur dans la comparaison. Le résultat de test ANOVA indique que la valeur de degré de signification de SigAsymp est de 0.902 est inférieure à 0.05, ce qui indique qu'il n'y a pas une différence significative entre les pertes globales estimés et modélisés.

D'après les valeurs critères de performance utilisés (R^2 , RMSE et MAE) de modèle proposé (IV.8), et le résultat de l'analyse de comparaison statiquement ce qui confirme la précision de modèle d'étude actuelle dans le bloc A espacement 12m x 18m.

IV.4.3. Variation des pertes d'eau globales E_{ev+v} et des coefficients d'uniformités CU en fonction des vitesses du vent

Les figures (IV.16), (IV.17), (IV.18), (IV.19) montrent la variation de E_{ev+v} et CU en fonction des vitesses du vent dans le bloc A et le bloc B en espacements 18X18m et 12X18m

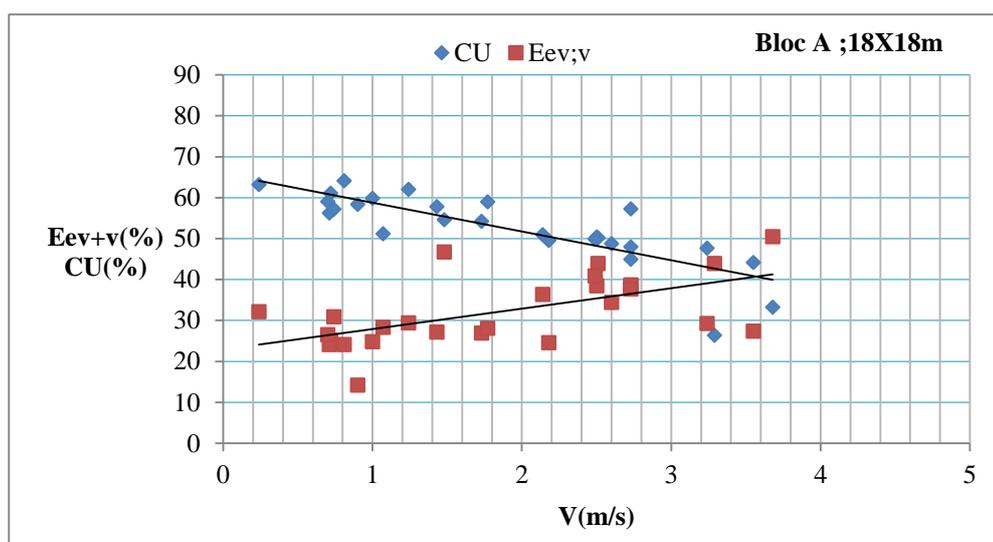


Figure (IV.16) : variation de E_{ev+v} et CU en fonction des vitesses du vent. (Bloc A ; 18X18m)

Pour des valeurs des vitesses du vent compris entre 1 et 3.6 m/ s la valeur moyenne de coefficient d'uniformité CU est égale à 50 % et la valeur moyenne des pertes globales est égale à 36.07%.

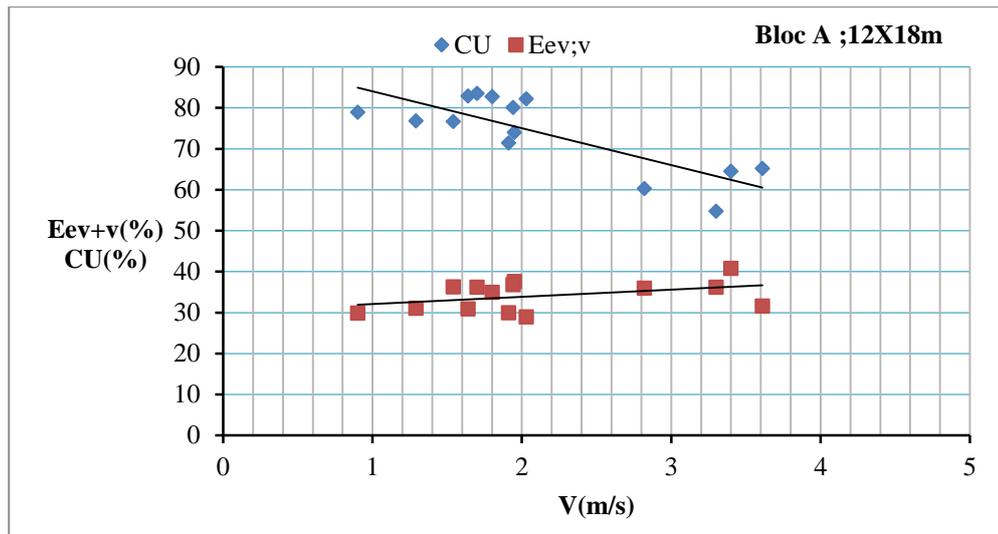


Figure (IV.17) : variation de Eev+v et CU en fonction des vitesses du vent. (Bloc A ;12X18m)

Pour des valeurs des vitesses du vent compris entre 1 et 3.6 m/ s la valeur moyenne de coefficient d'uniformité CU est égale à 73.48 % el la valeur moyenne des pertes globales est égale à 34.57%.

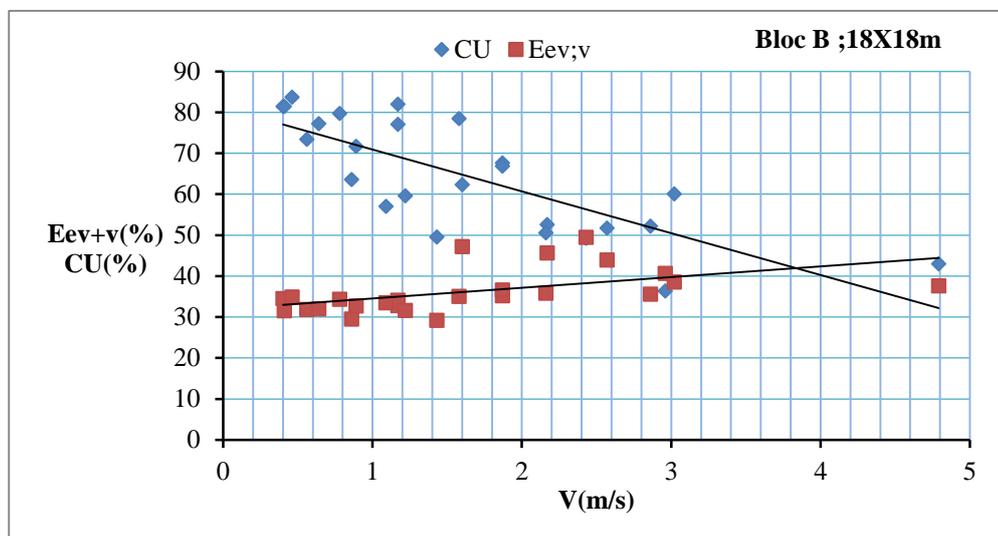


Figure (IV.18) : variation d'Eev+v et CU en fonction des vitesses du vent. (Bloc B ;18X18m)

Pour des valeurs des vitesses du vent compris entre 1 et 3.6 m/ s la valeur moyenne de coefficient d'uniformité CU est de l'ordre de 59.6 % et la valeur moyenne des pertes globales est égale à 38.6%.

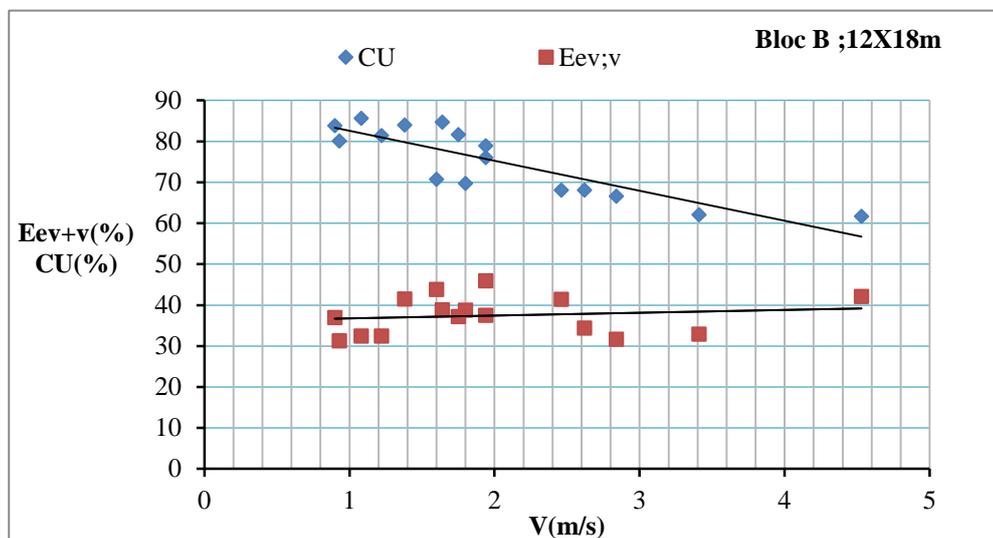


Figure (IV.19) : variation d'Eev+v et CU en fonction des vitesses du vent. (Bloc B ;12X18m)

Pour des valeurs des vitesses du vent compris entre 1 et 3.6 m/ s la valeur moyenne de coefficient d'uniformité CU est de l'ordre de 75.23 % et la valeur moyenne des pertes globales est égale à 37.62%.

On constate que la diminution de l'espacement entre les asperseurs diminue les pertes par évaporation de nuages des gouttes et entrainement par le vent par rapport la vitesse du vent.

Quel que soit le nombre de la rampe, l'espacement 12 mx18m est privilège, du fait qu'Ilya une diminution des pertes d'eau globale.

La différence entre les pertes d'eau globales par évaporation à partir des nuages des gouttelettes et entrainement par le vent :

- Dans les deux blocs A et B, pour l'espacement entre les asperseurs 18x18m est égale à 2.53% et 3.03% pour l'espacement 12x18m.
- Dans les deux espacements entre les asperseurs 18X18m et 12X18m pour le même bloc, est égale à 1.5% pour le bloc A et 1% pour le bloc B.

IV.5 Perte d'eau par entrainement du vent

Les mesures des pertes d'eau par entrainement du vent ont été faites dans le bloc B, l'espacement de 12 m X18 m. La relation entre les pertes d'eau par entrainement du vent et la vitesse du vent indiqué dans la figure (IV.20) suivante :

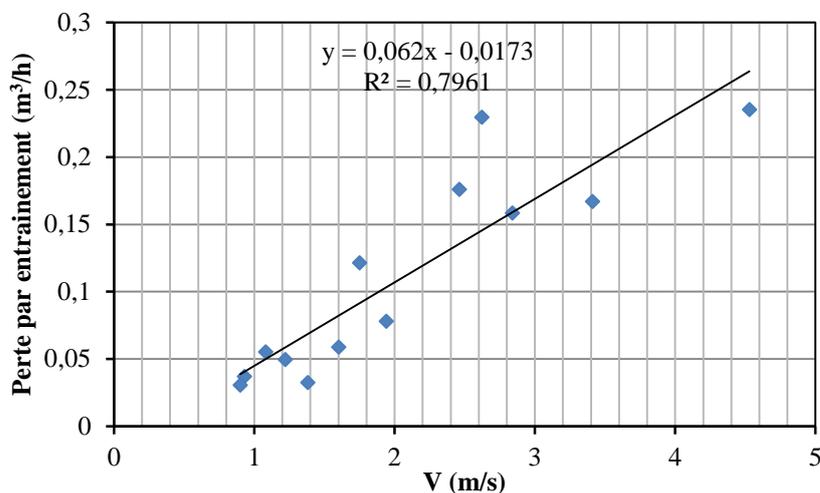


Fig. (IV.20). Relation entre les pertes d'eau par entrainement du vent et la vitesse du vent

D'après la figure (IV.20) on remarque que les valeurs des pertes par entrainement du vent varient entre $0,032 \text{ m}^3/\text{h}$ et $0,229 \text{ m}^3/\text{h}$, qui représentent $0,31\%$ à $2,17\%$ de débit des asperseurs.

IV.6 Pertes d'eau de la couche superficielle du sol (une heure après l'irrigation)

Les mesures des pertes d'eau par entrainement du vent ont été faites dans le bloc B, l'espacement de 18 m X18 m. La relation entre les pertes d'eau de la couche superficielle du sol avec les valeurs de la température de l'air et la vitesse du vent sont indiqués dans les figures (IV.21) ; (IV.22) et (IV.23) respectivement :

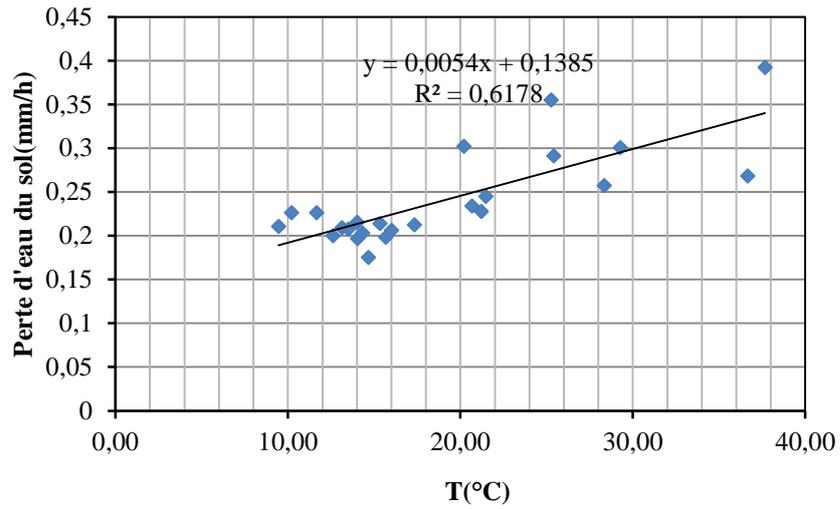


Fig. (IV.21). Relation entre les pertes d'eau du sol et la température de l'air

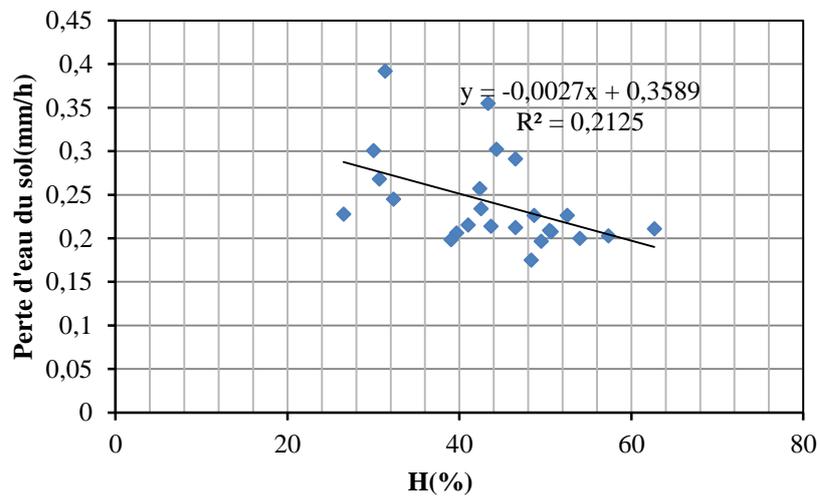


Fig. (IV.22). Relation entre les pertes d'eau du sol et l'humidité de l'air

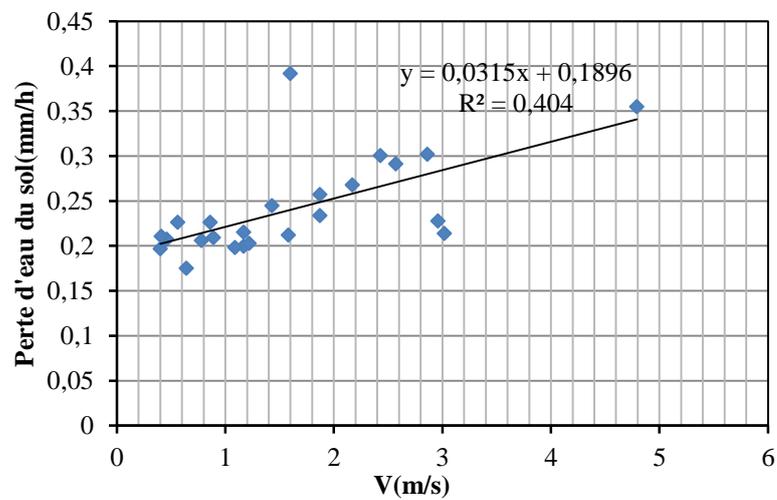


Fig. (IV.23). Relation entre les pertes d'eau du sol et la vitesse du vent

On constat que les pertes d'eau de la couche superficielle du sol directement proportionnelle à la température de l'air et à la vitesse du vent, et inversement proportionnelle à l'humidité du sol.

Pourcentages des pertes d'eau de la couche superficielle du sol par rapport à la quantité d'eau arrivent au sol sont résumées au tableau (IV.19)

Tableau (IV.19) : pertes d'eau de la couche superficielle du sol par rapport à la quantité d'eau arrivent au sol

| N° d'observation | Volume d'eau sortant, m ³ | Volume d'eau arrivant au sol, m ³ | Volume d'eau évaporé du sol, m ³ | E ev+v | E total |
|------------------|--------------------------------------|--|---|--------|---------|
| 1 | 33,60 | 21,97 | 1,02 | 34,62 | 37,66 |
| 2 | 37,48 | 24,40 | 1,08 | 34,89 | 37,76 |
| 3 | 28,69 | 18,82 | 1,07 | 34,41 | 38,13 |
| 4 | 28,40 | 18,45 | 1,10 | 35,04 | 38,91 |
| 5 | 43,17 | 29,40 | 1,17 | 31,90 | 34,61 |
| 6 | 43,87 | 29,44 | 1,04 | 32,89 | 35,25 |
| 7 | 43,36 | 30,56 | 1,17 | 29,52 | 32,23 |
| 8 | 43,02 | 29,44 | 1,09 | 31,56 | 34,10 |
| 9 | 43,06 | 29,28 | 0,91 | 32,00 | 34,11 |
| 10 | 43,14 | 29,00 | 1,08 | 32,77 | 35,29 |
| 11 | 43,92 | 28,90 | 1,12 | 34,22 | 36,76 |
| 12 | 44,76 | 30,57 | 1,05 | 31,70 | 34,05 |
| 13 | 43,72 | 29,73 | 1,03 | 32,00 | 34,36 |
| 14 | 27,11 | 17,57 | 1,21 | 35,20 | 39,68 |
| 15 | 43,27 | 26,55 | 1,11 | 38,64 | 41,20 |
| 16 | 22,18 | 14,28 | 1,57 | 35,62 | 42,68 |
| 17 | 23,78 | 12,01 | 1,56 | 49,50 | 56,05 |
| 18 | 32,65 | 19,35 | 1,18 | 40,74 | 44,35 |
| 19 | 43,62 | 24,43 | 1,51 | 44,00 | 47,46 |
| 20 | 33,45 | 21,20 | 1,33 | 36,62 | 40,61 |
| 21 | 33,09 | 17,97 | 1,39 | 45,69 | 49,89 |
| 22 | 22,40 | 11,80 | 2,03 | 47,32 | 56,39 |
| moy | | | | 36.14 | 39.87 |

Les pertes d'eau de la couche superficielle du sol représentent la moyenne de 3.72 % de quantité de l'eau sortant des asperseurs.

IV.6.1 Régression multiple linéaire des pertes d'eau de la couche superficielle du sol

L'analyse de la régression entre les pertes d'eau de la couche superficielle du sol et les paramètres climatiques nous permettent de proposer les modèles suivants :

$$Esol (\%) = 0.004 \cdot T + 0.015 \cdot V + 0.136 \quad (IV.5)$$

Avec $R^2 = 0.681$, $RMSE = 0.029$, $MAE = 0.004$.

La température de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres significatifs déterminant dans les pertes d'eau de la couche superficielle du sol, Selon le tableau (IV.20).

Tableau (IV.20). Paramètres statistiques de la régression des pertes d'eau de la couche superficielle du sol

| modèle | | coefficient | SE | Beta | t | sig |
|---------------------|----------|-------------|-------|-------|-------|-------|
| Bloc B 18m x 18m | Constant | 0.136 | 0.017 | - | 7.821 | 0.000 |
| | T | 0.004 | 0.001 | 0.625 | 4.266 | 0.000 |
| | V | 0.015 | 0.007 | 0.298 | 2.034 | 0.055 |

IV.7 Suivi de développement de la luzerne :

Cet axe de travail pour objectif de connaître l'interaction entre la performance d'irrigation et le rendement des cultures(luzerne). Pour réaliser ce travail, il faut assurer la dose nécessaire aux plantes pendant le développement. En raison de dommages répétés au niveau du réseau d'irrigation et de pompe, ainsi que des coupures d'électricité, Cela a affecté négativement la croissance de la luzerne, nous avons donc adopté pour ne pas analyser les résultats obtenus en raison de l'inutilité.

Conclusion :

Les résultats pour les différents essais démontrent que les petits espacements entre des asperseurs améliorent la distribution de l'eau dans la parcelle. Le coefficient d'uniformité moyen :

- pour l'espacement entre les asperseurs 12m x 18 m est de l'ordre de 78.57% pour le bloc A et 79.36% pour le bloc B pour les vitesses du vent inférieures de 2m /s, et de 65.41% pour le bloc A et 65.33% pour le bloc B pour les vitesses du vent supérieures de 2m /s.

- pour l'espacement entre les asperseurs 18m x 18 m est de l'ordre de 70.49% pour le bloc A et 71.36% pour le bloc B pour les vitesses du vent inférieures de 2m /s, et de 52.27% pour le bloc A et 49.49% pour le bloc B pour les vitesses du vent supérieures de 2m /s.

Pendant l'irrigation intensive de mois d'Avril jusqu'au mois de Septembre, la température de l'air varie de 19 à 41 C°, la vitesse du vent oscille entre 1.4 et 4 .5 m/s et l'humidité de l'air allant de 19 à 46 %, ces paramètres influent significativement sur les pertes globales par évaporation à partir du nuage des gouttelettes et entrainement par le vent.

L'irrigation au moment des vitesses de vent faible offre une bonne distribution de l'eau dans la parcelle et moins de pertes d'eau par évaporation à partir du nuage des gouttelettes et entrainement par le vent. On observe que pour l'espacement entre les asperseurs 12m x 18 m des pertes globales sont plus faibles que l'espacement 18m x 18 m.

On registre la valeur moyenne des pertes d'eau globale par évaporation à partir des nuages des gouttelettes et entrainement par le vent : pour l'espacement entre les asperseurs 18x18m, est égale à 36.07% et 38.6% respectivement pour le bloc A et bloc B, pour l'espacement entre les asperseurs 12x18m la valeur moyenne est égale à 34.57 en bloc A et 37.62 en bloc B.

La différence entre les pertes d'eau globales par évaporation à partir des nuages des gouttelettes et entrainement par le vent :

- Dans les deux blocs A et B, pour l'espacement entre les asperseurs 18x18m est égale à 2.53% et 3.03% pour l'espacement 12x18m.
- Dans les deux espacements entre les asperseurs 18X18m et 12X18m pour le même bloc, est égale à 1.5% pour le bloc A et 1% pour le bloc B

La tentative de définir les pertes d'eau à partir de la couche superficielle du sol (10cm), au niveau du bloc B, et pour l'espacement entre les asperseurs 18m x 18 m, a donné comme résultat une moyenne d'évaporation de 3.72 % de débit d'eau des asperseurs.

L'augmentation des nombres des rampes et la diminution des espacements entre les asperseurs sur la surface irriguée sont des facteurs déterminants pour la diminution des pertes par évaporation à partir des nuages des gouttelettes et entrainement par le vent.

Conclusion générales

Conclusion générales

Dans les régions arides à l'exemple de la vallée d'Oued Righ la pluviométrie est très faible, l'irrigation est un facteur nécessaire et obligatoire pour assurer un développement optimal des cultures.

La région d'Oued Righ est caractérisée en particulier pendant la période entre les mois d'Avril et Septembre par des températures très élevées, des vitesses de vents peuvent atteindre à 4.6 m/s et des humidités inférieures à 50 %, ce qui entraîne une évaporation d'eau très élevées.

Le volume des ressources en eau mobilisées à Oued Righ est environ de 389 Hm³ /an, dont 90 % sont destinés pour l'irrigation d'une superficie de 35755 ha dont 1048 ha irriguées par aspersion.

Les conditions agro-climatiques affectent considérablement les performances de la technique d'irrigation par aspersion, par le fait qu'ils entraînent des pertes d'eau à partir du nuage de pluie, par entraînement au-delà des limites du périmètre irrigué et par évaporation à partir de 10 à 15 cm du sol après l'arrêt de l'irrigation. L'expérience mondiale montre que les pertes d'eau globale dans la technique d'irrigation par aspersion dans les conditions arides et semi-arides peuvent atteindre 2% à 40% de la dose d'arrosage ce qui affecte négativement l'humidité du sol et le rendement de la culture agricole.

La qualité du processus d'irrigation par aspersion est évaluée par l'intensité pluviométrique, la grosseur de la goutte de pluie, l'uniformité de la répartition de la pluie, les pertes d'eau par évaporation à partir du nuage des gouttelettes et entraînement par le vent et la dose d'arrosage effective, les facteurs climatiques tels que les températures de l'air et les vitesses de vent élevées et les humidités de l'air qui provoquent les pertes d'eau globales par évaporation à partir du nuage des gouttelettes et entraînement par le vent.

Sur notre site expérimentale à savoir « l'Institut National de Recherche Agricole d'Algérie (INRAA), station expérimentale de Touggourt », pendant la saison intensive de l'irrigation de mois d'Avril jusqu'au mois de Septembre, la température de l'air varie de 19 à 41 C°, la vitesse du vent oscille entre 1.4 et 4.5 m/s et l'humidité de l'air allant de 19 à 46 %, ces paramètres influent significativement sur les pertes globales d'eau par évaporation à partir du nuage des gouttelettes et entraînement par le vent.

Les résultats pour les différents essais démontrent que l'irrigation au moment des vitesses de vents entre 1m/s et 3.6 m/s nous donnent :

- Pour l'espacement entre les asperseurs 12m x 18 m, CU est de l'ordre 73.48% et Eev+v est égale à 34.57 % pour le bloc A ; CU est de l'ordre 75.23% et Eev+v est égale à 37.62 % pour le bloc B.
- Pour l'espacement entre les asperseurs 18m x 18 m, CU est de l'ordre 50% et Eev+v est égale à 36.07 % et pour le bloc A ; CU est de l'ordre 59.6% et Eev+v est égale à 38.6 % et pour le bloc B.

L'augmentation des nombres des rampes et la diminution des espacements entre les asperseurs sur la surface irriguée contribuent à une diminution par conséquent des pertes par évaporation à partir des nuages des gouttelettes et entrainement par le vent.

La tentative de définir les pertes d'eau à partir de la couche superficielle du sol (10cm), au niveau du bloc B, et pour l'espacement entre les asperseurs 18m x 18 m, a donné comme résultat une moyenne d'évaporation de 3.72 % de débit d'eau des asperseurs.

Les résultats de ce travail montrent la nécessité de développer d'autres travaux de recherches dans le domaine de l'irrigation par aspersion, pour arriver à déterminer le nombre de rampes, le type d'asperseurs, les espacements entre les asperseurs et la hauteur de canne qui permettront dans les conditions agro climatiques de Sahara à minimiser au maximum les pertes d'eau globales par évaporation à partir des nuages des gouttelettes et entrainement par le vent.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références

- [1] MADRP,2019.Ministère de l’Agriculture du Développement Rural et de la Pêche. <<http://madrp.gov.dz/agriculture/irrigation/developpement-de-lirrigation/>>.(Consulted on 08-09-2019, 14:00).
- [2] UNESCO., 1972 : Etude des ressources en eau du Sahara Septentrional (Etude ERESS). Rapport Technique 6,44pp.
- [3] OSS, 2003,SYSTEME AQUIIFEREDU SAHARASEPTENTRIONAL,2^{eme} édition HYDROGEOLOGIE, VOLUME II- JUIN 2003 –
- [4] <http://lechodalgerie-dz.com/agriculture-lalgerie-objectif-2-millions-dhectares-de-terres-agricoles-irriguees-dici-a-2020/>
- [5] CIHEAM-IAMM. Centre de Documentation Méditerranéen CIHEAM-IAMM.<https://www.iamm.ciheam.org/ress_doc/opac_css/index.php?lvl=notice_display&id=30799>.(Consulted on 11.04.2020; 13:00).
- [6] DUBOST D., 1992 ;; Ecologie, Aménagement et développement Agricole des Oasis Algériennes. 423 p. Edition CRSTRA 2002, N° Dépôt légal ; 1092-2002.
- [7] ONM, 2018.Office national de météorologie, station de Touggourt.
- [8] BAGF, 1926. Bulletin de l'Association de géographes français, N°9, 3e année, mai 1926.
- [9] https://pdfprof.com/DownloadPDF.php?pdf=http://www.riob.org/IMG/pdf/DAKAR_defi.pdf&title=%20Ressources%20en%20eau%20souterraines%20au%20Sahara%20Alg%C3%A9rien%20-%20RIOB&url=https://pdfprof.com/PDF_Doc_Telecharger_Gratuits.php?q=-8PDF17271-rofondeur%20de%20la%20nappe%20albienne%20algerie&titre=T%C3%A9l%C3%A9charger%20profondeur%20de%20la%20nappe%20albienne%20algerie%20Gratuit.
- [10] SOGREAH, (1971): Participation à la mise en valeur de l’Oued Righ. Etude agropédologique , Doc. Poly .MTPC.Alger pp7-36.
- [11] TOUTAIN. G : « Eléments d’agronomie saharienne », Paris, INRA,1977.
- [12] DSA BISKRA ,2018 . Direction des services agricoles. Rapport final sur le secteur agricole.
- [13] DSA EL OUED ,2018. Direction des services agricoles. Rapport final sur le secteur agricole.
- [14] DSA OUARGLA ,2018. Direction des services agricoles. Rapport final sur le secteur agricole.

- [15] MADR ,2001. RECENSEMENT GENERAL DE L'AGRICULTURE – 2001, Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural.
- [16] Jean-Robert T.,Alain V. Traité d'irrigation. Tec et Doc.Lavoisier.2006.
- [17] Charles O , Poirée M. Irrigation, les réseaux d'irrigation théorie ,technique et économie des arrosages.Eyrolles.1983.
- [18] Clément M.,PaulA.,Jean Claude C. Bases techniques de l'irrigation par aspersion. Tec et Doc Lavoisier,PC Paris.2007
- [19] Chtepa B.J et al .,1990.Traité de mécanisation des arrosages.Edition agro promisad,Moscow.
- [20] Sapounkov A. P. 1991.Utilisation de la technique d'aspersion, Agropronizdat. Moscow.
- [21] Danil tchenkov N.V. 1983.Irrigation par aspersion en régions oasis à l'aide des eaux souterraines. Moscow, Russie.
- [22] Christiansen J.E., 1942.Irrigation by sprinkling. California Agric. University of California. Agric. Exp. Sta. Bulletin,670, Berkeley, Etats-Unis.
- [23] Merriam J.L., Keller J., 1978.Farm Irrigation System Evaluation. Utah State University,Logan. Utah, USA.
- [24] Frost, K.R., Schwalen, H.C.,Sprinkler evaporation losses.Agricultural.Transactions of the ASAE 3. 1955. Page: 526-528.
- [24] Hart W.E., Raynolds W.N., 1965.Analytical design of sprinkle systems. ASAE Transaction. Page: 83, 85, 89.
- [26] Hart W.E., Peri G., Skogerboe G.V., 1979.Irrigation Performance - an evaluation. Trans ASAE 5(4). Page: 275, 288.
- [27] Heermann D. F., Wallander W.W., Bos M.G., 1990.Irrigation efficiency and uniformity, Etats-Unis. Page: 125, 149.
- [28] Wolters W., 1992.Influences on the Efficiency of Irrigation Water Use. JLRI Publication n° 51, JLRI,Wageningen, Pays-Bas.
- [29] Letey J., Vaux H.J., Feinerman E., 1984.Optimum crop water application as affected by uniformity of water infiltration. Agron. J.Page: 435-441.
- [30] Hermsmeier, L.F., 1973. Evaporation during sprinkler application in a dessert climate. ASAE Paper No. 73–216.ASAE, St. Joseph, MI, USA.

- [31] ARSHAD ALI S.M., BAREFOOT A.D. "Low trajectory sprinkler patterns and evaporation". ASAE paper, 1982, n°81-2085, p. 189-196.
- [32] ZAKH . Technique d'irrigation des cultures / V. Ya Chichasov [et al.]. - M .:Kolos, 1970. - 267 p.
- [33] Fedorenko, I. D. À propos de l'évaporation de l'eau lors de l'aspersion et de sa dépendance au diamètre des gouttes de pluie // Actes de VNIIGiM. - M., 1938. - V. 22. - P. 68–78.
- [34] Yazar, A. Evaporation and drift losses from sprinkler irrigation systems under various operating condition. Agricultural Water Management, v.8, p.439-449, 1984.
- [35] Kohl, K. D.; Kohl, R. A.; DeBoer, D. W. Measurement of low pressure sprinkler evaporation loss. Transactions of the ASAE, v.30, p.1.071-1.074, 1987.
- [36] Kincaid, D. C.; Solomon, K. H.; Oliphant, J. C. Drop size distributions for irrigation sprinklers. Transactions of the ASAE, v.39, p.839-845, 1996.
- [37] Robinson, Frank E., 1973. Increase in Conductivity of Irrigation Water during Sprinkling. Agronomy Journal, Page: 130.
- [38] McLean R.K., SRI Ranjan R. et Klassen., 2000. Spray evaporation losses from sprinkler irrigation systems. Canadian agricultural engineering
- [39] KARPOVA O V, 2017. DISPOSITIFS AMÉLIORÉS PLUIE DE SURFACE MACHINE À DOUBLE VOIES, Thèse pour le diplôme Candidat des sciences techniques, Établissement d'enseignement fédéral Enseignement supérieur "Université agraire d'État de Saratov à eux. N.I. Vavilova.
- [40] Slyusarenkov V.V., Ryzhko N.F., 2009. ПОТЕРИ ВОДЫ НА ИСПАРЕНИЕ И СНОС ПРИ ПОЛИВЕ ДОЖДЕВАНИЕМ И СПОСОБЫ ИХ СНИЖЕНИЯ [Dérive du vent et pertes par évaporation de l'eau lorsqu'il pleut et moyens de la réduire]. Нива Поволжья. № 1 (10) февраль 2009.
- [41] Dechmi (2003), Wind effects on solid set sprinkler irrigation depth and yield of maize (Zea mays), IrrigSci (2003) 22: 67–77
- [42] Tarjuelo ,1999. Modelling evaporation and drift losses in irrigation with medium size impact sprinklers under semi-arid conditions, Agricultural Water Management 43 (2000) 263-284.

- [43] Tarjuelo JM, Carrión P, Valiente M (1994). Simulación de la distribución del riego por aspersión en condiciones de viento. In: investigación agraria. Prod Pro Veg 9. Page: 263
- [44] Playán, E.; Salvador, R.; Faci, J.M.; Zapata, N.; Martínez-Cob, A.; Sánchez, I. Day and night wind drift and evaporation losses in sprinkler solid-sets and moving laterals. *Agricultural Water Management*, v.76, p.139-159, 2005.
- [45] Beskow, 2011. Modelagem das perdas de água por evaporação e arraste em aspersores de média pressão. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* v.15, n.3, p.221–228, 2011
- [46] Yacoubi (2012) Assessing Sprinkler Irrigation Performance Using Field Evaluations at the Medjerda Lower Valley of Tunisia, *Engineering*, 2012, 4, 682-691
- [47] Spurgeon, WE, Thompson T.L. and Gilley J.R., 1983. Irrigation management using hourly spray evaporation loss estimates. *ASAE*.
- [48] Steiner J.L., Kanemasu E.T., Clark R.N., 1983. Spray losses and portioning of water under center pivot sprinkler system. *Transaction of the ASAE*. Page: 1128-1134
- [49] Thompson A. L., Gilley J. R., Norman J.M., 1993. A Sprinkler Water Droplet Evaporation and Plant Canopy Mode II. *ASAE*. Page: 735-741.
- [50] Bavi A.; et al. Evaporation losses from sprinkler irrigation systems under various operating conditions, *Journal of applied sciences* 9(3):597-600, 2009
- [51] Nadezhkina G P, 2014. AMÉLIORATION DES DISPOSITIFS DE SURFACE FRIGATE PLUIE MACHINE, thèse pour le diplôme Candidat des sciences techniques, établissement d'enseignement professionnel supérieur "Etat Saratov Université Agricole. N.I. Vavilova
- [52] Keller, J., Bliesner, R.D. 1990. *Sprinkler and Trickle Irrigation*. Van Nostrand Reinhold, New York, NY, USA.
- [53] Montero J, Tarjuelo J.M., Carrión P, 2003. Sprinkler droplet size distribution measured with an optical spectropuviometer. *Irrig. Sci.* 22 (2), 47–56.
- [54] Robles O., Playan E., Cavero J., Zapata N., Assessing low-pressure solid-set sprinkler irrigation in maize. *Agricultural Water Management*. Volume 191, September 2017, pages 37-49.
- [55] B. Bouselsal, 2017. GROUNDWATER QUALITY IN ARID REGIONS: THE CASE OF HASSI MESSAOUD REGION (SE ALGERIA), *Journal of Fundamental and Applied Sciences*. *J Fundam Appl Sci.* 2017, 9(1), 528-541.

[56] Riou C. 1971. Evaporation en bac et évapotranspiration potentielle : Expression de l'évaporation d'une petite nappe d'eau en fonction des données sous abri. Bulletin of the International Association of Scientific Hydrology, XVI, 2.6, pp. 53-65.

[57] ISO 11545: 1995. Agricultural irrigation equipment — Centre-pivot and moving lateral irrigation machines with sprayer or sprinkler nozzles — Determination of uniformity of water distribution.

[58] Bowerman, B.L., O'Connell, R.T. and Koehler, A.B. (2005). Forecasting, time series and regression. 4th ed. United States of America: Brooks/Cole Thomson Learning Inc.

[59] Levinm R.I. and Rubin, D.S. (1994). Statistics for management. 6th ed. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall.

[60] Andy, F. (2005). Discovering statistics using SPSS: (and sex, drugs and rock 'n' roll). London: SAGE.

61[61] MAROUFPOOR E., SANIKHANI H., EMAMGHOLIZADEH S., KIŞI Ö.,2018.ESTIMATION OF WIND DRIFT AND EVAPORATION LOSSES FROM SPRINKLER IRRIGATION SYSTEMS BY DIFFERENT DATA-DRIVEN METHODS, Irrig. and Drain. 67: 222–232 (2018).

[62] Legates DR, McCabe GJ. (1999). Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. Water Resources Research 35(1): 233–241.

[63] Willmott, C.J., Matsuura, K., 2005. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. Climate Res. 30, 79–82.

[64] <https://mtes-mct.github.io/parcours-r/m3/tests.html>.

ANNEXES

Annexe 2 :

Exemple de calcul des intensités de pluies à bloc A

| Vi(ml) | Hi(mm) | Ii(mm/h) | hi-hm | ABS (hi-hm) | = ABS (hi-hm)/(N*hm) |
|--------|--------|----------|---------|-------------|----------------------|
| 0 | 0 | 0 | -7,689 | 7,689 | 0,003676 |
| 13 | 1,656 | 0,82803 | -6,0329 | 6,033 | 0,002885 |
| 32 | 4,076 | 2,03822 | -3,6126 | 3,613 | 0,001727 |
| 6 | 0,764 | 0,38217 | -6,9247 | 6,925 | 0,003311 |
| 32 | 4,076 | 2,03822 | -3,6126 | 3,613 | 0,001727 |
| 7 | 0,892 | 0,44586 | -6,7973 | 6,797 | 0,00325 |
| 27 | 3,439 | 1,71975 | -4,2495 | 4,25 | 0,002032 |
| 7 | 0,892 | 0,44586 | -6,7973 | 6,797 | 0,00325 |
| 23 | 2,93 | 1,46497 | -4,7591 | 4,759 | 0,002276 |
| 8 | 1,019 | 0,50955 | -6,6699 | 6,67 | 0,003189 |
| 40 | 5,096 | 2,54777 | -2,5935 | 2,593 | 0,00124 |
| 60 | 7,643 | 3,82166 | -0,0457 | 0,046 | 2,18E-05 |
| 56 | 7,134 | 3,56688 | -0,5552 | 0,555 | 0,000265 |
| 40 | 5,096 | 2,54777 | -2,5935 | 2,593 | 0,00124 |
| 44 | 5,605 | 2,80255 | -2,0839 | 2,084 | 0,000996 |
| 56 | 7,134 | 3,56688 | -0,5552 | 0,555 | 0,000265 |
| 48 | 6,115 | 3,05732 | -1,5744 | 1,574 | 0,000753 |
| 56 | 7,134 | 3,56688 | -0,5552 | 0,555 | 0,000265 |
| 52 | 6,624 | 3,3121 | -1,0648 | 1,065 | 0,000509 |
| 70 | 8,917 | 4,4586 | 1,2282 | 1,228 | 0,000587 |
| 29 | 3,694 | 1,84713 | -3,9947 | 3,995 | 0,00191 |
| 86 | 10,96 | 5,47771 | 3,26641 | 3,266 | 0,001562 |
| 120 | 15,29 | 7,64331 | 7,59762 | 7,598 | 0,003633 |
| 110 | 14,01 | 7,00637 | 6,32374 | 6,324 | 0,003024 |
| 80 | 10,19 | 5,09554 | 2,50208 | 2,502 | 0,001196 |
| 96 | 12,23 | 6,11465 | 4,5403 | 4,54 | 0,002171 |
| 102 | 12,99 | 6,49682 | 5,30463 | 5,305 | 0,002536 |
| 102 | 12,99 | 6,49682 | 5,30463 | 5,305 | 0,002536 |
| 122 | 15,54 | 7,7707 | 7,8524 | 7,852 | 0,003755 |
| 90 | 11,46 | 5,73248 | 3,77597 | 3,776 | 0,001805 |
| 80 | 10,19 | 5,09554 | 2,50208 | 2,502 | 0,001196 |
| 68 | 8,662 | 4,33121 | 0,97342 | 0,973 | 0,000465 |
| 86 | 10,96 | 5,47771 | 3,26641 | 3,266 | 0,001562 |
| 0 | 0 | 0 | -7,689 | 7,689 | 0,003676 |
| 11 | 1,401 | 0,70064 | -6,2877 | 6,288 | 0,003006 |

| | | | | | |
|-----|-------|---------|---------|-------|----------|
| 62 | 7,898 | 3,94904 | 0,20909 | 0,209 | 1E-04 |
| 70 | 8,917 | 4,4586 | 1,2282 | 1,228 | 0,000587 |
| 76 | 9,682 | 4,84076 | 1,99253 | 1,993 | 0,000953 |
| 104 | 13,25 | 6,6242 | 5,55941 | 5,559 | 0,002658 |
| 78 | 9,936 | 4,96815 | 2,24731 | 2,247 | 0,001075 |
| 62 | 7,898 | 3,94904 | 0,20909 | 0,209 | 1E-04 |
| 105 | 13,38 | 6,6879 | 5,6868 | 5,687 | 0,002719 |
| 70 | 8,917 | 4,4586 | 1,2282 | 1,228 | 0,000587 |
| 74 | 9,427 | 4,71338 | 1,73775 | 1,738 | 0,000831 |
| 90 | 11,46 | 5,73248 | 3,77597 | 3,776 | 0,001805 |
| 64 | 8,153 | 4,07643 | 0,46387 | 0,464 | 0,000222 |
| 17 | 2,166 | 1,0828 | -5,5234 | 5,523 | 0,002641 |
| 22 | 2,803 | 1,40127 | -4,8865 | 4,886 | 0,002336 |
| 92 | 11,72 | 5,85987 | 4,03075 | 4,031 | 0,001927 |
| 108 | 13,76 | 6,87898 | 6,06896 | 6,069 | 0,002902 |
| 92 | 11,72 | 5,85987 | 4,03075 | 4,031 | 0,001927 |
| 106 | 13,5 | 6,75159 | 5,81418 | 5,814 | 0,00278 |
| 112 | 14,27 | 7,13376 | 6,57852 | 6,579 | 0,003145 |
| 116 | 14,78 | 7,38854 | 7,08807 | 7,088 | 0,003389 |
| 88 | 11,21 | 5,6051 | 3,52119 | 3,521 | 0,001684 |
| 70 | 8,917 | 4,4586 | 1,2282 | 1,228 | 0,000587 |
| 114 | 14,52 | 7,26115 | 6,83329 | 6,833 | 0,003267 |
| 80 | 10,19 | 5,09554 | 2,50208 | 2,502 | 0,001196 |
| 76 | 9,682 | 4,84076 | 1,99253 | 1,993 | 0,000953 |
| 60 | 7,643 | 3,82166 | -0,0457 | 0,046 | 2,18E-05 |
| 11 | 1,401 | 0,70064 | -6,2877 | 6,288 | 0,003006 |
| 40 | 5,096 | 2,54777 | -2,5935 | 2,593 | 0,00124 |
| 64 | 8,153 | 4,07643 | 0,46387 | 0,464 | 0,000222 |
| 51 | 6,497 | 3,24841 | -1,1922 | 1,192 | 0,00057 |
| 60 | 7,643 | 3,82166 | -0,0457 | 0,046 | 2,18E-05 |
| 48 | 6,115 | 3,05732 | -1,5744 | 1,574 | 0,000753 |
| 60 | 7,643 | 3,82166 | -0,0457 | 0,046 | 2,18E-05 |
| 43 | 5,478 | 2,73885 | -2,2113 | 2,211 | 0,001057 |
| 31 | 3,949 | 1,97452 | -3,74 | 3,74 | 0,001788 |
| 56 | 7,134 | 3,56688 | -0,5552 | 0,555 | 0,000265 |
| 44 | 5,605 | 2,80255 | -2,0839 | 2,084 | 0,000996 |
| 70 | 8,917 | 4,4586 | 1,2282 | 1,228 | 0,000587 |
| 58 | 7,389 | 3,69427 | -0,3005 | 0,3 | 0,000144 |
| 54 | 6,879 | 3,43949 | -0,81 | 0,81 | 0,000387 |
| 54 | 6,879 | 3,43949 | -0,81 | 0,81 | 0,000387 |

| | | | | | |
|-----|-------|---------|---------|-------|----------|
| 50 | 6,369 | 3,18471 | -1,3196 | 1,32 | 0,000631 |
| 0 | 0 | 0 | -7,689 | 7,689 | 0,003676 |
| 20 | 2,548 | 1,27389 | -5,1412 | 5,141 | 0,002458 |
| 46 | 5,86 | 2,92994 | -1,8291 | 1,829 | 0,000875 |
| 76 | 9,682 | 4,84076 | 1,99253 | 1,993 | 0,000953 |
| 42 | 5,35 | 2,67516 | -2,3387 | 2,339 | 0,001118 |
| 58 | 7,389 | 3,69427 | -0,3005 | 0,3 | 0,000144 |
| 41 | 5,223 | 2,61146 | -2,4661 | 2,466 | 0,001179 |
| 53 | 6,752 | 3,3758 | -0,9374 | 0,937 | 0,000448 |
| 28 | 3,567 | 1,78344 | -4,1221 | 4,122 | 0,001971 |
| 58 | 7,389 | 3,69427 | -0,3005 | 0,3 | 0,000144 |
| 112 | 14,27 | 7,13376 | 6,57852 | 6,579 | 0,003145 |
| 92 | 11,72 | 5,85987 | 4,03075 | 4,031 | 0,001927 |
| 132 | 16,82 | 8,40764 | 9,12629 | 9,126 | 0,004364 |
| 90 | 11,46 | 5,73248 | 3,77597 | 3,776 | 0,001805 |
| 82 | 10,45 | 5,22293 | 2,75686 | 2,757 | 0,001318 |
| 92 | 11,72 | 5,85987 | 4,03075 | 4,031 | 0,001927 |
| 100 | 12,74 | 6,36943 | 5,04985 | 5,05 | 0,002415 |
| 104 | 13,25 | 6,6242 | 5,55941 | 5,559 | 0,002658 |
| 100 | 12,74 | 6,36943 | 5,04985 | 5,05 | 0,002415 |
| 82 | 10,45 | 5,22293 | 2,75686 | 2,757 | 0,001318 |
| 100 | 12,74 | 6,36943 | 5,04985 | 5,05 | 0,002415 |
| 0 | 0 | 0 | -7,689 | 7,689 | 0,003676 |
| 14 | 1,783 | 0,89172 | -5,9056 | 5,906 | 0,002824 |
| 86 | 10,96 | 5,47771 | 3,26641 | 3,266 | 0,001562 |
| 62 | 7,898 | 3,94904 | 0,20909 | 0,209 | 1E-04 |
| 88 | 11,21 | 5,6051 | 3,52119 | 3,521 | 0,001684 |
| 100 | 12,74 | 6,36943 | 5,04985 | 5,05 | 0,002415 |
| 82 | 10,45 | 5,22293 | 2,75686 | 2,757 | 0,001318 |
| 54 | 6,879 | 3,43949 | -0,81 | 0,81 | 0,000387 |
| 70 | 8,917 | 4,4586 | 1,2282 | 1,228 | 0,000587 |
| 130 | 16,56 | 8,28025 | 8,87151 | 8,872 | 0,004242 |
| 76 | 9,682 | 4,84076 | 1,99253 | 1,993 | 0,000953 |
| 90 | 11,46 | 5,73248 | 3,77597 | 3,776 | 0,001805 |
| 60 | 7,643 | 3,82166 | -0,0457 | 0,046 | 2,18E-05 |
| 20 | 2,548 | 1,27389 | -5,1412 | 5,141 | 0,002458 |
| 14 | 1,783 | 0,89172 | -5,9056 | 5,906 | 0,002824 |
| 70 | 8,917 | 4,4586 | 1,2282 | 1,228 | 0,000587 |
| 80 | 10,19 | 5,09554 | 2,50208 | 2,502 | 0,001196 |
| 96 | 12,23 | 6,11465 | 4,5403 | 4,54 | 0,002171 |

| | | | | | |
|-----|-------|---------|---------|-------|----------|
| 78 | 9,936 | 4,96815 | 2,24731 | 2,247 | 0,001075 |
| 88 | 11,21 | 5,6051 | 3,52119 | 3,521 | 0,001684 |
| 76 | 9,682 | 4,84076 | 1,99253 | 1,993 | 0,000953 |
| 78 | 9,936 | 4,96815 | 2,24731 | 2,247 | 0,001075 |
| 88 | 11,21 | 5,6051 | 3,52119 | 3,521 | 0,001684 |
| 100 | 12,74 | 6,36943 | 5,04985 | 5,05 | 0,002415 |
| 90 | 11,46 | 5,73248 | 3,77597 | 3,776 | 0,001805 |
| 90 | 11,46 | 5,73248 | 3,77597 | 3,776 | 0,001805 |
| 76 | 9,682 | 4,84076 | 1,99253 | 1,993 | 0,000953 |
| 10 | 1,274 | 0,63694 | -6,4151 | 6,415 | 0,003067 |
| 50 | 6,369 | 3,18471 | -1,3196 | 1,32 | 0,000631 |
| 60 | 7,643 | 3,82166 | -0,0457 | 0,046 | 2,18E-05 |
| 36 | 4,586 | 2,29299 | -3,103 | 3,103 | 0,001484 |
| 53 | 6,752 | 3,3758 | -0,9374 | 0,937 | 0,000448 |
| 34 | 4,331 | 2,16561 | -3,3578 | 3,358 | 0,001606 |
| 50 | 6,369 | 3,18471 | -1,3196 | 1,32 | 0,000631 |
| 26 | 3,312 | 1,65605 | -4,3769 | 4,377 | 0,002093 |
| 30 | 3,822 | 1,91083 | -3,8673 | 3,867 | 0,001849 |
| 52 | 6,624 | 3,3121 | -1,0648 | 1,065 | 0,000509 |
| 50 | 6,369 | 3,18471 | -1,3196 | 1,32 | 0,000631 |
| 49 | 6,242 | 3,12102 | -1,447 | 1,447 | 0,000692 |
| 50 | 6,369 | 3,18471 | -1,3196 | 1,32 | 0,000631 |
| 54 | 6,879 | 3,43949 | -0,81 | 0,81 | 0,000387 |
| 52 | 6,624 | 3,3121 | -1,0648 | 1,065 | 0,000509 |
| 66 | 8,408 | 4,20382 | 0,71864 | 0,719 | 0,000344 |
| 0 | 0 | 0 | -7,689 | 7,689 | 0,003676 |
| 38 | 4,841 | 2,42038 | -2,8482 | 2,848 | 0,001362 |
| 27 | 3,439 | 1,71975 | -4,2495 | 4,25 | 0,002032 |
| 42 | 5,35 | 2,67516 | -2,3387 | 2,339 | 0,001118 |
| 18 | 2,293 | 1,1465 | -5,396 | 5,396 | 0,00258 |
| 54 | 6,879 | 3,43949 | -0,81 | 0,81 | 0,000387 |
| 46 | 5,86 | 2,92994 | -1,8291 | 1,829 | 0,000875 |
| 66 | 8,408 | 4,20382 | 0,71864 | 0,719 | 0,000344 |
| 28 | 3,567 | 1,78344 | -4,1221 | 4,122 | 0,001971 |
| 64 | 8,153 | 4,07643 | 0,46387 | 0,464 | 0,000222 |
| 84 | 10,7 | 5,35032 | 3,01164 | 3,012 | 0,00144 |
| 116 | 14,78 | 7,38854 | 7,08807 | 7,088 | 0,003389 |
| 82 | 10,45 | 5,22293 | 2,75686 | 2,757 | 0,001318 |
| 120 | 15,29 | 7,64331 | 7,59762 | 7,598 | 0,003633 |
| 122 | 15,54 | 7,7707 | 7,8524 | 7,852 | 0,003755 |

| | | | | | |
|-----|-------|---------|---------|-------|----------|
| 92 | 11,72 | 5,85987 | 4,03075 | 4,031 | 0,001927 |
| 114 | 14,52 | 7,26115 | 6,83329 | 6,833 | 0,003267 |
| 100 | 12,74 | 6,36943 | 5,04985 | 5,05 | 0,002415 |
| 60 | 7,643 | 3,82166 | -0,0457 | 0,046 | 2,18E-05 |
| 54 | 6,879 | 3,43949 | -0,81 | 0,81 | 0,000387 |
| 78 | 9,936 | 4,96815 | 2,24731 | 2,247 | 0,001075 |
| 0 | 0 | 0 | -7,689 | 7,689 | 0,003676 |
| 22 | 2,803 | 1,40127 | -4,8865 | 4,886 | 0,002336 |
| 64 | 8,153 | 4,07643 | 0,46387 | 0,464 | 0,000222 |
| 84 | 10,7 | 5,35032 | 3,01164 | 3,012 | 0,00144 |
| 60 | 7,643 | 3,82166 | -0,0457 | 0,046 | 2,18E-05 |
| 92 | 11,72 | 5,85987 | 4,03075 | 4,031 | 0,001927 |
| 96 | 12,23 | 6,11465 | 4,5403 | 4,54 | 0,002171 |
| 90 | 11,46 | 5,73248 | 3,77597 | 3,776 | 0,001805 |
| 94 | 11,97 | 5,98726 | 4,28552 | 4,286 | 0,002049 |
| 80 | 10,19 | 5,09554 | 2,50208 | 2,502 | 0,001196 |
| 80 | 10,19 | 5,09554 | 2,50208 | 2,502 | 0,001196 |
| 114 | 14,52 | 7,26115 | 6,83329 | 6,833 | 0,003267 |
| 54 | 6,879 | 3,43949 | -0,81 | 0,81 | 0,000387 |
| 14 | 1,783 | 0,89172 | -5,9056 | 5,906 | 0,002824 |
| 24 | 3,057 | 1,52866 | -4,6317 | 4,632 | 0,002215 |
| 76 | 9,682 | 4,84076 | 1,99253 | 1,993 | 0,000953 |
| 70 | 8,917 | 4,4586 | 1,2282 | 1,228 | 0,000587 |
| 114 | 14,52 | 7,26115 | 6,83329 | 6,833 | 0,003267 |
| 68 | 8,662 | 4,33121 | 0,97342 | 0,973 | 0,000465 |
| 80 | 10,19 | 5,09554 | 2,50208 | 2,502 | 0,001196 |
| 90 | 11,46 | 5,73248 | 3,77597 | 3,776 | 0,001805 |
| 70 | 8,917 | 4,4586 | 1,2282 | 1,228 | 0,000587 |
| 80 | 10,19 | 5,09554 | 2,50208 | 2,502 | 0,001196 |
| 94 | 11,97 | 5,98726 | 4,28552 | 4,286 | 0,002049 |
| 62 | 7,898 | 3,94904 | 0,20909 | 0,209 | 1E-04 |
| 56 | 7,134 | 3,56688 | -0,5552 | 0,555 | 0,000265 |
| 52 | 6,624 | 3,3121 | -1,0648 | 1,065 | 0,000509 |
| 13 | 1,656 | 0,82803 | -6,0329 | 6,033 | 0,002885 |
| 30 | 3,822 | 1,91083 | -3,8673 | 3,867 | 0,001849 |
| 48 | 6,115 | 3,05732 | -1,5744 | 1,574 | 0,000753 |
| 40 | 5,096 | 2,54777 | -2,5935 | 2,593 | 0,00124 |
| 50 | 6,369 | 3,18471 | -1,3196 | 1,32 | 0,000631 |
| 58 | 7,389 | 3,69427 | -0,3005 | 0,3 | 0,000144 |
| 58 | 7,389 | 3,69427 | -0,3005 | 0,3 | 0,000144 |

| | | | | | |
|-----|-------|---------|---------|-------|----------|
| 32 | 4,076 | 2,03822 | -3,6126 | 3,613 | 0,001727 |
| 22 | 2,803 | 1,40127 | -4,8865 | 4,886 | 0,002336 |
| 50 | 6,369 | 3,18471 | -1,3196 | 1,32 | 0,000631 |
| 33 | 4,204 | 2,10191 | -3,4852 | 3,485 | 0,001666 |
| 39 | 4,968 | 2,48408 | -2,7208 | 2,721 | 0,001301 |
| 46 | 5,86 | 2,92994 | -1,8291 | 1,829 | 0,000875 |
| 27 | 3,439 | 1,71975 | -4,2495 | 4,25 | 0,002032 |
| 49 | 6,242 | 3,12102 | -1,447 | 1,447 | 0,000692 |
| 42 | 5,35 | 2,67516 | -2,3387 | 2,339 | 0,001118 |
| 0 | 0 | 0 | -7,689 | 7,689 | 0,003676 |
| 66 | 8,408 | 4,20382 | 0,71864 | 0,719 | 0,000344 |
| 60 | 7,643 | 3,82166 | -0,0457 | 0,046 | 2,18E-05 |
| 45 | 5,732 | 2,86624 | -1,9565 | 1,957 | 0,000936 |
| 40 | 5,096 | 2,54777 | -2,5935 | 2,593 | 0,00124 |
| 30 | 3,822 | 1,91083 | -3,8673 | 3,867 | 0,001849 |
| 52 | 6,624 | 3,3121 | -1,0648 | 1,065 | 0,000509 |
| 4 | 0,51 | 0,25478 | -7,1794 | 7,179 | 0,003433 |
| 50 | 6,369 | 3,18471 | -1,3196 | 1,32 | 0,000631 |
| 122 | 15,54 | 7,7707 | 7,8524 | 7,852 | 0,003755 |
| 192 | 24,46 | 12,2293 | 16,7696 | 16,77 | 0,008018 |
| 90 | 11,46 | 5,73248 | 3,77597 | 3,776 | 0,001805 |
| 68 | 8,662 | 4,33121 | 0,97342 | 0,973 | 0,000465 |
| 86 | 10,96 | 5,47771 | 3,26641 | 3,266 | 0,001562 |
| 76 | 9,682 | 4,84076 | 1,99253 | 1,993 | 0,000953 |
| 72 | 9,172 | 4,58599 | 1,48297 | 1,483 | 0,000709 |
| 80 | 10,19 | 5,09554 | 2,50208 | 2,502 | 0,001196 |
| 70 | 8,917 | 4,4586 | 1,2282 | 1,228 | 0,000587 |
| 76 | 9,682 | 4,84076 | 1,99253 | 1,993 | 0,000953 |
| 23 | 2,93 | 1,46497 | -4,7591 | 4,759 | 0,002276 |
| 0 | 0 | 0 | -7,689 | 7,689 | 0,003676 |
| 10 | 1,274 | 0,63694 | -6,4151 | 6,415 | 0,003067 |
| 66 | 8,408 | 4,20382 | 0,71864 | 0,719 | 0,000344 |
| 98 | 12,48 | 6,24204 | 4,79508 | 4,795 | 0,002293 |
| 80 | 10,19 | 5,09554 | 2,50208 | 2,502 | 0,001196 |
| 114 | 14,52 | 7,26115 | 6,83329 | 6,833 | 0,003267 |
| 74 | 9,427 | 4,71338 | 1,73775 | 1,738 | 0,000831 |
| 76 | 9,682 | 4,84076 | 1,99253 | 1,993 | 0,000953 |
| 94 | 11,97 | 5,98726 | 4,28552 | 4,286 | 0,002049 |
| 140 | 17,83 | 8,9172 | 10,1454 | 10,15 | 0,004851 |
| 84 | 10,7 | 5,35032 | 3,01164 | 3,012 | 0,00144 |

| | | | | | |
|-----|-------|---------|---------|-------|----------|
| 94 | 11,97 | 5,98726 | 4,28552 | 4,286 | 0,002049 |
| 39 | 4,968 | 2,48408 | -2,7208 | 2,721 | 0,001301 |
| 3 | 0,382 | 0,19108 | -7,3068 | 7,307 | 0,003494 |
| 12 | 1,529 | 0,76433 | -6,1603 | 6,16 | 0,002946 |
| 45 | 5,732 | 2,86624 | -1,9565 | 1,957 | 0,000936 |
| 88 | 11,21 | 5,6051 | 3,52119 | 3,521 | 0,001684 |
| 100 | 12,74 | 6,36943 | 5,04985 | 5,05 | 0,002415 |
| 100 | 12,74 | 6,36943 | 5,04985 | 5,05 | 0,002415 |
| 76 | 9,682 | 4,84076 | 1,99253 | 1,993 | 0,000953 |
| 90 | 11,46 | 5,73248 | 3,77597 | 3,776 | 0,001805 |
| 58 | 7,389 | 3,69427 | -0,3005 | 0,3 | 0,000144 |
| 62 | 7,898 | 3,94904 | 0,20909 | 0,209 | 1E-04 |
| 98 | 12,48 | 6,24204 | 4,79508 | 4,795 | 0,002293 |
| 66 | 8,408 | 4,20382 | 0,71864 | 0,719 | 0,000344 |
| 82 | 10,45 | 5,22293 | 2,75686 | 2,757 | 0,001318 |
| 55 | 7,006 | 3,50318 | -0,6826 | 0,683 | 0,000326 |
| 8 | 1,019 | 0,50955 | -6,6699 | 6,67 | 0,003189 |
| 15 | 1,911 | 0,95541 | -5,7782 | 5,778 | 0,002763 |
| 60 | 7,643 | 3,82166 | -0,0457 | 0,046 | 2,18E-05 |
| 48 | 6,115 | 3,05732 | -1,5744 | 1,574 | 0,000753 |
| 11 | 1,401 | 0,70064 | -6,2877 | 6,288 | 0,003006 |
| 54 | 6,879 | 3,43949 | -0,81 | 0,81 | 0,000387 |
| 52 | 6,624 | 3,3121 | -1,0648 | 1,065 | 0,000509 |
| 6 | 0,764 | 0,38217 | -6,9247 | 6,925 | 0,003311 |
| 32 | 4,076 | 2,03822 | -3,6126 | 3,613 | 0,001727 |
| 54 | 6,879 | 3,43949 | -0,81 | 0,81 | 0,000387 |
| 17 | 2,166 | 1,0828 | -5,5234 | 5,523 | 0,002641 |
| 17 | 2,166 | 1,0828 | -5,5234 | 5,523 | 0,002641 |
| 2 | 0,255 | 0,12739 | -7,4342 | 7,434 | 0,003555 |
| 4 | 0,51 | 0,25478 | -7,1794 | 7,179 | 0,003433 |
| 27 | 3,439 | 1,71975 | -4,2495 | 4,25 | 0,002032 |
| 0 | 0 | 0 | -7,689 | 7,689 | 0,003676 |
| 32 | 4,076 | 2,03822 | -3,6126 | 3,613 | 0,001727 |
| 0 | 0 | 0 | -7,689 | 7,689 | 0,003676 |
| 3 | 0,382 | 0,19108 | -7,3068 | 7,307 | 0,003494 |
| 0 | 0 | 0 | -7,689 | 7,689 | 0,003676 |
| 0 | 0 | 0 | -7,689 | 7,689 | 0,003676 |
| | 0 | 0 | -7,943 | 7,943 | 0,003663 |
| moy | 7,689 | 3,84437 | | | 0,449067 |
| | | | | Cu | 55,09327 |

| | |
|----|----------|
| Qp | 13,28486 |
| Qa | 20,9775 |
| E | 36,67089 |
| v | 41,955 |

Annexe 3 : Régression multiple linéaire de Eev+v (bloc A ,18 m X 18m)

Statistiques descriptives

| | Moyenne | Ecart-type | N |
|-----------------|---------|------------|----|
| Perte totale | 33,0753 | 7,89927 | 25 |
| Température | 20,4468 | 8,78415 | 25 |
| Humidité | 41,3028 | 7,92723 | 25 |
| Vitesse du vent | 1,7860 | ,91253 | 25 |

Récapitulatif des modèles

| Modèle | R | R-deux | R-deux ajusté | Erreur standard de l'estimation |
|--------|-------------------|--------|---------------|---------------------------------|
| 1 | ,855 ^a | ,732 | ,720 | 4,17837 |
| 2 | ,903 ^b | ,816 | ,799 | 3,54059 |

a. Valeurs prédites : (constantes), Température

b. Valeurs prédites : (constantes), Température, Vitesse du vent

Coefficients

| Modèle | | Coefficients non standardisés | | Coefficients standardisés | t | Sig. |
|--------|-----------------|-------------------------------|-----------------|---------------------------|-------|------|
| | | A | Erreur standard | Bêta | | |
| 1 | (Constante) | 17,345 | 2,154 | | 8,053 | ,000 |
| | Température | ,769 | ,097 | ,855 | 7,923 | ,000 |
| 2 | (Constante) | 16,040 | 1,871 | | 8,572 | ,000 |
| | Température | ,543 | ,109 | ,604 | 4,981 | ,000 |
| | Vitesse du vent | 3,323 | 1,049 | ,384 | 3,167 | ,004 |

a. Variable dépendante : Perte totale

Variables exclues^a

| Modèle | | Bêta dans | t | Sig. | Corrélation partielle | Statistiques de colinéarité | | |
|--------|-----------------|--------------------|--------|------|-----------------------|-----------------------------|-------|--------------------|
| | | | | | | Tolérance | VIF | Tolérance minimale |
| 1 | Humidité | -,241 ^b | -1,465 | ,157 | -,298 | ,411 | 2,435 | ,411 |
| | Vitesse du vent | ,384 ^b | 3,167 | ,004 | ,560 | ,570 | 1,755 | ,570 |
| 2 | Humidité | -,097 ^c | -,631 | ,535 | -,136 | ,362 | 2,760 | ,362 |

Annexe 4 : Régression multiple linéaire de Eev+v (bloc A ,12 m X 18m)

Statistiques descriptives

| | Moyenne | Ecart-type | N |
|-----------------|---------|------------|----|
| Perte totale | 34,2620 | 3,53412 | 15 |
| Température | 28,1920 | 10,80963 | 15 |
| Humidité | 28,2947 | 11,61322 | 15 |
| Vitesse du vent | 2,1020 | ,80396 | 15 |

Récapitulatif des modèles

| Modèle | R | R-deux | R-deux ajusté | Erreur standard de l'estimation |
|--------|-------------------|--------|---------------|---------------------------------|
| 1 | ,920 ^a | ,846 | ,804 | 1,56598 |
| 2 | ,920 ^b | ,846 | ,820 | 1,49948 |
| 3 | ,916 ^c | ,839 | ,826 | 1,47279 |

Coefficients

| Modèle | | Coefficients non standardisés | | Coefficients standardisés | t | Sig. |
|--------|-------------|-------------------------------|-----------------|---------------------------|--------|------|
| | | A | Erreur standard | Bêta | | |
| 1 | (Constante) | 25,821 | 1,095 | | 23,586 | ,000 |
| | Température | ,299 | ,036 | ,916 | 8,223 | ,000 |

a. Variable dépendante : Perte totale

| Variables exclues ^a | | | | | | | | |
|--|-----------------|-------------------|------|------|-----------------------|-----------------------------|-------|--------------------|
| Modèle | | Bêta dans | t | Sig. | Corrélation partielle | Statistiques de colinéarité | | |
| | | | | | | Tolérance | VIF | Tolérance minimale |
| 1 | Humidité | ,055 ^b | ,232 | ,821 | ,067 | ,241 | 4,142 | ,241 |
| | Vitesse du vent | ,088 ^b | ,736 | ,476 | ,208 | ,900 | 1,111 | ,900 |
| a. Variable dépendante : Perte totale | | | | | | | | |
| b. Valeurs prédites dans le modèle : (constantes), Température | | | | | | | | |

Annexe 5 : Régression multiple linéaire de Eev+v (bloc B ,18 m X 18m)

Statistiques descriptives

| | Moyenne | Ecart-type | N |
|-----------------|---------|------------|----|
| Perte totale | 36,4538 | 5,53244 | 22 |
| Température | 18,6936 | 8,03288 | 22 |
| Humidité | 44,4577 | 9,16035 | 22 |
| Vitesse du vent | 1,4809 | ,87013 | 22 |

Récapitulatif des modèles

| Modèle | R | R-deux | R-deux ajusté | Erreur standard de l'estimation |
|--------|-------------------|--------|---------------|---------------------------------|
| 1 | ,903 ^a | ,815 | ,784 | 2,57095 |
| 2 | ,895 ^b | ,801 | ,780 | 2,59248 |
| 3 | ,878 ^c | ,771 | ,759 | 2,71519 |

a. Valeurs prédites : (constantes), Vitesse du vent, Température, Humidité

b. Valeurs prédites : (constantes), Vitesse du vent, Température

c. Valeurs prédites : (constantes), Température

Coefficients

| Modèle | | Coefficients non standardisés | | Coefficients standardisés | t | Sig. |
|--------|-----------------|-------------------------------|-----------------|---------------------------|--------|------|
| | | A | Erreur standard | | | |
| 1 | (Constante) | 31,385 | 5,988 | | 5,241 | ,000 |
| | Température | ,447 | ,107 | ,649 | 4,186 | ,001 |
| | Humidité | -,109 | ,095 | -,181 | -1,149 | ,266 |
| | Vitesse du vent | 1,067 | ,824 | ,168 | 1,295 | ,212 |
| 2 | (Constante) | 24,708 | 1,451 | | 17,027 | ,000 |
| | Température | ,521 | ,086 | ,756 | 6,079 | ,000 |
| | Vitesse du vent | 1,356 | ,791 | ,213 | 1,714 | ,103 |
| 3 | (Constante) | 25,152 | 1,495 | | 16,819 | ,000 |
| | Température | ,605 | ,074 | ,878 | 8,197 | ,000 |

a. Variable dépendante : Perte totale

Annexe 6 : Régression multiple linéaire de perte d'eau du sol

Statistiques descriptives

| | N | Minimum | Maximum | Moyenne | Ecart type |
|--------------------|----|---------|---------|---------|------------|
| Perte d'eau du sol | 24 | ,18 | ,39 | ,2406 | ,05317 |
| Température | 24 | 9,46 | 37,66 | 19,0825 | 7,80806 |
| Humidité | 24 | 26,50 | 62,66 | 43,9054 | 9,09655 |
| Vitesse du vent | 24 | ,40 | 4,79 | 1,6167 | 1,07157 |

Récapitulatif des modèles

| Modèle | R | R-deux | R-deux ajusté | Erreur standard de l'estimation |
|--------|-------------------|--------|---------------|---------------------------------|
| 1 | ,844 ^a | ,712 | ,668 | ,03062 |
| 2 | ,825 ^b | ,681 | ,650 | ,03145 |

a. Valeurs prédites : (constantes), Vitesse du vent, Humidité, Température

b. Valeurs prédites : (constantes), Vitesse du vent, Température

Coefficients

| Modèle | | Coefficients non standardisés | | Coefficients standardisés | t | Sig. |
|--------|-----------------|-------------------------------|-----------------|---------------------------|-------|------|
| | | A | Erreur standard | Bêta | | |
| 1 | (Constante) | ,046 | ,063 | | ,729 | ,474 |
| | Température | ,005 | ,001 | ,797 | 4,314 | ,000 |
| | Humidité | ,001 | ,001 | ,255 | 1,466 | ,158 |
| | Vitesse du vent | ,016 | ,007 | ,319 | 2,222 | ,038 |
| 2 | (Constante) | ,136 | ,017 | | 7,821 | ,000 |
| | Température | ,004 | ,001 | ,625 | 4,266 | ,000 |
| | Vitesse du vent | ,015 | ,007 | ,298 | 2,034 | ,055 |

a. Variable dépendante : Perte d'eau du sol